



پژوهشی:

- شناسایی آزمایشگاهی سطح تسلیم مواد زائد سیلتی اشیاع
امیرعباس ریاحی‌خو و علی اخترپور
- تحلیل قاب‌های صفحه‌ای دوتعدی با روش تحلیلی ترکیب نیرو-جابجایی
امیرحسین بحرینی، علی عسگری، علیرضا خیبری و رضا تقی‌پور
- مدل‌سازی ریاضی عدم قطعیت در مقاطع عرضی رودخانه در پارامترهای هیدرودینامیک جریان در حالت ماندگار
راضیه ولی‌زاده، مهدی مظاهری و جمال محمد ولی سامانی
- مطالعه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای روانگرا توسط ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با ژئوتکستایل با استفاده از میز لرزان کوچک مقیاس
پرنا یاریختی و علی اکبر گلشنی
- شبیه‌سازی یکپارچه‌ی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی با روش ترک مجزای افزوده و پردازش تصاویر هوایی
علی حشمتی و مهرداد تقی‌زاده منظری

مروری:

- مروری بر مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری با تأکید بر کاهش میزان بار آلودگی رواناب شهری در محل
فرخنده خراشادی‌زاده، محدثه شفیعی، علی اسدی، لیلا مصلح، محمدرضا جبه داری و علیرضا مقدم نیا

یادداشت فنی:

- مروری بر فیزیک جریان‌های واریزه‌ای و اهمیت به‌کارگیری شرایط خاک غیراشباع در برآورد حجم فرسایش
آناهیتا آقاگلی و حامد صادقی
- ارائه‌ی مدل قیمت‌گذاری برای خدمات تاکسی خطی در شهر اصفهان
امین نجفی، امیرمسعود رحیمی و محسن ابوطالبی‌اصفهانی
- بررسی اثر خاکستر لجن خلیج گرگان در پارامترهای مکانیکی خاک لس گرگان در درصد رطوبت‌های متفاوت و انرژی تراکم یکسان
وحید پسرکلو، سید حمید لاجوردی، حسین ملاعباسی و سید محمد میرحسینی

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سر دبیر: دکتر میرمصدق جمالی

سر دبیر هیأت تحریریه: دکتر سعید سهراب پور

ویرایش: رزیتا رستخیز پایدار

صفحه آرایی و امور گرافیکی: غزل احمدی میرقائد و راضیه قربانی

امور اجرایی: شیما آل اسداله و مریم پورابراهیمی باوفا

مجله ی مهندسی عمران شریف در پایگاه های DOAJ، ISC و SID نمایه می شود.

نشانی: تهران/ صندوق پستی ۸۶۳۹-۱۱۱۵۵

دفتر مجله ی علمی و پژوهشی شریف

تلفن: ۶۶۰۵۴۱۹-۶۶۱۶۴۰۹۳

نمابر: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی سایت: [http:// journal.sharif.ir](http://journal.sharif.ir)

رایانامه: pajouhesh@sharif.edu

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

دکتر بیتا آیتی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

دکتر همایون استکانچی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر علی پاک

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر وهب توفیق

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن حاجی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امیررضا خویی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد دلنواز

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

دکتر حسین رحامی

دانشکده علوم مهندسی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

دکتر فیاض رحیم زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیر صمیمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ناصر طالب بیدختی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

دکتر محسن قائمیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدجواد کتابداری

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمد کرمانشاه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر موسی محمودی صاحبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دکتر حسن میرزایزرگ

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر علی نورزاد

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

دکتر جواد واثقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر ابوالحسن وفائی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه‌ی تخصصی

سر دبیر تخصصی: دکتر ابوالحسن وفایی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر احمد ابریشم‌چی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر همایون استکانچی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباس افشار

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمدعلی برخوردار

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر حسین پورزاهدی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مسعود تجریشی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر ایوب ترکیان

دانشیار مرکز تحقیقات آب و انرژی - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر عباسعلی تسنیمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر حسن حاجی کاظمی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سیدمحسن حائری

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیررضا خوبی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فیاض رحیمزاده رفوئی

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی اکبر رمضانیانپور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدمهدی زهرایی

دانشیار دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدمهدی سعادت‌پور

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عیسی سلاجقه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه شهید باهنر کرمان

دکتر ناصر طالب بیدختی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر ارسلان قهرمانی

استاد دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی عمران - دانشگاه شیراز

دکتر محمد کارآموز

استاد دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر محمدتقی کاظمی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد کرمانشاه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر علی کاوه

استاد دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر سیدمجدالدین میرمحمدحسینی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سیدشهاب الدین یثربی

دانشیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

هیأت مشاوران

دکتر کاظم اسماعیلی

گروه علوم و مهندسی آب - دانشکده کشاورزی - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر میثم اکبرزاده

دانشکده‌ی مهندسی حمل و نقل - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر وحیدرضا اوحدی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه بوعلی سینا همدان

دکتر فرهاد بهنام فر

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عباس پوردیلمی چوگانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه دامغان

دکتر مسعود تابش

دانشکدگان فنی - دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تهران

دکتر اکبر چشمی

دانشکدگان علوم، دانشکده‌ی زمین شناسی - دانشگاه تهران

دکتر سعیدرضا خداشناس

گروه علوم و مهندسی آب - دانشکده کشاورزی - دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر امین خواجه دزفولی

دانشکده‌ی عمران و معماری - دانشگاه شهید چمران اهواز

دکتر رسول دانشفراز

دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه مراغه

دکتر حسین رحامی

دانشکده گان فنی - دانشکدی علوم مهندسی - دانشگاه تهران

دکتر حامد رحمن شکرگزار

دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه محقق اردبیلی

دکتر علی محمد رجبی

دانشکدگان علوم، دانشکده ی زمین شناسی - دانشگاه تهران

دکتر حسن شرفی

دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه رازی کرمانشاه

دکتر عبدالرضا شیخ الاسلامی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر عمار صفایی نعمت الهی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر جواد غفاری

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر هوشنگ کاتبی

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

دکتر روح اله فاتحی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک - دانشگاه خلیج فارس

دکتر علیرضا فیروزفر

دانشکده‌ی مهندسی عمران - دانشگاه زنجان

دکتر امیررضا ممدوحی

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه تربیت مدرس

مقالات پژوهشی:

- ۳ شناسایی آزمایشگاهی سطح تسلیم مواد زائد سیلتی اشباع
امیرعباس ریاحی خو و علی اخترپور
- ۱۳ تحلیل قاب‌های صفحه‌ای دو بُعدی با روش تحلیلی ترکیب نیرو-جابجایی
امیرحسین بحرینی، علی عسگری، علیرضا خبیری و رضا تقی‌پور
- ۲۸ مدل‌سازی ریاضی عدم قطعیت در مقاطع عرضی رودخانه در پارامترهای هیدرودینامیک جریان در حالت ماندگار
راضیه ولی‌زاده، مهدی مظاهری و جمال محمد ولی سامانی
- ۴۲ مطالعه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای روانگرا توسط ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با ژئوتکستایل با استفاده از میز لرزان
کوچک مقیاس
پرنا یاریختی و علی اکبر گلشنی
- ۵۸ شبیه‌سازی یکپارچه‌ی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی با روش ترک مجزای افزوده و پردازش تصاویر هوایی
علی حشمتی و مهرداد تقی‌زاده منطری

مروری:

- ۷۰ مروری بر مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری با تأکید بر کاهش میزان بار آلودگی رواناب شهری در محل
فرخنده خراشادی‌زاده، محدثه شفیعی، علی اسدی، لیلا مصلح، محمدرضا جبه داری و علیرضا مقدم نیا

یادداشت فنی:

- ۹۰ مروری بر فیزیک جریان‌های واریزه‌ای و اهمیت به‌کارگیری شرایط خاک غیراشباع در برآورد حجم فرسایش
آناهیتا آقاگلی و حامد صادقی
- ۱۰۴ ارائه‌ی مدل قیمت‌گذاری برای خدمات تاکسی خطی در شهر اصفهان
امین نجفی، امیرمسعود رحیمی و محسن ابوطالبی اصفهانی
- ۱۱۴ بررسی اثر خاکستر لجن خلیج گرگان در پارامترهای مکانیکی خاک لس گرگان در درصد رطوبت‌های متفاوت و انرژی تراکم
یکسان
وحید پسرکلو، سید حمید لاجوردی، حسین ملاعباسی و سید محمد میرحسینی



Research Article

Experimental Study of the Yield Surface of Saturated Silty Tailings

Amirabbas RiyahiKhoo and Ali Akhtarpour *

Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

* corresponding author:(akhtarpour@um.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 5 March 2024

Revised: 8 May 2024

Accepted: 12 May 2024

Keywords:

Mine tailings,
isotropic yield curve,
shear stress,
plastic strain,
triaxial stress path device

Abstract

Static liquefaction is one of the most important challenges for the stability of mining tailings dams. Several experimental studies have been conducted on this issue within the framework of critical state theory. Additionally, deformations such as tensile cracks and unusual static deformations of these dams are among the other issues related to the stability of these structures. Numerical simulation of the stress-strain behavior of materials under various loading conditions requires a suitable constitutive model, with one of its main components being the yield criterion. Extensive studies have been conducted to identify the yield surfaces of soil materials (sand and clay) through laboratory tests, but the identification of yield surfaces for tailing materials has received less attention. This study aims to identify the yield surface of silty tailing materials from the Sungun copper mine using laboratory experiments under initial isotropic stress and saturated conditions. For this purpose, all specimens with a similar stress history were initially consolidated under isotropic stress conditions and then unloaded up to 50% of the initial confining stress. The over-consolidation ratio (OCR) of these specimens was approximately set to be two. Subsequently, the specimens were subjected to stress-controlled radial stresses in the effective mean stress-deviatoric stress ($\bar{p}$ - q) space. The compatibility of the laboratory yield surface with the proposed yield surfaces of the Mroz constitutive model was examined. The results indicate that the obtained yield surface under existing stress conditions follows the non-associated flow rule. The proposed yield surface of the Mroz constitutive model, by considering appropriate constants, shows satisfactory agreement with the laboratory yield surface. The work input for each stress path demonstrates that at approximately 0.25 kJ/m², the specimens reached yield conditions. The flow vector plots indicate that the obtained yield surface follows the non-associated flow rule. Observing linear trends in the deformation changes of the specimens after the yield point indicates rapid cementation in these materials.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:

RiyahiKhoo, A.A. and Akhtarpour, A. 2025. Experimental study of the yield surface of saturated silty tailings, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 1-12. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.64136.3306>



شناسایی آزمایشگاهی سطح تسلیم مواد زائد سیلتی اشباع

امیرعباس ریاحی خو و علی اخترپور*

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

*نویسنده مسئول (akhtarpour@um.ac.ir)

چکیده

شبیه‌سازی عددی رفتار تنش- کرنش مصالح در شرایط بارگذاری مختلف، نیازمند یک مدل رفتاری مناسب است؛ که یکی از اجزاء اصلی آن، معیار یا سطح تسلیم است. مطالعات گسترده‌ای برای شناسایی سطح تسلیم مصالح خاکی (ماسه و رس) به روش آزمایشگاهی انجام شده است، اما تاکنون به مورد شناسایی سطح تسلیم مواد زائد کمتر توجه شده است. در پژوهش حاضر، بررسی رفتار تنش- کرنش مواد زائد سیلتی معدن مس سونگون با بیش تحکیمی سبک، به روش آزمایشگاهی در شرایط تنش اولیه‌ی همسان و اشباع با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری تنش کنترل زهکشی شده بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که سطح تسلیم حاصل در شرایط تنشی موجود، در قانون جریان غیروابسته قرار دارد، همچنین به تطابق خوبی بین سطح تسلیم آزمایشگاهی و پیشنهادی مدل مرز اشاره دارد. مشاهده‌ی روند خطی تغییرات تغییرشکل مصالح آزمایش شده بعد از نقطه‌ی تسلیم، حکایت از نوعی سمانتاسیون سریع در مصالح مذکور دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

واژگان کلیدی:

مواد زائد معدنی،

سطح تسلیم همسان،

تنش برشی،

کرنش خمیری،

آزمایش‌های سه‌محوری.

۱. مقدمه

مواد زائد معدنی، شامل پسماند حاصل از واحدهای تولیدی، فراوری، تصفیه، و شستشوی مواد معدنی است. به بیان دیگر، مواد زائد معدنی، مخلوطی از سنگ خرد شده و مایعات فرآوری شده از آسیاب، مواد شوینده یا کنسانتره هستند، که پس از استخراج فلزات گرانبها، مواد، و سوخت‌های معدنی یا زغال سنگ از منابع معدنی به جای می‌مانند.^[۱] در حال حاضر، روش متداول انباشت مواد زائد به صورت تالاب یا همان سد باطله است.^[۲]

طبق بررسی مطالعات پیشین، تاکنون پارامترهای عوامل مؤثر در خواص مکانیکی مواد زائد، به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی نظیر تحکیم و سه‌محوری مشخص شده است؛ به‌طوری که پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی در این خصوص قابل دسترسی است.^[۳-۱۵] پدیده‌ی روانگرایی استاتیکی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پایداری سازه‌های سدهای باطله‌ی معدنی بوده و مطالعات آزمایشگاهی متعددی درخصوص این امر در چارچوب تئوری حالت بحرانی انجام شده است.^[۶ و ۷] یکی از معروفترین سدهای باطله، که به علت پدیده‌ی روانگرایی استاتیکی دچار شکست شده است، سد کالاوراز^۱ است.^[۸]

علاوه بر این، پدیده‌های تغییرشکلی نظیر ترک‌های کششی و تغییرشکل‌های استاتیکی نامتعارف سدهای باطله نیز از دیگر مسائل مرتبط با پایداری این‌گونه سازه‌هاست. اما مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرشکل مصالح مواد زائد تحت بارگذاری‌های خاص سازه‌های مذکور و حتی بررسی دقیق پدیده‌ی روانگرایی در مواد زائد معدنی، نیازمند در اختیار داشتن مدل‌های رفتاری مناسبی است. ابهام‌های متعددی درخصوص استفاده از مدل‌های رفتاری متداول خاک‌ها، نظیر: کم‌کلی اصلاح‌شده، موهر- کلمب، دراکر- پراگر، و P2PSand جهت شبیه‌سازی رفتار مصالح اخیر وجود دارد.^[۹-۱۱] لذا وجود یک مدل رفتاری مناسب که بتواند به‌خوبی وضعیت تنش- کرنش آن‌ها را شبیه‌سازی کند، می‌تواند کمک شایانی به طراحی، ساخت، و کنترل ایمنی این‌گونه سازه‌ها از خود نشان دهد.

سطح یا معیار تسلیم مصالح از اجزاء اصلی هر مدل رفتاری است. شناسایی آزمایشگاهی سطح تسلیم مصالح خاکی در شرایط اشباع از دیرباز مورد توجه بوده است. به عنوان نمونه، گراهام^۲ و همکاران (۱۹۸۳) به روش آزمایشگاهی سطح تسلیم رس وینیپگ^۳ را با کمک آزمایش‌های سه‌محوری مسیر تنش

³ Winnipeg¹ Calaveras² Graham

افزایش تنش مؤثر در لایه‌های اشباع زیرین شود. در ادامه، با بارش نزولات جوی و یا ریختن مجدد باطله‌های آبدار، باطله‌ی خشک شده‌ی سطحی، مجدد اشباع می‌شود. این فرآیند نوعی باربرداری از لایه‌های اشباع زیرین است و موجب کاهش تنش مؤثر در آن‌ها می‌شود. چنین پدیده‌ای، رفتار بیش‌تحکیمی در لایه‌های اشباع زیرین را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، اخیراً مطالعاتی درخصوص پیش بارگذاری مواد باطله به روش‌هایی همچون پیش‌بارگذاری با خلأ و الکتروکنتیک انجام شده است.^{[۱۸] و [۱۹]} با روش‌های ذکرشده، نوعی بیش‌تحکیمی سبک به مصالح باطله اعمال می‌شود. لذا در مطالعه‌ی حاضر، سطح تسلیم باطله‌ی مواد معدنی موجود در لایه‌های سطحی کم‌عمق که همواره در شرایط اشباع هستند و تحت فرآیند بارگذاری و باربرداری مذکور دچار بیش‌تحکیمی سبک شده‌اند، بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مشخصات مصالح و آماده‌سازی نمونه

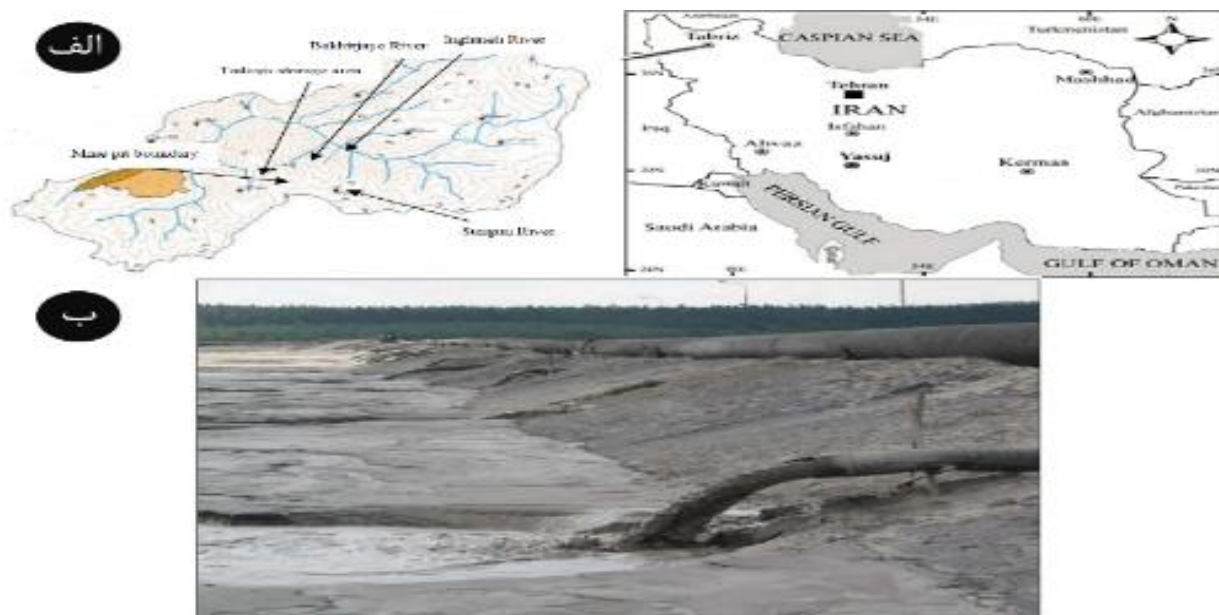
در حال حاضر، معدن مس سونگون، دومین معدن بزرگ ایران است، که در شمال غربی کشور واقع شده (شکل ۱- الف) و از سال ۱۳۸۵ تاکنون، مواد زائد کارخانه فراوری و تغلیظ معدن سونگون به کمک لوله‌هایی به صورت دوغابی به داخل مخزن سدی سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی انتقال داده می‌شود (شکل ۱- ب). به علت بالا بودن سطح آب داخل مخزن، امکان نمونه‌گیری از داخل مخزن میسر نیست و حجم مواد زائد لازم، به صورت دوغابی، مستقیماً از لوله‌ی خروجی مواد زائد به داخل مخزن گرفته شده است.

بعد از خشک‌کردن مواد زائد دوغابی، تعدادی از آزمون‌های اولیه برای شناسایی خواص فیزیکی بر روی آن‌ها انجام شده است، که نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. مواد زائد بررسی‌شده از نظر دانه‌بندی در گروه خاک‌های ریزدانه‌ی غیرخمیری قرار دارند و در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی مواد زائد براساس استاندارد ASTM D ۴۲۲-۶۳ مشاهده می‌شود.^{[۱۶] و [۲۰]}

تعیین کرده‌اند.^[۱۳] یاسوفوکا^۱ و همکاران (۱۹۹۱)، برای ماسه‌ی اشباع آیو^۲ در شرایط بیش‌تحکیمی همسان و ناهمسان، سطح تسلیم را با کمک آزمایش‌های سه‌محوری با مسیر تنش‌های شعاعی به نسبت تنش برشی ثابت تعیین کرده‌اند.^[۱۳] کووانا و جاردین^۳ (۲۰۰۷)، برای ماسه‌ی HRS پژوهش‌های مشابهی انجام داده و سطح تسلیم آن را به‌دست آورده‌اند.^[۱۴] چو^۴ و همکاران (۲۰۱۰)، سطح تسلیم رس یخچالی شیکاگو را با کمک آزمایش‌های سه‌محوری در مسیر تنش‌های شعاعی بررسی و همچنین سرعت موج برشی در داخل نمونه با استفاده از آزمایش‌های مان خمشی را تعیین کرده‌اند.^[۱۵] ال‌شاراد^۵ و همکاران (۲۰۱۷)، نیز مطالعه‌ی آزمایشگاهی گسترده‌ای جهت شناسایی سطح تسلیم رس کائولینی در شرایط اشباع و غیراشباع به کمک آزمون‌های سه‌محوری مسیر تنش انجام داده‌اند.^[۱۶] ویتوفسکی^۶ و همکاران (۲۰۲۳)، سطح تسلیم خاکستر بادی کلسیمی حاصل از معدن روباز بلچاتوو^۷ در لهستان را در آزمایشگاه با کمک آزمون‌های سه‌محوری مسیر تنش شعاعی بررسی و سطح تسلیم مصالح مذکور را استخراج کرده‌اند.^[۱۷]

با توجه به پژوهش‌های صورت‌گرفته، می‌توان بیان کرد تاکنون مطالعه‌ی آزمایشگاهی معتبری پیرامون شناسایی سطح تسلیم مواد زائد معدنی در شرایط بیش‌تحکیم یافتگی انجام نشده است. بر این اساس، هدف اصلی مطالعه‌ی حاضر، برداشتن گامی مؤثر در جهت شناسایی سطح تسلیم مواد زائد معدنی است. مواد زائد بررسی‌شده در پژوهش حاضر، خروجی از کارخانه‌ی فراوری و تغلیظ معدن مس سونگون هستند، که از نظر دانه‌بندی در گروه خاک‌های ریزدانه‌ی غیرخمیری قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر سعی شده است با انجام یک سری آزمون‌های سه‌محوری تنش کنترل، سطح تسلیم این مصالح در شرایط اشباع و وضعیت بیش‌تحکیمی اولیه‌ی ایزوتروپیک شناسایی شود.

توقف عملیات طولانی‌مدت ریختن باطله‌های آبدار به داخل مخزن و همچنین شرایط آب‌وهوایی گرم، می‌تواند موجب خشک‌شدن لایه‌های فوقانی باطله و



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون و محل پیت معدن، ب) لوله‌ی خروجی مواد زائد به سد باطله.

⁵ AL-Sharrad

⁶ Witowski

⁷ Belchatow

¹ Yasufuka

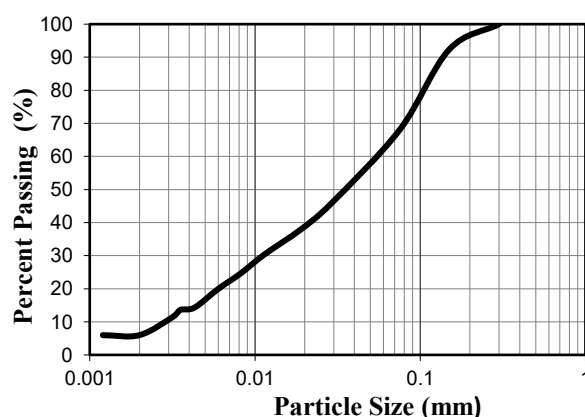
² Aio

³ Kuwana & Jardine

⁴ Cho

جدول ۱. خصوصیات خاک بررسی‌شده.

Characteristics	Results	Standard
Soil Type	ML	ASTM D 2487
Silt (%)	47-54	ASTM D 2487
Clay (%)	11-18	ASTM D 2487
Sand (%)	35	ASTM D 2487
liquid limit (LL)	25	ASTM D 4318
plastic limit (PL)	22	ASTM D 4318
Relative density (G_s)	2.74	ASTM D 792
minimum dry density (kN/m ³)	12.6	ASTM D 4254
Maximum dry density (kN/m ³)	16.29	ASTM D 4253



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مواد زائد سیلتی مطالعه‌شده.

آب، نرم‌شوندگی کرنشی بیشتری نسبت به روش کوبش مرطوب از خود نشان داده‌اند.^[۲۴] در همین راستا، هووگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۰)، به بررسی رفتار تنش-کرنش نمونه‌های دست‌نخورده‌ی اخذشده با روش تیوبی از مواد زائد ماسه‌ی سیلتی و نمونه‌های بازسازی‌شده با روش‌های کوبش مرطوب، رسوب‌دهی در آب، و ته‌نشست دوغابی که تخلخل یکسان با نمونه‌ی دست‌نخورده داشته‌اند، پرداخته و دریافته‌اند که نمونه‌های دست‌نخورده، مقاوم‌تر و رفتار اتساعی قوی‌تری نسبت به نمونه‌های بازسازی‌شده با هر سه روش ذکرشده دارند. با وجود این، رفتار تنش-کرنش نمونه‌های بازسازی‌شده با یکدیگر متفاوت است.^[۲۳] همچنین چنگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۱)، از نمونه‌های دست‌نخورده‌ی بلوکی‌شکل مواد زائد سیلتی با برش (کُری‌گیری)، نمونه‌ی آزمایشگاهی دست‌نخورده تهیه کرده‌اند. همچنین نمونه‌های بازسازی‌شده از همان مواد با روش‌های کوبش مرطوب و ته‌نشست دوغابی که تخلخل یکسان با نمونه‌ی دست‌نخورده داشته‌اند، را ساخته و دریافته‌اند که هر یک از نمونه‌های بازسازی‌شده، خط حالت بحرانی متفاوتی با خط حالت بحرانی نمونه‌های دست‌نخورده از خود بروز داده‌اند.^[۲۵] در مطالعه‌ای دیگر، ریید و فانی^{۱۳} (۲۰۲۲)، به بررسی رفتار مواد زائد سیلتی به وسیله‌ی انجام آزمون‌های سه‌محوری روی نمونه‌های دست‌نخورده‌ی تهیه‌شده با روش بلوکی و نمونه‌های بازسازی‌شده با روش کوبش مرطوب و ته‌نشست دوغابی پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که نمونه‌های بازسازی‌شده با روش کوبش مرطوب، تقریباً خط حالت بحرانی یکسانی با نمونه‌های دست‌نخورده‌ی اخذشده با روش بلوکی داشته‌اند. رفتار حاصل از نمونه‌های ساخته‌شده با روش ته‌نشست دوغابی، متراکم‌تر از نمونه‌های دست‌نخورده بوده است. همچنین نمونه‌های مذکور در سست‌ترین حالت، رفتار اتساعی از خود نشان داده‌اند، که با رفتار برجای مصالح همخوانی لازم را نداشته‌اند، همچنین نتایج نشان داده‌اند که روش کوبش مرطوب با وجود ارائه‌ی خط حالت بحرانی، قابل اعتمادتر ولی رفتاری تدریجی و انقباضی‌تر نسبت به نمونه‌های دست‌نخورده داشته‌اند.^[۲۶] با توجه به نتایج حاصل از پژوهش‌های اخیر می‌توان بیان کرد هر کدام از روش‌های نمونه‌سازی کوبش مرطوب و ته‌نشست دوغابی مزایا و معایبی در شبیه‌سازی رفتار نمونه‌های دست‌نخورده‌ی مواد زائد سیلتی دارند و تاکنون روشی کارآمد که بتواند به‌خوبی تمام خواص رفتاری شرایط برجای (چگالی، بافت، و ریزلایه‌های موجود) مصالح زائد ذکرشده را با دقت شبیه‌سازی کند، ارائه نشده است.

در پژوهش حاضر، هدف شناسایی سطح تسلیم مواد زائد در عمق‌های سطحی بوده است، که در این وضعیت مصالح تقریباً در سست‌ترین حالت خود هستند و با توجه به درصد ریزدانه‌ی بالای آن‌ها و ابعاد کوچک نمونه‌های آزمایشگاهی، ساخت نمونه به روش ته‌نشست دوغابی دشوار بوده است؛ لذا از روش کوبش مرطوب برای آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین برای حذف تأثیر غیریکنواختی چگالی در ارتفاع نمونه از روش تراکم کاهشی استفاده شده است.^[۲۷] به جهت اینکه نمونه در سطوح بالای کرنش، تغییرشکل‌های یکنواخت و فاقد تمرکز برش دارد، نمونه‌ها تا حد امکان، سست ساخته شده‌اند و چگالی معادل با چگالی نسبی (D_r) ۳۰٪، که معادل با وزن مخصوص خشک ۱۳/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است، معرف شرایط تراکمی اولیه‌ی کلیه‌ی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین، مطابق پیشنهاد‌های ارائه‌شده در روش تراکم کاهشی، برای رسیدن به چگالی مذکور، به مواد زائد سیلتی حدود ۸٪ وزنی،

همان‌طور که بیان شد، با توجه به عدم امکان اخذ نمونه‌های دست‌نخورده، کلیه‌ی نمونه‌های آزمایش‌شده در پژوهش حاضر، از نوع بازسازی‌شده هستند، که این امر خود همیشه به‌عنوان چالشی پیش‌روی پژوهشگران در یافتن مناسب‌ترین روش جهت بازسازی در محیط آزمایشگاهی این‌گونه مصالح بوده است.^[۲۳-۲۱] روش ته‌نشست دوغابی (SD)^۸، کوبش مرطوب (MT)^۹، و رسوب-دهی در آب (WP)^{۱۰}، متداول‌ترین روش‌ها برای بازسازی نمونه‌های خاک هستند.

روش رسوب‌دهی در آب، دقت مناسبی در شبیه‌سازی رفتار سخت‌شوندگی کرنش ماسه‌هایی که به‌صورت هیدرولیکی نهشته شده‌اند از خود نشان داده است.^[۲۳ و ۲۱] مطابق با پژوهش‌های پیشین، می‌توان بیان کرد که مقایسه‌ی روش رسوب‌دهی در آب و روش کوبش مرطوب در ماسه‌ی سیلتی نشان می‌دهد که دو روش آماده‌سازی اخیر در شبیه‌سازی رفتار برشی مصالح مذکور، تقریباً یکسان عمل می‌کنند. حال آنکه نمونه‌های ساخته‌شده با روش رسوب‌دهی در

¹¹ Høeg

¹² Chang

¹³ Ried and Fanni

⁸Slurry Deposition

⁹ Moist Tamping

¹⁰ Water pluviation

رطوبت افزوده شده است. همچنین، نمونه با ارتفاع ۷۲ میلی‌متر و قطر ۳۸ میلی‌متر در ۵ لایه، متراکم و بازسازی شده است.

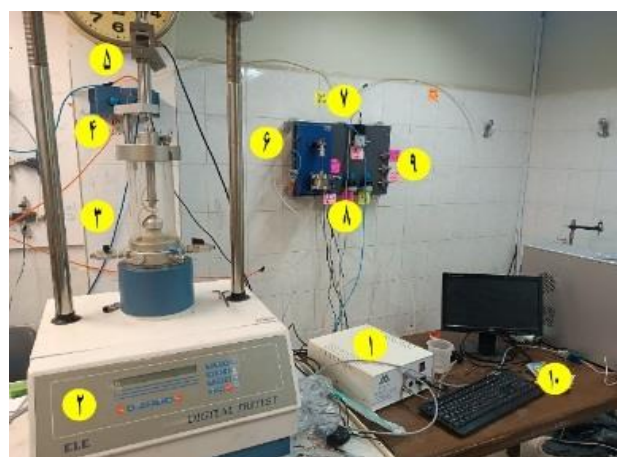
۲.۲. تجهیزات استفاده شده

در پژوهش حاضر، به منظور انجام آزمایش‌های سه‌محوری اشباع، مسیر تنش تحت شرایط تنش همسان از دستگاه سه‌محوری ارتقاء یافته با قابلیت بارگذاری به صورت کرنش و تنش کنترل استفاده شده است (شکل ۳)؛ که یک رگلاتور برقی (با قابلیت تنظیم فشار خودکار) و یک رگلاتور دستی دارد، که از کمپرسوری با ظرفیت اسمی ۱۰ بار تغذیه می‌شود. رگلاتورهای اخیر به همراه دو دستگاه تبدیل فشار هوا به آب (بالادر)، وظیفه‌ی تأمین فشار همه‌جانبه و فشار برگشتی داخل نمونه را دارند. همچنین جهت اعمال تنش برشی اولیه، از جک برقی (با قابلیت تنظیم نیروی مورد نیاز به کمک کدنویسی) استفاده شده است. مقادیر تغییر حجم نمونه، تغییر شکل قائم، و نیروی محوری در طی آزمایش توسط دو دستگاه اندازه‌گیری تغییر حجم اتوماتیک، حسگرهای نیرو، و تغییر مکان اندازه‌گیری شده‌اند. کلیه‌ی رگلاتورهای برقی، جک برقی، و حسگرهای دستگاه به واحد قرائت، کنترل، و ثبت داده با قابلیت ثبت داده در هر ۳ ثانیه متصل بوده و بدین ترتیب قابلیت اعمال مسیرهای تنش مختلف و ثبت داده‌های خروجی به صورت تمام اتوماتیک فراهم آمده است. با وجود رگلاتور برقی با قابلیت تنظیم خودکار فشار همه‌جانبه و همچنین جک دارای قابلیت تنظیم خودکار تنش انحرافی، در ادامه با تعریف کدهای دستوری مسیر تنش برای دستگاه کنترل گر، فرایند بارگذاری بر نمونه به نحوی کنترل و اعمال شده است، که در حین هر آزمایش، مسیر تنش با نسبت تنش برشی اولیه تا رسیدن به نقطه‌ی تسلیم ادامه یابد. همچنین به علت اتصال کپ نمونه به میله‌ی بارگذاری، قابلیت کاهش بار قائم انحرافی نیز در دستگاه سه‌محوری ارتقاء یافته‌ی اخیر، وجود داشته و اعمال مسیرهای کششی میسر شده است.

۳.۲. متغیرها و پارامترهای مورد نیاز

متغیرهای اصلی تنش در خاک مطابق روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند:

$$p'_n = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) - u_w \quad (1)$$



شکل ۳. تجهیزات استفاده شده، شامل: (۱) سیستم ثبت، کنترل، و قرائت داده، (۲) جک برقی جهت اعمال نیروی محوری، (۳) سلول کاشت نمونه، (۴) کرنش سنج محوری نمونه، (۵) نیروسنج، (۶) کرنش سنج حجمی، (۷) رگلاتور برقی، (۸) رگلاتورهای دستی، (۹) حسگرهای فشارسنج، و (۱۰) سیستم کامپیوتر مرکزی.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

که در آن‌ها، σ_1 ، σ_2 ، و σ_3 تنش‌های اصلی، متغیرهای p'_n و q نیز به ترتیب معرف تنش خالص میانگین مؤثر و تنش تفاضلی هستند. در پژوهش حاضر، برای بیان نسبت تنش‌های اعمالی به نمونه در شرایط تنش ناهمسان، از متغیر نسبت تنش برشی (η) و همچنین شیب خط حالت بحرانی M_p و M_t ، به ترتیب به ازاء آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی مطابق روابط ۳ الی ۵ استفاده شده است.

$$\eta = \frac{\Delta q}{\Delta p} \quad (3)$$

$$M_p = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (4)$$

$$M_t = \frac{6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (5)$$

مقادیر انرژی ناشی از کار توسعه یافته (W) و طول بردار تنش (L) در حین فرایند بارگذاری، مطابق روابط ۶ و ۷ بیان می‌شوند:^[۱۲]

$$W = \sum (\sigma'_i \delta \varepsilon_a + 2\sigma'_3 \delta \varepsilon_r) \quad (6)$$

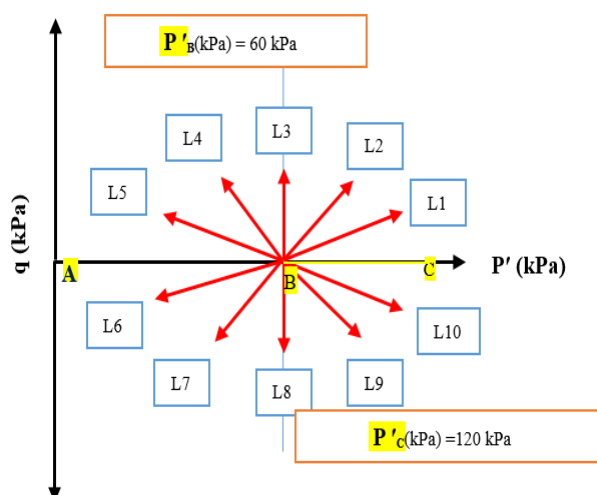
$$L = (\Delta \sigma_1'^2 + \Delta \sigma_3'^2)^{0.5} \quad (7)$$

که در آن‌ها، ε_a و ε_r به ترتیب کرنش محوری و شعاعی نمونه هستند.

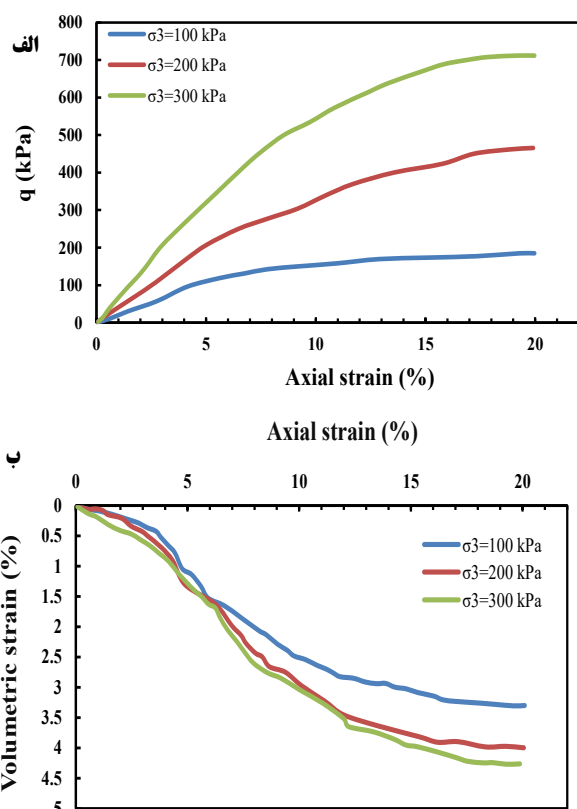
۴.۲. فرایند انجام آزمایش‌های تنش و کرنش کنترل

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی رفتار همسان اشباع نمونه‌های بازسازی شده از مواد زائد معدن مس سونگون، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری اشباع در شرایط همسان تحکیم شده تحت مسیرهای بارگذاری کششی و فشاری متفاوت به صورت تنش کنترل انجام شده است.

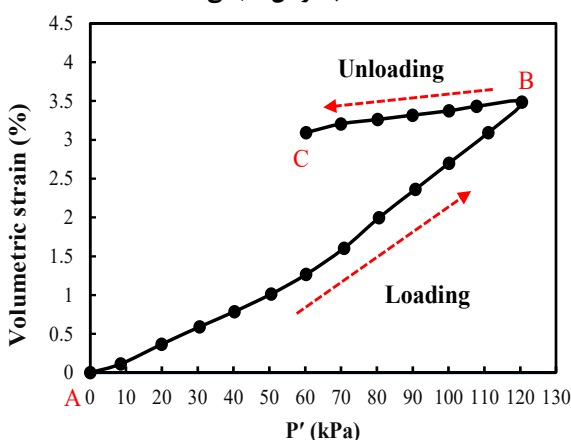
پس از آماده‌سازی نمونه و نصب غشاء مناسب، نمونه در داخل محفظه‌ی سل دستگاه سه‌محوری قرار گرفته و با فشار بک ۵۰ کیلوپاسکال اشباع شده است. سپس نمونه با نرخ ۵ کیلوپاسکال بر ساعت تا تنش همه‌جانبه‌ی ۱۲۰ کیلوپاسکال به صورت همسان تحکیم شده است (A تا C در شکل ۴). در ادامه، با همین نرخ تا تنش همه‌جانبه‌ی ۶۰ کیلوپاسکال به صورت ایزوتروپیک،



شکل ۴. مسیر تنش اعمالی به نمونه‌ها.



شکل ۵. نتایج سه محوری (کرنش کنترل) زهکشی‌شده:
(الف) کرنش محوری بر حسب تنش تفاضلی، (ب) کرنش محوری بر حسب کرنش حجمی.



شکل ۶. کرنش حجمی نمونه در حین فرایند باربرداری - بارگذاری.

همچنین، کرنش حجمی نمونه‌ی مواد زائد در حین فرایند بارگذاری - باربرداری در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

گراهام و همکاران (۱۹۸۳)،^[۱۲] با توجه به ایده‌ی برآورد تنش تسلیم با تشخیص بصری نقطه‌ی بیشینه‌ی انحنا بر روی منحنی تراکم و ایده‌ی تقاطع دو خط،^[۱۲] در صفحه‌ی $V: \ln \sigma'$ در آزمون‌های ادنومتري و همچنین روش دوطبقی گراهام و همکاران (۱۹۸۳)،^[۱۲] در تشخیص تنش تسلیم برای مجموعه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری بر روی رس با روش دوطبقی، میزان تنش تسلیم را برای هر یک از نمودارهای شکل ۷ تعیین کرده و سپس میانگین تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر ($\bar{p}$) نمودارهای مذکور را به‌عنوان تنش مؤثر میانگین نمونه‌های ماسه‌ی بیش تحکیم‌یافته در لحظه‌ی تسلیم در نظر گرفته‌اند.^{[۱۲] و [۳۲-۳۰]}

جدول ۲. آزمایش‌های مسیر تنش.

Test ID	Type of probing test	η_0
1	L_1	0.5
2	L_2	1.5
3	Vertical path (upward)	L_3
4	L_4	-1.5
5	L_5	-0.5
6	L_6	0.5
7	L_7	1.5
8	Vertical path (downward)	L_8
9	L_9	-1.5
10	L_{10}	-0.5

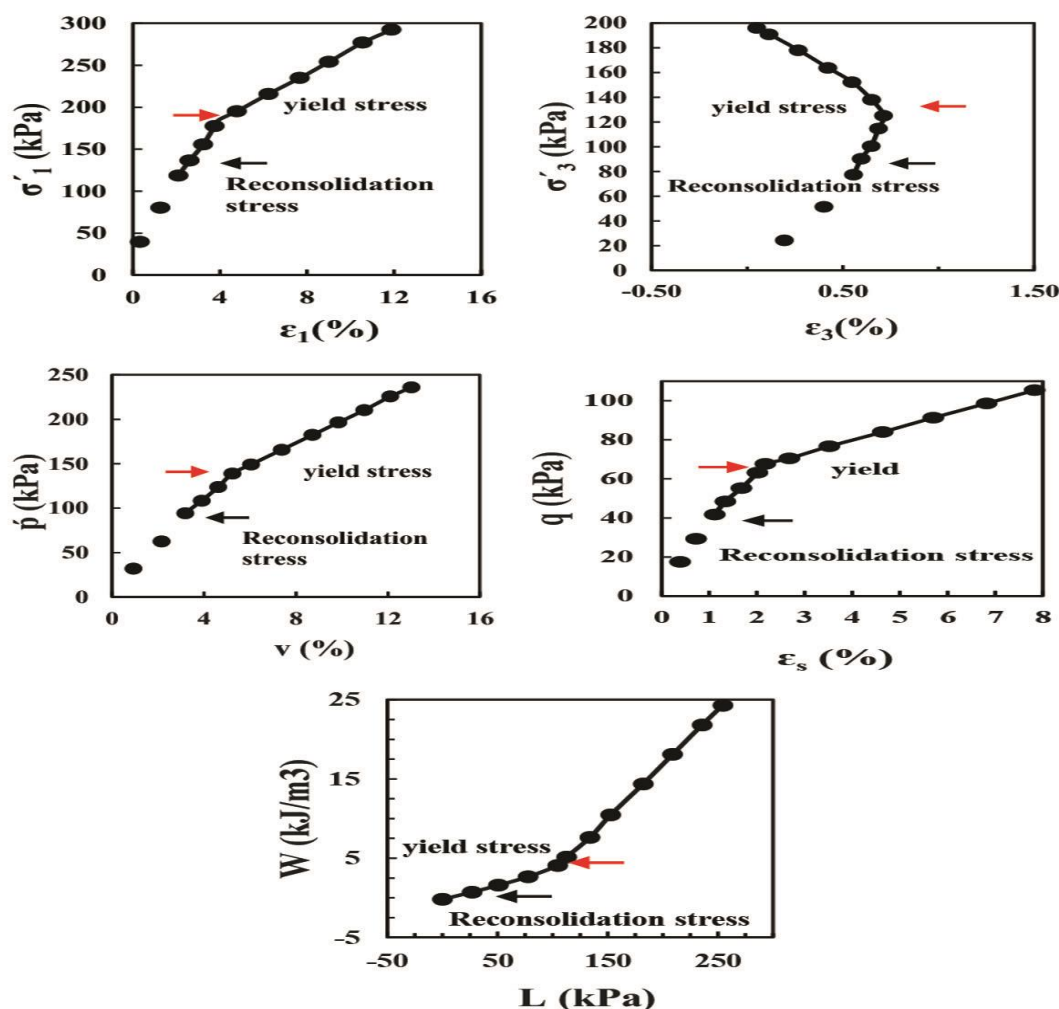
باربرداری انجام شده (C تا B در شکل ۴) و سپس در مسیرهای تنش‌های L_1 تا L_{10} ، بارگذاری در مسیرهای فشاری یا کششی با نسبت تنش برشی اولیه‌ی ثابت (η) برای شناسایی سطح تسلیم با سرعت تغییرات تنشی ۵ (kPa/hr) ادامه یافته است. شایان ذکر است که با فرض ثابت‌بودن سطح مقطع، جدول ۲ ارائه شده است، که در ادامه‌ی آزمایش‌ها، با نتایج کرنش حجمی و کرنش محوری، مقدار (η) اصلاح شده است. همچنین باید بیان کرد تا رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، فرض اولیه (η) با تقریبی مناسب نزدیک به (η) مفروض‌شده به‌دست آمده است، زیرا که تا رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، نتایج کرنش‌های محوری و حجمی مقادیر کوچکی هستند؛ اما پس از رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، مقادیر اصلاح‌شده جایگزین می‌شوند. همچنین باید توجه کرد که نرخ بارگذاری با توجه به توصیه‌های فنی معتبر درخصوص نرخ بارگذاری انحرافی،^{[۲۸] و [۲۹]} به نحوی تنظیم شده است که بارگذاری در شرایط زهکشی‌شده قرار گیرد. مقادیر نسبت تنش برشی برای هر یک از مسیرهای نشان داده‌شده در شکل ۳ به‌صورت عددی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

همچنین، علاوه‌بر آزمون‌های ذکرشده، جهت تعیین شیب خط بحرانی در حالت کششی (M_t) و فشاری (M_p)، سه آزمایش سه‌محوری زهکشی‌شده با کرنش کنترل در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰، و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بحث و بررسی نتایج آزمایشگاهی

نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری برای آزمون‌های سه‌محوری زهکشی‌شده‌ی کنترل کرنش در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. در تمامی آزمایش‌های صورت‌گرفته و نمودارهای ارائه‌شده (شامل کنترل تنش یا کنترل کرنش)، علامت مثبت کرنش‌های محوری و حجمی، به ترتیب کاهش ارتفاع و کاهش حجم نمونه در نظر گرفته شده‌اند. براساس نتایج حاصل، مقادیر زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی زهکشی‌شده‌ی مصالح به ترتیب مقادیر ۳۰/۳۷ درجه و ۲ کیلوپاسکال و همچنین مطابق روابط ۴ و ۵، شیب خط حالت بحرانی کششی (M_t) و فشاری (M_p) به ترتیب ۰/۸۵ و ۱/۲۱۶ بوده‌اند.



شکل ۷. منحنی‌های حاصل از نتایج گراهام و همکاران (۱۹۸۳).^[۱۲]

در حدود 0.25 Kj/m^3 بوده است، که این محدوده‌ی انرژی برای بیشتر مسیرها می‌تواند به‌عنوان شاخصی در جهت شناسایی مناسب‌تر سطح تسلیم مدنظر قرار گیرد.

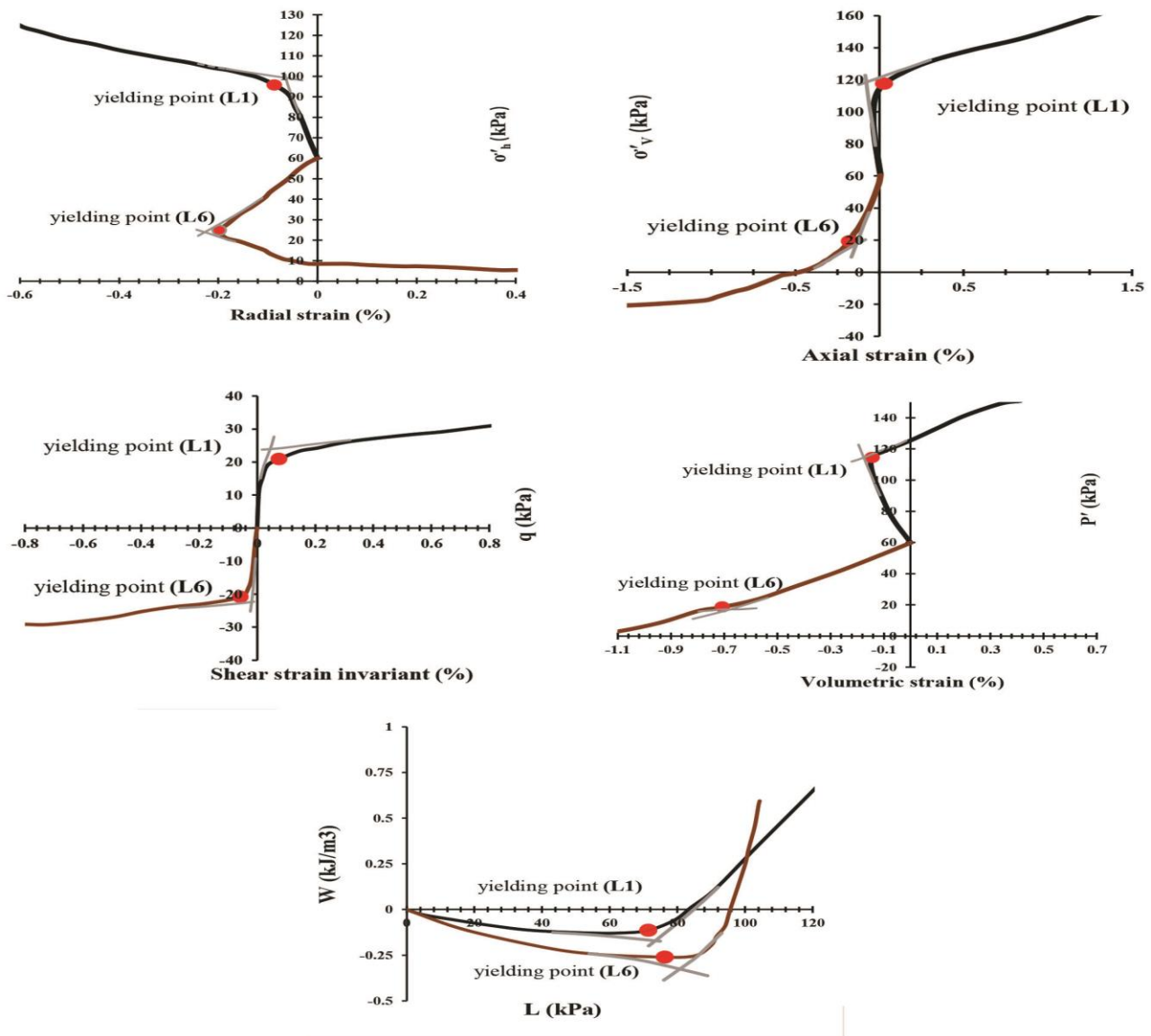
یکی از نکته‌های قابل‌تأمل برای مواد زائد آزمایش‌شده این است که در نمودار شکل ۹ انتظار می‌رود با ادامه‌ی بارگذاری بعد از نقطه‌ی تسلیم، با افزایش سرعت توسعه‌ی کرنش‌های خمیری، تغییرات غیرخطی نمودارها مشاهده شود؛ اما مطابق نتایج ملاحظه می‌شود که تا مدتی بعد از نقطه‌ی تسلیم، همچنان نمودار حالت خطی خود را حفظ کرده است. چنین رفتاری در مطالعات یوسفوکا^{۱۴} و همکاران (۱۹۹۱)، که شامل مجموعه آزمایش‌های مسیر تنش بر روی نمونه‌های رس طبیعی بوده است، مشاهده شده است، که نویسندگان چنین پدیده‌ای را به سمناسیون مصالح رسی درجا نسبت داده‌اند.^[۱۳] درخصوص مواد زائد نیز با توجه به ترکیب‌های شیمیایی و مواد مصرفی موجود در فرایند فراوری، ممکن است پدیده‌ای مشابه سمناسیون البته با سرعت فرایندی سریع‌تر به وقوع بپیوندد، ولی اظهارنظر قطعی در این خصوص نیازمند مطالعات بیشتری است.

در شکل ۱۰، بردار جریان خمیری در محل نقطه‌ی تسلیم هر یک از مسیرها مشاهده می‌شود. یکی از نکات قابل توجه در نمودار مذکور، غیرعمودی بودن

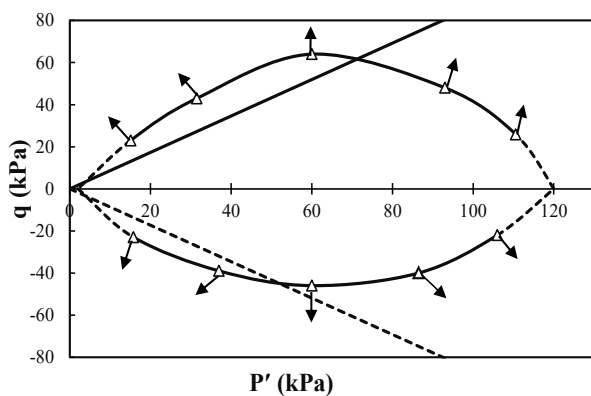
خطای ذهنی موجود در شناسایی تنش تسلیم به‌ویژه در بعضی مسیرها از معایب اصلی روش دوخطی است.^[۱۳، ۳۲ و ۳۳] همین امر باعث شده است تا پژوهشگران دیگری سعی کنند روش‌های جایگزینی نظیر استفاده از سرعت موج برشی در حین بارگذاری را برای شناسایی سطح تسلیم بررسی کنند.^[۱۵]

در پژوهش حاضر، برای مواد زائد مطالعه‌شده، نمودارهای σ_1 ، σ_3 ، ϵ_1 ، ϵ_3 ، $\dot{p}$ ، $\dot{q}$ ، ϵ_s و $L:W$ در مسیرهای بارگذاری L_1 و L_6 در شکل ۸ مشاهده می‌شود. با کمک روش دوخطی، تنش مؤثر میانگین تسلیم در هر یک از نمودارهای شکل ۸ تعیین شده است، سپس برای تمامی مسیرهای دیگر نیز به همین شیوه مقادیر تنش مؤثر میانگین تسلیم در کلیه‌ی نمودارهای مذکور تعیین شده است. این تذکر لازم است که در نمودارهای شکل ۸، متوسط تنش مؤثر میانگین در هر مسیر به‌عنوان تنش مؤثر میانگین نمونه در لحظه‌ی تسلیم در نظر گرفته شده است. مقدار تنش تفاضلی متناظر با تنش مؤثر میانگین مذکور، از داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده است. حال با داشتن زوج مقادیر حاصل در هر مسیر تنش، موقعیت سطح تسلیم در فضای $p' - q$ تعیین می‌شود.

در شکل ۹، تغییرات کار توسعه‌یافته در مقابل طول بردار تنش (مطابق روابط ۶ و ۷) و موقعیت نقطه‌ی تسلیم در هر یک از مسیرها مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقادیر کار توسعه‌یافته برای همه‌ی مسیرها به جز L_1 نقاط تسلیم

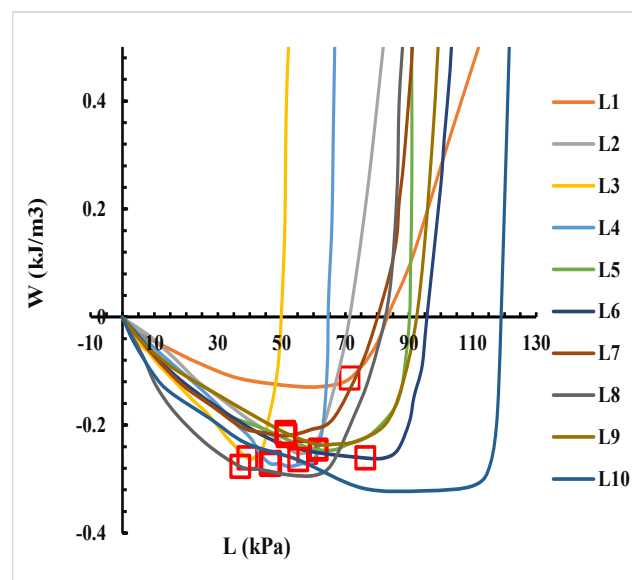


شکل ۸. منحنی‌های حاصل از نتایج مسیرهای L_1 و L_6 .

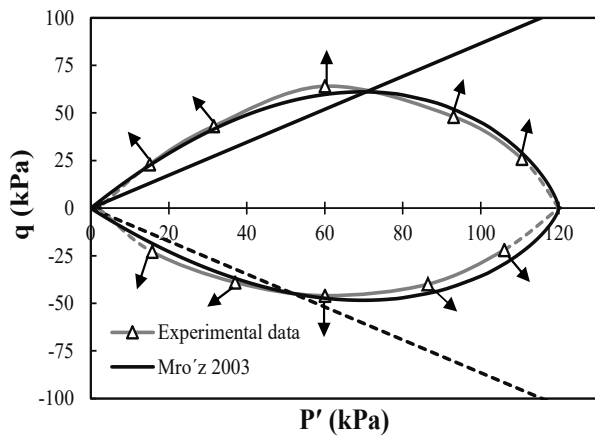


شکل ۱۰. بردار یک‌ه‌ی جریان خمیری در محل نقطه‌ی تسلیم هر یک از مسیرها.

بردارهای مذکور بر سطح تسلیم است. هر چند قضاوت قطعی درخصوص وابسته یا غیروابسته بودن قانون جریان، نیازمند آزمون‌های بیشتر با تنش‌های بیش تحکیمی متعددی است، اما نتایج آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد قانون جریان برای این شرایط بارگذاری غیروابسته است.



شکل ۹. تغییرات کار توسعه یافته در مقابل طول بردار تنش و موقعیت نقطه‌ی تسلیم.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی سطح تسلیم آزمایشگاهی با سطح تسلیم پیشنهادی مدل امروژ.

اشباع، و با تراکم ضعیف پیشنهاد شده است، لذا انطباق مناسب بین سطح تسلیم آزمایشگاهی و سطح تسلیم مدل مذکور در شرایط بارگذاری اشاره‌شده معقول است. در مسیر تنش L_{10} ، بیشینه‌ی ۵٪ اختلاف بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. البته قضاوت قطعی درخصوص دقت مدل برای پیش‌بینی سطح تسلیم مواد زائد معدنی سونگون نیازمند انجام مطالعات آزمایشگاهی مشابهی در سطوح تنش متفاوت و نسبت‌های بیش‌تحکیمی متعددی است. با این حال، با توجه به اینکه مدل رفتاری ذکرشده برای پیش‌بینی پدیده‌ی روانگرایی استاتیکی در مصالح دانه‌ای شل ارائه شده است، در صورت اینکه مدل رفتاری ذکرشده‌ی غیروابسته قابلیت پیش‌بینی مناسبی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی داشته باشد، آنگاه ارزیابی پدیده‌ی روانگرایی استاتیکی مواد زائد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های ناپایدارکننده در سد باطله‌ی سونگون با کمک مدل رفتاری اخیر میسر خواهد بود.

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، آزمون‌های سه‌محوری مسیر تنش فشاری و کششی برای شناسایی سطح تسلیم مواد زائد معدنی اشباع خروچی از کارخانه‌ی فراوری معدن مس سونگون در شرایط تنش اولیه‌ی همسان و با نسبت بیش‌تحکیمی سبک ($OCR=2$) انجام شده است. جهت حصول هدف اخیر، به کمک دستگاه سه‌محوری تمام اتوماتیک، آزمون‌های سه‌محوری زهکشی‌شده در شرایط تنش کنترل در مسیرهای شعاعی انجام و سپس با روش تقریب دو خط، تنش تسلیم در هر یک از مسیرها شناسایی و در ادامه، سطح تسلیم مصالح مذکور در فضای تنشی مؤثر $q:p$ ترسیم شده است.

محاسبه‌ی کار توسعه‌یافته برای هر مسیر تنش نشان می‌دهد که در بیشتر مسیرها به جز L_1 در انرژی کار حدود ۰/۲۵ کیلوژول بر مترمکعب، نمونه‌ها به شرایط تسلیم رسیده و ترسیم بردارهای جریان نشان داده است که سطح تسلیم حاصل، از قانون جریان غیروابسته تبعیت می‌کند.

مشاهده‌ی روند خطی تغییرات تغییرشکل مصالح آزمایش‌شده بعد از نقطه‌ی تسلیم، حکایت از نوعی سمانتاسیون سریع در مصالح مذکور دارد. با وجود مواد شیمیایی استفاده‌شده در فرایند فراوری و موجود در آب، رخداد چنین پدیده‌ای ممکن خواهد بود.

۲.۳. مقایسه‌ی سطح تسلیم حاصل از نتایج آزمایشگاهی با سطح

تسلیم حاصل از مدل‌های رفتاری موجود

همان‌طور که پیش‌تر بیان شده است، هدف اصلی از شناسایی سطوح تسلیم مصالح، درنهایت، تعیین مدل رفتاری مناسب است. استخراج معادله‌ی سطح تسلیمی که بتواند بخوبی رفتار مواد زائد معدنی را شبیه‌سازی کند، نیازمند آزمون‌های مختلف با تنش‌های بیش‌تحکیمی متفاوت است. با وجود این، در پژوهش حاضر به جهت ارائه‌ی طرحی اولیه، سطح تسلیم آزمایشگاهی حاصل با سطح تسلیم یک مدل رفتاری در شرایط تنش مشابه مقایسه شده است.

امروژ^{۱۵} و همکاران (۲۰۰۳)، فرمول‌بندی سه‌بعدی از یک مدل رفتاری با قانون جریان غیروابسته را برای مصالح دانه‌ای شل و اشباع تحت بارگذاری مونوتونیک ارائه داده و آن را برای شبیه‌سازی پدیده‌ی روانگرایی استاتیکی در مصالح ذکرشده پیشنهاد کرده‌اند.^[۳۴]

رابطه‌ی منحنی تسلیم مدل مذکور در شرایط بارگذاری سه‌محوری فشاری و در شرایط بارگذاری سه‌محوری کششی به‌ترتیب به صورت روابط ۸ و ۹ بیان می‌شود:

$$F = q^2 - L^2 p'^2 \left[\frac{1+s}{s} \left(1 - \frac{p'}{p'_F} \right) \right]^{2s} = 0 \quad (8)$$

$$F = q^2 - \left(\frac{3L}{3+tM} \right)^2 p'^2 \left[\frac{1+s}{s} \left(1 - \frac{p'}{p'_F} \right) \right]^{2s} = 0 \quad (9)$$

که در آن‌ها، M شیب خط حالت بحرانی در شرایط بارگذاری سه‌محوری فشاری در فضای $q:p'$ ، L معادل با نسبت q به p' در بالاترین نقطه‌ی منحنی تسلیم، و s ثابتی بدون بُعد بین ۰ و ۱ است، که تحدب و تقعر منحنی تسلیم را کنترل می‌کند. همچنین t ثابت مصالح است و باید با این شرط که t^*M کوچک‌تر یا مساوی ۳ باشد، تعیین شود. p'_F محل تقاطع منحنی تسلیم با محور p' است. این کمیت، بزرگی منحنی تسلیم را نشان می‌دهد و معادل با همان بیشینه‌ی تنش میانگین ایزوتروپیک است، که نمونه‌ی تحت آن تنش میانگین ایزوتروپیک تحکیم شده است. باید توجه کرد که قانون جریان این مدل از نوع غیروابسته است.

پارامتر M یا شیب خط حالت بحرانی در شرایط بارگذاری محوری فشاری با کمک رابطه‌ی ۴ از نتایج آزمون‌های سه‌محوری کنترل کرنش معادل با ۱/۲۱۶ استخراج شده است. p'_F و p' معادل با ۱۲۰ کیلوپاسکال است. مقدار L برای سطح تسلیم حاصل، معادل با نسبت q به p' در نقطه‌ی تسلیم مسیر L_2 معادل با ۱/۰۶۷ بوده و مقادیر s و t در شرایط بیشینه‌ی تطابق مدل رفتاری امروژ به ترتیب معادل با ۰/۷ و ۱/۲۵ به دست آمده است. در شکل ۱۱، مقایسه‌ی سطح تسلیم آزمایشگاهی با سطح تسلیم پیشنهادی مدل امروژ مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۱۱، مقایسه‌ی سطح تسلیم پیشنهادی مدل رفتاری امروژ با سطح تسلیم آزمایشگاهی حکایت از دقت مناسب مدل امروژ در پیش‌بینی نقاط تسلیم مواد زائد معدنی مورد مطالعه دارد. مواد زائد مطالعه‌شده، تراکم نسبی پایین، غیرخمیری، و ماسه‌ی حدود ۲۵٪ دارند و سطح تسلیم آزمایشگاهی آن‌ها نیز در شرایط تنش آزمایش‌شده غیروابسته است. مدل رفتاری امروژ نیز یک مدل رفتاری با قانون جریان غیروابسته بوده است، که برای مصالح دانه‌ای،

	رطوبت اولیه (درصد)	w_i
	شیب خط حالت بحرانی در آزمایش‌های سه‌محوری فشاری	M_p
	شیب خط حالت بحرانی در آزمایش‌های سه‌محوری کششی	M_t
	طول بردار تنش	L
	تغییرات کار توسعه‌یافته	W
	نسبت تنش‌های اصلی	k
علائم یونانی	تنش‌های اصلی (kPa)	σ_1 σ_2 σ_3
	کرنش حجمی	ϵ_v
	کرنش محوری	ϵ_l
	کرنش جانبی	ϵ_r
	تنش همه‌جانبه‌ی خالص (kPa)	σ_{3n}
	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (درجه)	ϕ'
	نسبت تنش‌های برشی	η
	مقاومت برشی (kPa)	τ

باید توجه کرد که سطح تسلیم مدل رفتاریِ امرز، که قانون جریان غیروابسته دارد، با دقت مناسبی با سطح تسلیم آزمایشگاهی مواد زائد در شرایط تنشی مذکور تطابق دارد.

با توجه به قابلیت مدل رفتاریِ امرز در پیش‌بینی پدیده‌ی روانگرایی استاتیکی مصالح دانه‌ای اشباع، در صورت مطالعه‌ی آزمایشگاهی جهت راستی‌آزمایی دقت مدل رفتاری ذکرشده، امکان استفاده از آن در ارزیابی روانگرایی استاتیکی مواد زائد سد سونگون با دقت مناسبی وجود دارد.

"فهرست علائم"

علائم انگلیسی	چسبندگی، kPa	c
	چگالی ویژه‌ی خاک	G_s
	حد روانی (درصد)	LL
	تنش مؤثر میانگین (kPa)	$\bar{p}$
	نشان خمیری (درصد)	PI
	حد خمیری (درصد)	PL
	تنش خالص میانگین (kPa)	p_n
	تنش تفاضلی (kPa)	q
	درجه‌ی اشباع	S_r

References - منابع

1. Amezaga, J., Baresel, C., Destouni, G., Göbel, J., Gren, I.-M., Hannerz, F., Larsén, L., Loredó, J., Malmström, M. & Nuttall, C. 2004. Mining impacts on the fresh water environment: technical and managerial guidelines for catchment-focused remediation. *Mine water and the environment*, 23, 1-80.
2. Wieland, M. & Fan, B. H. The activities of the international commission on large dams (ICOLD) in the earthquake safety of large dams. Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, 2004.
3. Bhanbhro, R., Auchar Zardari, M., Ahmed Memon, B., Ali Soomro, M., Edeskär, T. & Knutsson, S. 2021. Mechanical properties and particle breakage of uniform-sized tailings material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33, 04020481. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003597](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003597)
4. Essayad, K. & Aubertin, M. 2021. Consolidation of hard rock tailings under positive and negative pore-water pressures: testing procedures and experimental results. *Canadian Geotechnical Journal*, 58, 49-65. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0594>
5. Ma, C., Li, R., Zhang, C., Guo, X. & Li, X. 2023. A study on compressibility and permeability of tailings with different particle sizes under high pressure. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, 106. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03117-3>
6. Baradaran, M. S., Qazanfari, R. & Baradaran, S. 2023. Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials research express*, 10, 055202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af/meta>
7. Wagner, A. C., de Sousa Silva, J. P., de Azambuja Carvalho, J. V., Rissoli, A. L. C., Cacciari, P. P., Chaves, H. M., Scheuermann Filho, H. C. & Consoli, V. 2021. Effect of the type of soil reinforcement on the consolidation of hard rock tailings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 111, 105007. <https://doi.org/10.1016/j.tenge.2021.105007>

- N. C. 2023. Mechanical behavior of iron ore tailings under standard compression and extension triaxial stress paths. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, 1883-1894. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.11.013>
8. Mmbando, E., Fourie, A. & Reid, D. 2023. Mechanics of an iron ore tailings exhibiting transitional behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, 2211-2220. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02379-8>
9. Carneiro, J. J. V., Faria, A. d. O. & Júnior, M. P. d. S. 2023. Calibration of Modified Cam-Clay Parameters for Red Mud Tailings: A Case Study.
10. Halliday, A., Vulpe, C., Fourie, A. & Arenas, A. Limitations of Classic Constitutive Soil Models and Their Suitability to Represent Tailings Behaviour. International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2022. Springer, 102-109. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12851-6_13
11. Mánica, M. A., Arroyo, M., Gens, A. & Monforte, L. 2022. Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 175, 151-165. <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00001>
12. Graham, J., Noonan, M. & Lew, K. 1983. Yield states and stress-strain relationships in a natural plastic clay. *Canadian geotechnical journal*, 20, 502-516. <https://doi.org/10.1139/t83-058>
13. Yasufuku, N., Murata, H. & Hyodo, M. 1991. Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses. *Soils and Foundations*, 31, 95-109. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.31.95>
14. Kuwano, R. & Jardine, R. J. 2007. A triaxial investigation of kinematic yielding in sand. *Géotechnique*, 57, 563-579. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.7.563>
15. Cho, W. & Finno, R. J. 2010. Stress-strain responses of block samples of compressible Chicago glacial clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 178-188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000186)
16. Al-Sharrad, M., Gallipoli, D. & Wheeler, S. 2017. Experimental investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils. *Géotechnique*, 67, 1033-1049. <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.4.655>
17. Witowski, M., Zabielska-Adamska, K. & Łukasik, S. 2023. Stress-strain responses of calcium fly ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149, 04023108. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-9968>
18. Ahmadi, A. & Bazaz, J. B. 2023. A new analytical model to predict the effect of suction removal on vacuum preloading of fine copper tailings. *Engineering Geology*, 322, 107176.
19. Ahmadi, A. & Bazaz, J. B. 2024. A comprehensive study on the effects of initial water content, suction magnitude, and drainage zone size on self-weight consolidation and vacuum preloading of soft soils and slurried mine tailings. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107176>
20. Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M. & Maleki, A. 2024. Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case studies in construction materials*, 20, e02740. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740>
21. Been, K., Jefferies, M. & Hachey, J. 1992. Discussion: The critical state of sands. *Géotechnique*, 42, 655-663. <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.4.655>
22. Daliri, F., Simms, P. & Sivathayalan, S. 2015. Discussion of "Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings" by F. Schnaid, J. Bedin, AJP Viana da Fonseca, and L. de Moura Costa Filho. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 07015023. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001328](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001328)
23. Høeg, K., Dyvik, R. & Sandbækken, G. 2000. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126, 606-617. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:7\(606\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:7(606))
24. Murthy, T., Loukidis, D., Carraro, J., Prezzi, M. & Salgado, R. 2007. Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, 57, 273-288. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.3.273>
25. Chang, N., Heymann, G. & Clayton, C. 2011. The effect of fabric on the behaviour of gold tailings. *Géotechnique*, 61, 187-197. <https://doi.org/10.1680/geot.9.p.066>
26. Reid, D. & Fanni, R. 2022. A comparison of intact and reconstituted samples of a silt tailings. *Géotechnique*, 72, 176-188. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.020>
27. Ladd, R. 1978. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*, 1, 16-23.
28. Head, K. H. 1998. *Manual of soil laboratory testing. Volume 3: effective stress tests.. ed. 2.*
29. Lade, P. V. 2016. *Triaxial testing of soils*, John Wiley & Sons.
30. Butterfield, R. 1979. A natural compression law for soils (an advance on $e-\log p'$). *Géotechnique*, 29, 469-480. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.469>
31. Casagrande, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech., 1936. 3-60.

32. Graham, J., Pinkney, R., Lew, K. & Trainor, P. 1982. Curve-fitting and laboratory data. *Canadian Geotechnical Journal*, 19, 201-205. <https://doi.org/10.1139/t82-023>
33. Roscoe, K. H. & Burland, J. B. 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay.
34. Mróz, Z., Boukpeti, N. & Drescher, A. 2003. Constitutive model for static liquefaction. *International Journal of Geomechanics*, 3, 133-144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2003\)3:2\(133\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2003)3:2(133))



Research Article

Analysis of Plane Multi-Span Frames with the Analytical Method of Force-Displacement Combination

Amirhosein Bahreini, Ali Asgari*, Alireza Khabiri and Reza Taghipour

Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran.

* corresponding author: (a.asgari@umz.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 8 April 2024

Revised: 14 June 2024

Accepted: 19 June 2024

Keywords:

Plane frames,
indeterminate structures,
mixed force-displacement
method,
Euler–Bernoulli beam
equation, analytical method.

Abstract

This paper investigates the effectiveness of the mixed forced-displacement method for solving indeterminate plane frames that combine force and displacement relations based on the beam's axial and bending deformation behavior simultaneously. In this method, the differential equations of all structural members are determined based on the general theory of the Bernoulli beam by considering the axial effects. In the following, with the help of an analytical solution and application of boundary conditions, the integral constants of the equations related to the uniaxial frames of the structure are obtained. For the effectiveness of the proposed method, three examples of common frames have been analyzed and validated with the finite element method. The results show that the answers determined by the two methods are completely consistent. One of the advantages of the combined displacement-force method is determining the parametric solution as well as the high accuracy of this method. In addition, it does not need post-processing to find the quantity of kinematic and static responses. Therefore, this method can be used as an alternative approach to the finite element method in solving multi-axial plane frames. Moreover, its capability to handle intricate loading and various boundary condition configurations highlights the method's efficiency. Furthermore, the method simplifies the simultaneous influences of material and geometric nonlinearities in the analysis process. Material nonlinearities, such as yielding and hardening, are accommodated by adjusting the stiffness matrix. In contrast, geometric nonlinearities arising from significant displacements are addressed through iterative updates of the displacement field until convergence is achieved. In summary, the mixed displacement-force method is a comprehensive and efficient tool for 2D frame analysis. The ability to provide accurate results without the need for complex numerical simulations increases the importance of this method in the range of structural analysis techniques. Future research efforts could examine developing the process to three-dimensional frames and investigating its application in the performance-based design and analysis areas.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing

financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

First name and Last name of First Author: Amirhosein Bahreini

First name and Last name of Second Author: Ali Asgari

To Cite this article:

Bahreini, A.H., Asgari, A., Khabiri, A.R. and Taghipour, R. 2025. Analysis of plane multi-span frames with the analytical method of force-displacement combination, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 13-27.
<https://doi.org/10.24200/30.2024.64303.3318>



تحلیل قاب‌های صفحه‌ای دوبعدی با روش تحلیلی ترکیب نیرو-جابجایی

امیرحسین بحرینی، علی عسگری^{*}، علیرضا خبیری و رضا تقی‌پور

دانشکده‌ی مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، مازندران.

^{*}نویسنده مسئول (a.asgari@umz.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی کارایی یک روش پیشنهادی برای حل قاب‌های صفحه‌ای نامعین پرداخته شده است، که از ترکیب روابط نیرو و جابجایی براساس رفتار تغییرشکل محوری و خمشی تیر به طور هم‌زمان بهره می‌برد. در روش پیشنهادی، ابتدا معادله‌های دیفرانسیلی اعضاء سازه‌ای براساس تئوری کلی تیر اویلر-برنولی با در نظر گرفتن آثار محوری تعیین شده و سپس با کمک حل تحلیلی و اعمال شرایط مرزی، ثابت‌های انتگرالی معادله‌های مرتبط با قاب‌ها به دست آمده‌اند. برای میزان کارایی روش پیشنهادی، سه مثال از قاب‌های صفحه‌ای متداول تحلیل و با کمک روش اجزاء محدود اعتبارسنجی انجام شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که پاسخ‌های تعیین شده از دو روش مذکور، تطابق خوبی دارند. از مزیت‌های روش ترکیبی نیرو-جابجایی، تعیین حل پارامتریک و همچنین قابلیت دستیابی به پاسخ‌ها در هر نقطه‌ی دلخواه از سازه با دقت بالاست. علاوه بر آن، برای یافتن کمیت پاسخ سینماتیکی و استاتیکی نیازی به پس‌پردازش ندارد. لذا روش ترکیبی نیرو-جابجایی می‌تواند به عنوان یک رویکرد جایگزینی برای روش‌های رایج در حل قاب‌های صفحه‌ای چندمحوری استفاده شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

واژگان کلیدی:

قاب‌های صفحه‌ای،

سازه‌های نامعین،

روش ترکیبی نیرو-جابجایی،

معادله‌های تیر اویلر-برنولی،

روش تحلیلی.

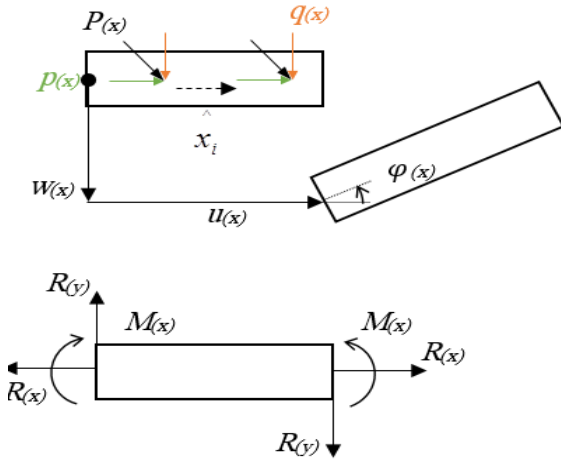
۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل تحلیل سازه‌ها، یافتن روش تحلیلی دقیق قاب‌های صفحه‌ای نامعین است. استفاده از رویکرد معادله‌های دیفرانسیل می‌تواند به عنوان یک ابزار کلی برای حل قاب‌های صفحه‌ای در نظر گرفته شود. تعمیم روش‌های مبتنی بر معادله‌های دیفرانسیل برای قاب‌های چندمحوری موضوعی حائز اهمیت است. بعضی معادله‌های حاکم بر سازه، تکنیکی دارند؛ که حل آن‌ها با رویکرد تک‌محوری حل‌شدنی نیست. نوشتارهای: مکالی^۱ (۱۹۱۹)، برونگرابر^۲ (۱۹۶۵)، کار فالسون^۳ (۲۰۰۲) و برخی دیگر از پژوهشگران،^۴ استفاده از رویکردهای ترکیبی را توصیه کرده‌اند.

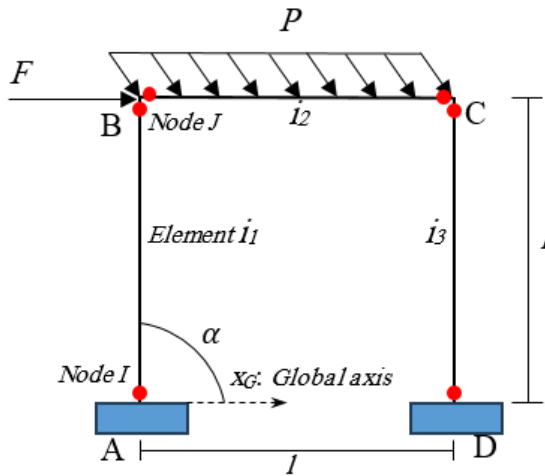
به منظور یافتن پاسخ‌های معادله‌های ذکر شده، تلاش‌های بسیاری صورت پذیرفته است. پژوهشگران با استفاده از روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی، و عددی به حل آن‌ها پرداخته‌اند، اما یافتن یک روش دقیق و ساده که بتواند تمامی مسائل را پوشش دهد، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های عددی، مانند اجزاء محدود، کانی، شیب‌افت، و غیره باشد.^{۱۵} کارهای انجام‌شده در این زمینه بسیار گسترده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب پرتال،^{۱۶} پیش‌بینی

تغییرشکل قاب‌های ساده‌ی بتنی با استفاده از یک رویکرد غیرمستقیم،^{۱۷} تحلیل غیرخطی قاب‌های ساده با تعامل بین تغییرشکل‌های برشی و خمشی،^{۱۸} محاسبه‌ی تغییرمکان سازه تحت اثر پیچش با فرض رفتار غیرخطی سازه،^{۱۹} طراحی دال‌های دوطرفه و بهینه‌سازی آن با استفاده از معادله‌های ریاضی،^{۲۰} تحلیل و طراحی قاب‌های فولادی،^{۲۱} تحلیل دینامیکی سازه با استفاده از رویکردهای انتگرال‌گیری عددی،^{۲۲} تحلیل سازه‌های بتنی با استفاده از روش نیرو و جابجایی،^{۲۳} شبیه‌سازی پاسخ سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه با استفاده از روابط ترکیب نیرو-جابجایی،^{۲۴} و برخی طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از روش نیرو-جابجایی،^{۲۶} تحلیل قاب‌های دوگانه به روش کانی،^{۲۷} تحلیل ارتعاش خطوط لوله با استفاده از روش تبدیل دیفرانسیل به عنوان یک روش نیمه‌تحلیلی،^{۲۸} تحلیل عددی و مطالعه‌ی پارامتریک بر قاب‌های چنددرجه‌ی آزادی،^{۲۹} حل قاب‌های پیچیده،^{۳۰} روش جابجایی اجزاء محدود برای قاب‌ها،^{۳۱} روش جابجایی از کارنوسکی^۴ و همکاران (۲۰۲۱)^{۳۲} و تونیولو و تونیولو^{۳۳}، تحلیل المان تیر قاب‌های کشسان‌خمیری برای یک جابجایی بزرگ،^{۳۴} روش‌های تغییرشکل و المان برای قاب‌ها،^{۳۵} تحلیل

⁴ Karnovsky⁵ Toniolo¹ Macaulay² Brungaber³ Falsone



شکل ۱. درجه‌های آزادی و محور مختصات محلی.



شکل ۲. قاب ساده‌ی یک دهانه با ۲ المان تحت نیروی گسترده و متمرکز جانبی.

برای اعضاء تیر- ستون به صورت افقی یا عضو ستون به صورت قائم، معادله‌های تغییرشکل به صورت روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند: [۱۵]

$$u_i = -\frac{1}{(EA)_i} p_{(x_i)}^{(2)} + c_{i,1} \hat{x}_i + c_{i,2} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{1}{(EI)_i} q_{(x_i)}^{(4)} + c_{i,3} \frac{\hat{x}_i^3}{6} + c_{i,4} \frac{\hat{x}_i^2}{2} + c_{i,5} \hat{x}_i + c_{i,6} \quad (2)$$

که در آن‌ها، E مدول کشسانی، A مساحت سطح مقطع، I ممان دوم سطح، i شماره‌ی المان، p شدت بار محوری وارد بر المان، q شدت بار قائم وارده بر المان، و c_i ها ثابت‌های انتگرالی یا مجهول‌های مسئله هستند. شایان ذکر است که در روابط ۱ و ۲ روابط بعد، از علائم $p_{(x_i)}^{(2)}$ و $q_{(x_i)}^{(4)}$ و از علائم

اختصاصی برای انتگرال‌گیری استفاده شده است. $p_{(x_i)}^{(2)}$ به معنای $\iint p_{x_i} dx$

و $q_{(x_i)}^{(4)}$ به معنای $\iiint q_{x_i} dx$ است. حال به منظور اعمال شرایط مرزی

لازم است که معادله‌ها برای هر یک از دو گره‌ی ابتدایی و انتهایی المان بسط داده شوند، که معادلات اخیر به این صورت درمی‌آیند.

قاب‌های غیرخطی با استفاده از روش نیرو، [۳۶ و ۳۷] روش نیرویی توسعه‌یافته برای تحلیل سازه‌های دارای پیش‌تنیدگی استاتیکی و سینماتیکی نامعین پایدار، [۳۸] روش ماتریس انتقال برای قاب‌های دیوار برشی، [۳۹] طراحی لرزه‌ای به روش ترکیبی نیرو- جابجایی برای قاب‌های فولادی، [۴۰] از جمله مواردی است که در راستای تحلیل و طراحی تیرها و تعمیم آن برای قاب‌های صفحه‌ای صورت پذیرفته است.

روش‌های مرسوم معمولاً فقط یکی از روش‌های جابجایی و یا نیرویی را به کار می‌گیرند. تحلیل با روش‌های مبتنی بر سختی با افزایش نامعینی سازه‌ها به روش‌های نرمی ترجیح داده می‌شود، شایان ذکر است که روش‌های نیرویی برای سازه‌ها با درجه‌ی نامعینی، کمتر کاربردی هستند. ترکیب روش‌های مبتنی بر نیرو- جابجایی می‌تواند محدودیت هر یک از روش‌های مستقل نیرویی یا جابجایی را مرتفع کند. در روش ترکیبی نیرو- جابجایی، مدل‌سازی معادله‌های حاکم (خمشی و محوری) هر عضو صورت پذیرفته و پس از تحلیل اولیه، ۶ مجهول به صورت ثابت‌های انتگرال ظاهر شده‌اند. به طور کلی، برای تعیین ۶ ثابت انتگرالی باید شرایط مرزی متناظر با هر یک از المان‌ها اعمال شود. از نظر مزایای محاسباتی در روش پیشنهادی می‌توان گفت که در نهایت باید معادله‌ی ماتریسی حل شود تا به مجهول‌های مسئله رسید و محاسبات پیچیده‌ای در کار نیست؛ اما در مورد معایب محاسباتی روش مذکور می‌توان گفت که هر چه سازه بزرگ‌تر باشد، ماتریس نهایی به نسبت بزرگ می‌شود و فقط زمان و حجم محاسبات بالا می‌رود. این تذکر لازم است که این مورد در روش‌های دیگر نیز صادق است.

در مقایسه با روش پیشنهادی، آنالیز ماتریسی متداول برای تحلیل سازه‌ها فقط با استفاده از یک ماتریس سختی و یا نرمی استفاده می‌کند و می‌تواند برای سازه‌های ساده‌تر مناسب باشد؛ اما روش ترکیبی نیرو- جابجایی به صورت خاص برای تحلیل سازه‌های پیچیده‌تر و نامعین استفاده می‌شود و از ترکیب دو روش سختی و نرمی استفاده می‌کند. در مورد حجم و سرعت، آنالیز ماتریسی معمولاً کمتر و سریع‌تر است، اما دقت آن ممکن است در برخی موارد محدود باشد؛ در حالی که حجم محاسبه‌های روش ترکیبی نیرو- جابجایی بیشتر است، اما دقیق است و می‌تواند نتایج بهتری برای سازه‌های پیچیده ارائه دهد. از طرفی دیگر، اعمال شرایط مرزی بر معادله‌های حاکم در روش پیشنهادی در مقایسه با تحلیل ماتریسی ساده‌تر است. به طور کلی، انتخاب بین دو روش اخیر به نوع سازه، درجه‌ی نامعینی آن، دقت مورد نیاز و منابع محاسباتی در دسترس بستگی دارد.

هدف از پژوهش حاضر، توسعه‌ی رویکرد معادله‌های دیفرانسیل در مورد قاب‌های چندمحوری است. در نوشتار حاضر، ابتدا به روابط روش نیرو- جابجایی پرداخته و سپس سه قاب استاتیکی با افزایش تدریجی تعداد اعضا و دهانه‌ها برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده‌اند. به منظور اعتبارسنجی روش نیرو- جابجایی، قاب‌ها به کمک روش اجزاء محدود، تحلیل و پاسخ‌ها با روش پیشنهادی نیرو- جابجایی مقایسه شده‌اند. در پایان، به نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته شده است.

۲. روش ترکیب نیرو- جابجایی

برای هر عضو از سازه، ابتدا مختصات محلی و درجه‌های آزادی مطابق شکل ۱ معرفی شده است. [۱۵]

شکل ۲ را در نظر بگیرید:

معادله‌های تغییرشکل‌ها و نیرویی را می‌توان به صورت گروه‌های ماتریسی نوشت. شایان ذکر است که در ماتریس‌های ۱۵ الی ۱۸، $K=I, J$ ، شماره‌ی گروه‌هاست.

$$\hat{u}_i^{(K)} = A_i^{(K)} \hat{c}_i^{(K)} - a_i^{(K)} \quad (15)$$

$$\hat{r}_i^{(K)} = B_i^{(K)} \hat{c}_i^{(K)} - b_i^{(K)} \quad (16)$$

$$\hat{u}_i^{(K)} = [u_i^{(K)} \quad w_i^{(K)} \quad \phi_i^{(K)}]^T \quad (17)$$

$$\hat{r}_i^{(K)} = [R_{x_i}^{(K)} \quad R_{y_i}^{(K)} \quad M_i^{(K)}]^T \quad (18)$$

نکته‌ی دیگر در معادله‌های ماتریسی اخیر علامت $(\hat{\cdot})^{(K)}$ است، که نشانگر محلی^۱ بودن معادله‌های هر المان است. همچنین $\hat{u}_i$ و $\hat{r}_i$ به ترتیب

معادله‌های تغییرشکل‌ها و واکنش‌های نیرویی تکیه‌گاهی را ارائه می‌کنند. C_i ها همان مجهول‌های موجود در معادله‌ی تغییرشکل هستند، که از انتگرال‌گیری به وجود آمده‌اند و تعداد آن‌ها برای هر المان، ۶ ثابت انتگرالی است، ولی تعداد مجهول‌های کلی برای المان‌ها ۱۲ ثابت انتگرالی است، یعنی هر گروه، ۶ ثابت

دارد، که همان تغییرشکل و واکنش‌ها هستند. ضرایب A_i یا C_i ثابت‌های

انتگرالی در معادله‌های تغییرشکل و B_i ضرایب C_i یا ثابت‌های انتگرالی در معادله‌های واکنش‌ها هستند، که مقدار آن‌ها به صورت روابط ۱۹ الی ۲۲ تعریف می‌شود.

$$A_i^{(I)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$A_i^{(J)} = \begin{bmatrix} l_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l_i^3}{6} & \frac{l_i^2}{2} & l_i & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{l_i^2}{2} & -l_i & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B_i^{(I)} = \begin{bmatrix} -(EA)_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (EI)_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (EI)_i & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_i^{(J)} = \begin{bmatrix} (EA)_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(EI)_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(EI)_i l_i & -(EI)_i & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

در حالت کلی، A_i تابعی از طول المان‌ها و عدد، و B_i تابعی از سختی محوری، سختی خمشی، طول، و عدد هستند. a_i و b_i بستگی به بارهای خارجی وارد بر المان دارند (روابط ۲۳ الی ۲۶):

$$P \times \cos \theta = p$$

$$P \times \sin \theta = q$$

لازم است قبل از این کار به منظور تفکیک بارهای گسترده‌ی محوری و قائم از یکدیگر، شدت بار گسترده‌ی اعمال شده بر روی المان (P) را به دو بار p که شدت بار محوری و q (رو به پایین مثبت)، که شدت بار قائم هستند، تجزیه کرد. همچنین زاویه‌ی بار با محور عضو (θ) از سمت چپ به صورت ساعت‌گرد مثبت در نظر گرفته شود.

نکته‌ی دیگری که باید در نظر گرفته شود، این است که برای به دست آوردن تغییرشکل‌های قاب به سه مجهول تغییرشکل و سه مجهول واکنش تکیه‌گاهی در هر گروه نیاز است. برای گروه‌های I و J، معادله‌های مسئله به صورت روابط ۳ الی ۱۴ هستند:

$$u_i^{(I)} = u_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)} = -\frac{1}{(EA)_i} p_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)}^{(2)} + c_{i,2} \quad (3)$$

$$w_i^{(I)} = w_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)} = \frac{1}{(EI)_i} q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)}^{(4)} + c_{i,6} \quad (4)$$

$$\phi_i^{(I)} = \phi_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)} = -\frac{1}{(EI)_i} q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)}^{(3)} + c_{i,5} \quad (5)$$

$$R_{x_i}^{(I)} = -(EA) u'_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)} = p_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)}^{(1)} - (EA)_i c_{i,1} \quad (6)$$

$$R_{y_i}^{(I)} = (EI)_i w'''_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)} = q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)}^{(1)} + (EI)_i c_{i,3} \quad (7)$$

$$M_i^{(I)} = (EI)_i w''_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)} = q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=0)}^{(2)} + (EI)_i c_{i,4} \quad (8)$$

$$u_i^{(J)} = u_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)} = -\frac{1}{(EA)_i} p_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)}^{(2)} + l_i c_{i,1} + c_{i,2} \quad (9)$$

$$w_i^{(J)} = w_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)} = \frac{1}{(EI)_i} q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)}^{(4)} + \frac{l_i^3}{6} c_{i,3} + \frac{l_i^2}{2} c_{i,4} + l_i c_{i,5} + c_{i,6} \quad (10)$$

$$\phi_i^{(J)} = \phi_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)} = -\frac{1}{(EI)_i} q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)}^{(3)} - \frac{l_i^2}{2} c_{i,3} - l_i c_{i,4} - c_{i,5} \quad (11)$$

$$R_{x_i}^{(J)} = -p_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)}^{(1)} + (EA)_i c_{i,1} \quad (12)$$

$$R_{y_i}^{(J)} = -q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)}^{(1)} - (EI)_i c_{i,3} \quad (13)$$

$$M_i^{(J)} = -q_{(\hat{x}_i)/(\hat{x}_i=l_i)}^{(2)} - (EI)_i l_i c_{i,3} - (EI)_i c_{i,4} \quad (14)$$

معادله‌های ۵ و ۱۱، تغییرشکل دورانی در گروه‌های I و J؛ معادله‌های ۶ و ۱۲، نیروی داخلی محوری؛ معادله‌های ۷ و ۱۳، نیروی داخلی برشی؛ و معادله‌های ۸ و ۱۴، لنگر به وجود آمده در گروه‌ها هستند. به منظور ساده‌نویسی، هر یک از

¹ Local

تعادل و سازگاری، ابتدا نیاز است که همهی کمیت‌های استاتیکی و سینماتیکی به یک محور کلی ارجاع شوند. ماتریس G یا دوران به منظور عبور از مختصات محلی به صورت رابطه‌ی ۲۹ تعریف می‌شود.

$$G_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & 0 \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

α_i زاویه‌ی بین محور محلی و کلی (α_G) است. محور محلی در راستای المان و محور کلی در راستای افق است. شرط سازگاری در گره‌های غیرمقید باید نوشته شود. از نظر فیزیکی در گره‌هایی که دو المان به هم متصل هستند و قید خارجی ندارند، تغییرشکل‌ها با هم برابر هستند. همچنین با نوشتن معادله‌های تعادل در گره‌های مذکور، مجموع واکنش‌های داخلی اعضا نیز با نیروی وارده بر آن گره با هم برابر هستند. به عنوان مثال، $u_1^{(J)} = u_2^{(I)}$ بدان معناست که تغییرشکل انتهای المان ۱ با تغییرشکل ابتدای المان ۲ برابر است. روابط ۳۰ الی ۴۱ برای گره‌های غیرمقید در شکل ۲ ارائه شده‌اند.

$$u_1^{(J)} = u_2^{(I)} \rightarrow G_1^{(J)} u_1 = G_2^{(I)} u_2 \quad (30)$$

$$G_1^{(J)} A_1 - c_1 - G_2^{(I)} A_2 - c_2 = G_1^{(J)} a_1 - G_2^{(I)} a_2 \quad (31)$$

$$A_1^{(J)} - c_1 - A_2^{(I)} - c_2 = a_1^{(J)} - a_2^{(I)} \quad (32)$$

$$r_1^{(J)} + r_2^{(I)} = f^B \rightarrow G_1^{(J)} r_1 + G_2^{(I)} r_2 = f^B \quad (33)$$

$$G_1^{(J)} B_1 - c_1 + G_2^{(I)} B_2 - c_2 = G_1^{(J)} b_1 + G_2^{(I)} b_2 + f^B \quad (34)$$

$$B_1^{(J)} - c_1 + B_2^{(I)} - c_2 = b_1^{(J)} + b_2^{(I)} + f^B \quad (35)$$

$$u_2^{(J)} = u_3^{(J)} \rightarrow G_2^{(J)} u_2 = G_3^{(J)} u_3 \quad (36)$$

$$G_2^{(J)} A_2 - c_2 - G_3^{(J)} A_3 - c_3 = G_2^{(J)} a_2 - G_3^{(J)} a_3 \quad (37)$$

$$A_2^{(J)} - c_2 - A_3^{(J)} - c_3 = a_2^{(J)} - a_3^{(J)} \quad (38)$$

$$r_2^{(J)} + r_3^{(J)} = f^C \rightarrow G_2^{(J)} r_2 + G_3^{(J)} r_3 = f^C \quad (39)$$

$$G_2^{(J)} B_2 - c_2 + G_3^{(J)} B_3 - c_3 = G_2^{(J)} b_2 + G_3^{(J)} b_3 + f^C \quad (40)$$

$$B_2^{(J)} - c_2 + B_3^{(J)} - c_3 = b_2^{(J)} + b_3^{(J)} + f^C \quad (41)$$

$$a_i^{(I)} = \left[\frac{1}{(EA)_i} p_{(x_i)/x_i=0}^{(2)} - \frac{1}{(EI)_i} q_{(x_i)/x_i=0}^{(4)} - \frac{1}{(EI)_i} q_{(x_i)/x_i=0}^{(3)} \right]^T \quad (23)$$

$$a_i^{(J)} = \left[\frac{1}{(EA)_i} p_{(x_i)/x_i=l_i}^{(2)} - \frac{1}{(EI)_i} q_{(x_i)/x_i=l_i}^{(4)} - \frac{1}{(EI)_i} q_{(x_i)/x_i=l_i}^{(3)} \right]^T \quad (24)$$

$$b_i^{(I)} = \left[-p_{(x_i)/x_i=0}^{(1)} - q_{(x_i)/x_i=0}^{(1)} - q_{(x_i)/x_i=0}^{(2)} \right]^T \quad (25)$$

$$b_i^{(J)} = \left[p_{(x_i)/x_i=l_i}^{(1)} - q_{(x_i)/x_i=l_i}^{(1)} - q_{(x_i)/x_i=l_i}^{(2)} \right]^T \quad (26)$$

جالب است که در a_i ، سختی‌ها هم دخیل هستند ولی در b_i ، که مربوط به واکنش‌های تکیه‌گاهی است، اثری از سختی مشاهده نمی‌شود. اگر این دو ضریب با هم مقایسه شوند، رابطه‌ای مشخص می‌شود که نیرو و جابجایی را به هم مرتبط می‌کند. در واقع، ۱۲ مجهولی که ۶ مجهول در هر گره بود، را به ۳ مجهول در هر گره، که همان C_i ها هستند، تبدیل می‌کند. یا به عبارتی دیگر، روشی که از آن به عنوان روش ترکیب نیرو-جابجایی^۲ یاد می‌شود، با ترکیب معادله‌های تغییرشکل و نیرویی مجهول‌های معادله‌های (u و w و φ و R_x و R_y و M) را به ۶ مجهول C_i تبدیل می‌کند. حال برای سادگی کار می‌توان شرایط مرزی را برای گره‌هایی که تکیه‌گاه بسته^۳ دارند، به دلیل اینکه ماتریس دوران^۴ در آن اثر نمی‌گذارد، اعمال کرد. نکته‌ی دیگری که باید در نظر گرفت، این است که اگر این کار برای حالت‌های کلی بسط داده شود، باید ماتریس دوران را در هر یک از گره‌ها به دست آورد و ماتریس به دست آمده‌ی مذکور باید شرایط مرزی را ارضا کند. فرض شود در گره‌ی I تکیه‌گاه گیردار باشد، در این صورت روابط تغییرشکل را می‌توان به صورت روابط ۲۷ و ۲۸ نوشت:

$$u_1^{(I)} = 0 \rightarrow A_1^{(I)} - c_1 = a_1^{(I)} \quad (27)$$

$$u_3^{(I)} = 0 \rightarrow A_3^{(I)} - c_3 = a_3^{(I)} \quad (28)$$

چهار گروه معادله‌ها، که در رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ بیان شده‌اند، خود شامل ۱۲ معادله و ۱۲ مجهول هستند. همان‌طور که استنباط می‌شود، در یک المان تعداد مجهول‌های تغییرمکان و نیرویی برای دو گره، ۱۲ عدد است؛ اما با توجه به معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر کل المان می‌توان ۱۲ مجهول اخیر را به ۶ مجهول، که همان ثابت‌های معادله‌ی دیفرانسیل هستند، تبدیل کرد. اگر به معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر تیر توجه شود، برای نمونه در روابط ۱ و ۲، تغییرشکل با رابطه‌ای به نیرو ارتباط یافته است. رابطه‌ی بین تغییرشکل و نیرو هنگامی حاصل می‌شود که سه رابطه‌ی ساختاری، سینماتیکی، و استاتیکی با هم ترکیب شوند.

مجهول‌های مسئله به بردار $\{C_1^J, C_2^J, \dots, C_n^J\}^T$ تبدیل شده‌اند، که در آن n تعداد المان و $j=1, 2, \dots, 6$ مجهول‌های مسئله هستند. برای حل سیستم اخیر، باید شرایط سازگاری و تعادل گره‌های آزاد نوشته شود. برای نوشتن معادله‌های

⁴ Rotation Matrix

⁵ Global

² Mixed Force-Displacement Method

³ Fixed

در آن‌ها تکیه‌گاه وجود دارد (مقید) نوشته می‌شوند، سپس با نوشتن معادله‌های تعادل در گره‌های دیگر با رعایت کردن حرکت از سمت چپ به راست دیگر سطرهای ماتریس هم نوشته می‌شود. معادله‌های ۳۲، ۳۵، ۳۸ و ۴۱ از نوشتن معادله‌های تعادل برای شکل ۲ در گره‌های غیرمقید B و C به‌دست آمده‌اند، که به ترتیب در ماتریس D قرار گرفته‌اند. ماتریس C ، که از مجهول‌های مسئله تشکیل شده است، با حل معادله‌ی ۴۲ به‌دست می‌آید. ماتریس d ، که تعداد سطرهای آن $2n$ و تعداد ستون آن همیشه ۱ است، از ماتریس‌های $\wedge^{(K)}$ و a_i تشکیل شده است، که آن‌ها خود ماتریس‌های 3×1 هستند؛ در نتیجه، ماتریس d به یک ماتریس $6n \times 1$ تبدیل می‌شود. ترتیب نوشتن آن هم مانند ماتریس D است، یعنی ابتدا از سمت چپ گره‌های مقید و بعد از آن گره‌های غیرمقید نوشته می‌شود. درنهایت، برای حل معادله‌ی ۴۲، بردار مجهول‌ها از ضرب ماتریس d در معکوس ماتریس D حاصل می‌شود.

۴. مثال‌های عددی و بررسی نتایج

در بخش حاضر، به‌منظور نشان‌دادن کارایی روش پیشنهادی، سه قاب صفحه‌ای با افزایش تدریجی اعضا و دهانه‌ها تحلیل شده‌اند. این تذکر لازم است که روش پیشنهادی تحت کدی در محیط نرم‌افزار Mathematica ver ۱۲.۰.۰ و روش اجزاء محدود در بستر نرم‌افزار OpenSees^[۴۱ و ۴۲] توسعه داده شده است. به‌منظور شبکه‌بندی روش اجزاء محدود در هر سه قاب انتخاب‌شده، اعضا از نوع beam element و در شبکه‌بندی به ازاء هر ۰/۵ متر یک المان در نظر گرفته شده‌اند.

۱.۴. مثال اول

یک قاب سه عضوی مطابق شکل ۲ با این مشخصات در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} l &= 5m \\ A &= 0.12m^2 \\ I &= 1.6 \times 10^{-3} m^4 \\ E &= 2.0 \times 10^{10} \frac{N}{m^2} \\ P &= 3.0 \times 10^3 \frac{N}{m} \\ F &= 15000N \end{aligned}$$

۱.۴.۱. معادله‌های حاکم بر هر المان (i شماره‌ی المان است).

$$\begin{aligned} W_{x_i} &= \frac{P_i \times \sin(\theta_i)}{EI} \times \frac{x_i^4}{24} + c_{i,3} \times \frac{x_i^3}{6} + c_{i,4} \times \frac{x_i^2}{2} + c_{i,5} \times x_i + c_{i,6} \\ M_{x_i} &= -P_i \times \sin(\theta_i) \times \frac{x_i^2}{2} - (c_{i,3} \times x_i + c_{i,4}) \times EI \\ T_{x_i} &= -P_i \times \sin(\theta_i) \times x_i - c_{i,3} \times EI \end{aligned}$$

که در آن‌ها، W خیز، M لنگر، و T برش است. با حل معادله‌ی ۴۲ برای شکل ۲، مقدار ماتریس C به‌دست می‌آید، که در پیوست ۱ به آن اشاره شده است.

۲.۱.۴. با قراردادن مقادیر ماتریس C در معادله‌های حاکم بر هر المان در زیربخش ۱.۴.۱، معادله‌های خیز، لنگر، و برش هر المان به‌دست می‌آیند. مقادیر معادله‌های اخیر در بازه‌ی ۰ تا 1 (طول المان) تعیین می‌شود و با مقادیر

این تذکر لازم است که در معادله‌های اخیر، ماتریس f متشکل از نیروهای خارجی وارد بر هر گره از سازه و نام هر گره در بالای آن نوشته شده است. حال شکل ماتریسی معادله‌های ۲۷، ۲۸، ۳۲، ۳۵، ۳۸ و ۴۱ به صورت روابط ۴۲ الی ۴۵ ارائه شده است، که با حل آن‌ها مجهول‌های مسئله به‌دست می‌آیند.

$$Dc = d \quad (42)$$

$$D = \begin{bmatrix} A_1^{(I)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3^{(I)} \\ A_1^{(J)} & -A_2^{(I)} & 0 \\ B_1^{(J)} & B_2^{(I)} & 0 \\ 0 & A_2^{(J)} & -A_3^{(J)} \\ 0 & B_2^{(J)} & B_3^{(J)} \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$d = \begin{bmatrix} a_1^{(I)} \\ a_3^{(I)} \\ a_1^{(J)} - a_2^{(I)} \\ b_1^{(J)} + b_2^{(I)} + f^B \\ a_2^{(J)} - a_3^{(J)} \\ b_2^{(J)} + b_3^{(J)} + f^C \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (45)$$

شایان ذکر است که معادله‌ی ۴۲ خود وابسته به روابط ۱۹ الی ۲۶ است. مجهول‌های معادله‌های اخیر، ماتریس C است، که هر درایه‌ی آن از ماتریس‌های C_1 ، C_2 ، و C_3 تشکیل شده است. هر یک از ماتریس‌های C_i یک بردار ستونی ۶ مؤلفه‌ای است، که درنهایت برای مثال ماتریس C یک بردار ستونی ۱۸ مجهولی برای یک قاب ساده‌ی سه‌المانی است.

۳. الگوریتم حل برای قاب‌های با تعداد اعضاء دلخواه

با توسعه‌ی روش پیشنهادی ذکرشده، درنهایت معادله‌ی ۴۲ به‌دست می‌آید، که یک معادله‌ی ماتریسی است، که برای حل آن می‌توان از نرم‌افزارهای مخصوص حل معادله‌های ریاضی استفاده کرد. معادله‌ی ۴۲، را، که معادله‌ی نهایی برای حل قاب‌های چنددهانه‌ی دوبعدی به روش ترکیب نیرو-جابجایی است، می‌توان برای هر قابی با تعداد n عضو توسعه داد. به‌طور کلی، ماتریس D خود متشکل از ماتریس‌های دیگری، از جمله ماتریس‌های A_i ، B_i و ماتریس صفر است. تعداد ستون‌های ماتریس D برابر با n (تعداد المان) و تعداد سطرهای آن برابر با $2n$ است. از آنجایی که ماتریس‌های A_i و B_i به صورت 3×6 هستند؛ درنهایت ماتریس D به یک ماتریس $6n \times 6n$ تبدیل می‌شود. ترتیب قرارگیری ماتریس‌های A_i و B_i اینگونه است که ابتدا با شماره‌گذاری المان‌ها از سمت چپ به راست در سطرهای اول، گره‌هایی که

جدول ۱. مقایسه‌ی لنگر به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

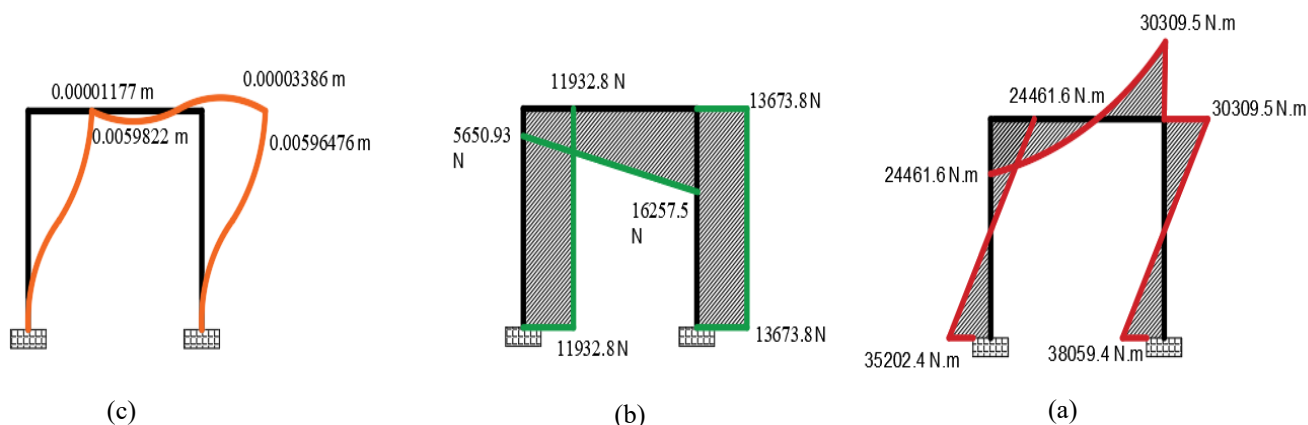
Number of Element	Bending Moment					
	Mixed-Forced Displacement Method			Finite Element Method		
	First node	End node	Max value	First node	End node	Max value
Element1	-35202.4	24461.6	35202.4	-35202	24462	35202
Element2	-24461.6	30309.5	30309.5	-24462	30310	30310
Element3	-38059.4	30309.5	30309.5	-38059	30310	30310

جدول ۲. مقایسه‌ی برش به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Shear			
	Mixed-Forced Displacement Method		Finite Element Method	
	First node	End node	First node	End node
Element1	11932.8	11932.8	11933	11933
Element2	-5650.93	-16257.5	-5651	-16258
Element3	13673.8	13673.8	13674	13674

جدول ۳. مقایسه‌ی خیز به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Deflection					
	Mixed-Forced Displacement Method			Finite Element Method		
	First node	End node	Max value	First node	End node	Max value
Element1	0	0.0059822	0.0059822	0	0.005982	0.005982
Element2	1.17728e-5	-3.38699e-5	0.00018	0.000012	-0.000034	0.00018
Element3	0	0.00596476	0.003490082	0	0.005965	0.00349



شکل ۳. (a) نمودار لنگر قاب ساده با ۳ المان؛ (b) نمودار برش قاب ساده با ۳ المان؛ (c) نمودار خیز قاب ساده با ۳ المان.

دیگر از توابع شکل استفاده می‌شوند و تحلیل ثانویه امکان‌پذیر است. همچنین برای تعیین نیروهای تکیه‌گاهی نیز به تحلیل ثانویه نیاز است. در حالی که به کمک روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، تعداد مجهول‌ها ۱۸ است، که پس از تحلیل پاسخ‌ها در هر نقطه دقیقاً به‌دست می‌آیند. شایان ذکر است اگر در روش عددی اجزاء محدود، افزایش دقت مدنظر باشد؛ باید تعداد شبکه‌بندی المان‌ها نیز افزایش داده شود، که خود منجر به تشکیل ماتریس مجهول‌های بزرگ‌تری می‌شود و لذا زمان تلاش محاسباتی جهت تحلیل را بالا می‌برد. نمودارهای مربوط به مقادیر لنگر، برش، و خیز تعیین‌شده از روش ترکیبی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با مقایسه‌ی جواب‌های به‌دست‌آمده از دو روش پیشنهادی نیرو-جابجایی و اجزاء محدود مشاهده می‌شود که تفاوت ناچیزی با هم دارند.

محاسبه‌شده‌ی لنگر در جدول ۱، برش در جدول ۲ و خیز در جدول ۳ از روش اجزاء محدود مقایسه شده‌اند. همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، هر عضو از قاب در تحلیل به روش عددی اجزاء محدود (به عنوان یک روش جابجایی مرسوم) به ۱۰ المان تقسیم‌بندی می‌شود، که هر یک از المان‌های تیر-ستون^۶ دارای ۲ گره و هر گره نیز شامل ۳ مجهول اصلی یا ۳ درجه‌ی آزادی (جابجایی در راستای المان و عمود بر آن و دوران) است. بنابراین برای یک قاب ساده، ۳۰ المان و ۳۱ گره ایجاد شده است. با توجه به تعداد گره‌ها، تعداد درجه‌های آزادی کل ۹۳ بوده است؛ که با اعمال شرایط تکیه‌گاهی و سازگاری به ۸۱ عدد کاهش یافته‌اند. برای تحلیل به روش عددی، نیاز به تشکیل ماتریس مجهول‌ها با ابعاد ماتریس ۸۱×۸۱ است. سپس بعد از تحلیل به روش عددی، مجهول‌ها (جابجایی‌ها و دوران) فقط در هر یک از گره‌های فرض‌شده تعیین و برای نقاط

^۶ Beam-Column

جدول ۴. مقایسه‌ی لنگر به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Bending Moment					
	Mixed-Forced Displacement Method			Finite Element Method		
	First node	End node	Max value	First node	End node	Max value
Element1	-11799.43975	6234.797852	6234.797852	11799	6235	6235
Element2	-6234.797852	14742.13146	14742.13146	-6235	14742	14742
Element3	-15609.8157	14037.8402	14037.8402	15610	14038	14038
Element4	704.2912628	12513.94658	12513.94658	704	12514	12514
Element5	-14804.15992	12513.94658	12513.94658	14804	-12514	12514

جدول ۵. مقایسه‌ی برش به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Shear			
	Mixed-Forced Displacement Method		Finite Element Method	
	First node	End node	First node	End node
Element1	3606.84752	3606.84752	3607	3607
Element2	3304.614138	-11695.38586	3305	-11695
Element3	5929.53118	5929.53118	5930	5930
Element4	5138.068937	-9861.931063	5138	-9862
Element5	5463.6213	5463.6213	5464	5464

جدول ۶. مقایسه‌ی خیز به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Deflection					
	Mixed-Forced Displacement Method			Finite Element Method		
	First node	End node	Max value	First node	End node	Max value
Element1	0	0.002260948	0.002260948	0	0.002261	0.002261
Element2	-6.88461e-6	-3.50697e-5	-6.88461e-6	-0.000007	-0.000035	-0.000007
Element3	0	0.002237212	0.002237212	0	0.002237	0.002237
Element4	-3.50697e-5	-2.05457e-5	1.03048e-5	-0.000035	-0.000021	0.000026
Element5	0	0.00222583	0.00222583	0	0.002226	0.002226

۲.۴. مثال دوم

قاب‌ی با ۵ عضو مطابق شکل ۴ با این مشخصات در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned}
 l &= 5m \\
 A &= 0.12m^2 \\
 I &= 1.6 \times 10^{-3} m^4 \\
 E &= 2.0 \times 10^{10} \frac{N}{m^2} \\
 q &= 3.0 \times 10^3 \frac{N}{m} \\
 F &= 15000N
 \end{aligned}$$

۱.۲.۴. معادله‌های حاکم بر هر المان

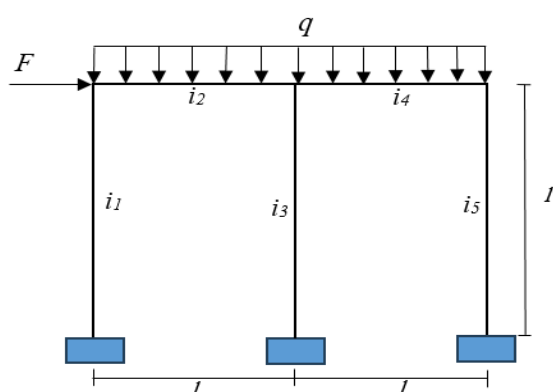
$$W_{x_i} = \frac{q_i}{EI} \times \frac{x_i^4}{24} + c_{i,3} \times \frac{x_i^3}{6} + c_{i,4} \times \frac{x_i^2}{2} + c_{i,5} \times x_i + c_{i,6}$$

$$M_{x_i} = -q_i \times \frac{x_i^2}{2} - (c_{i,3} \times x_i + c_{i,4}) \times EI$$

$$T_{x_i} = -q_i \times x_i - c_{i,3} \times EI$$

با حل معادله‌ی ۴۲ برای شکل ۴، مقدار ماتریس C به‌دست می‌آید، که در پیوست ۲ به آن اشاره شده است.

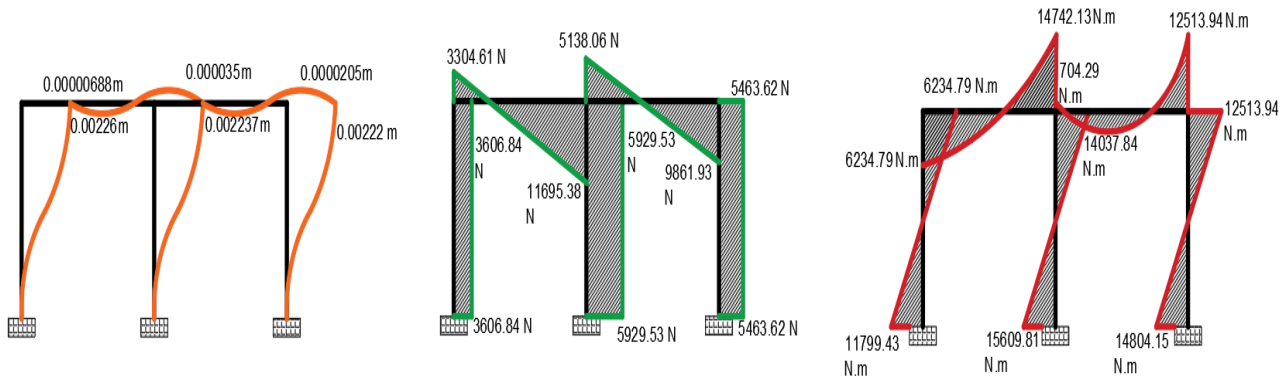
۲.۲.۴. با قراردادن مقادیر ماتریس C در معادله‌های حاکم بر هر المان در زیربخش ۱.۲.۴، معادله‌های خیز، لنگر، و برش هر المان به‌دست می‌آیند؛ که مقادیر آن‌ها در بازه‌ی ۰ تا ۱ تعیین و با مقادیر محاسبه‌شده‌ی لنگر در جدول ۴، برش در جدول ۵ و خیز در جدول ۶ از روش اجزاء محدود (با فرض مش‌های ۰/۵ متری) مقایسه شده است. نمودارهای مربوط به مقادیر لنگر، برش، و خیز



شکل ۴. قاب ساده‌ی ۲ دهانه با ۵ المان تحت بار گسترده و متمرکز جانبی.

حاصل از روش ترکیبی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با مقایسه‌ی جواب‌های به‌دست‌آمده از دو روش ترکیب نیرو-جابجایی و اجزاء محدود، تطابق پاسخ‌ها مشهود است.

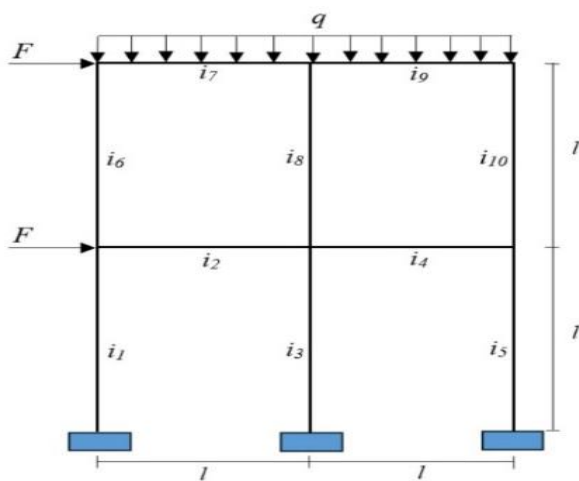
شایان ذکر است اگر اندازه‌ی مش‌بندی در تحلیل اجزاء محدود ۵ متر (به اندازه‌ی طول عضو) لحاظ شود، قاب دو دهانه از مثال دوم به ۵ المان و ۶ گره تفکیک می‌شود. با توجه به تعداد گره‌ها، تعداد درجه‌های آزادی کل ۱۸ درجه‌ی آزادی خواهد شد؛ که با اعمال شرایط تکیه‌گاهی و سازگاری، درجه‌ی آزادی به ۹ می‌رسد. بنابراین، برای تحلیل با کمک روش عددی، نیاز به تشکیل ماتریس مجهول‌ها با ابعاد ۹×۹ است. سپس بعد از تحلیل، مجهول‌ها (جابجایی‌ها و



شکل ۵. (a) نمودار لنگر قاب ساده با ۵ المان؛ (b) نمودار برش قاب ساده با ۵ المان؛ (c) نمودار خیز قاب ساده با ۵ المان.

جدول ۷. مقایسه‌ی لنگر به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو-جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Bending Moment					
	Mixed-Forced Displacement Method			Finite Element Method		
	First node	End node	Max value	First node	End node	Max value
Element1	-28303.58507	18761.52331	18761.52331	-28303	18762	18762
Element2	-24611.99163	20973.79376	20973.79376	-24612	20974	20974
Element3	-31804.21711	25901.35322	25901.35322	-31804	25901	25901
Element4	-21754.26828	25866.21513	25866.21513	-21754	25866	25866
Element5	-27622.56602	17607.75527	17607.75527	-27623	17608	17608
Element6	-5850.468319	8890.46355	8890.46355	-5850	8890	8890
Element7	-8890.46355	17634.35559	17634.35559	-8890	17634	17634
Element8	-16826.70883	19984.61415	19984.61415	-16827	19985	19985
Element9	-2350.258556	15189.28529	15189.28529	-2350	15189	15189
Element10	-8258.459858	15189.28529	15189.28529	-8258	15189	15189



شکل ۶. قاب ساده‌ی ۲ دهانه و ۲ طبقه با ۱۰ المان تحت بار گسترده و متمرکز جانبی.

دوران) فقط در هر یک از گره‌های فرض‌شده تعیین می‌شوند و برای تعیین جابجایی‌های نقاط دیگر باید از توابع شکل ذکر شده استفاده کرد. در حالی که به کمک روش پیشنهادی در پژوهش حاضر با همان تعداد المان‌ها (۵ عضو)، تعداد مجهول‌ها به ۳۰ می‌رسد، که پس از تحلیل، پاسخ‌ها در هر نقطه از قاب دقیقاً به‌دست می‌آیند. بنابراین، حجم و تلاش محاسبات در روش پیشنهادی با شروط ذکر شده نسبت به روش اجزاء محدود بیشتر خواهد شد، اما دقت روش پیشنهادی همچنان بیشتر است.

۳.۴. مثال سوم

قابی با ۱۰ عضو مطابق شکل ۶ با این مشخصات در نظر گرفته شده است.

$$l = 5m$$

$$A = 0.12m^2$$

$$I = 1.6 \times 10^{-3} m^4$$

$$E = 2.0 \times 10^{10} \frac{N}{m^2}$$

$$q = 3.0 \times 10^3 \frac{N}{m}$$

$$F = 15000N$$

۱.۳.۴. معادله‌های حاکم بر هر المان

$$W_{x_i} = \frac{q_i}{EI} \times \frac{x_i^4}{24} + c_{i,3} \times \frac{x_i^3}{6} + c_{i,4} \times \frac{x_i^2}{2} + c_{i,5} \times x_i + c_{i,6}$$

$$M_{x_i} = -q_i \times \frac{x_i^2}{2} - (c_{i,3} \times x_i + c_{i,4}) \times EI$$

$$T_{x_i} = -q_i \times x_i - c_{i,3} \times EI$$

با حل معادله‌ی ۴۲ برای شکل ۶، مقدار ماتریس C به‌دست می‌آید، که در پیوست ۳ به آن اشاره شده است.

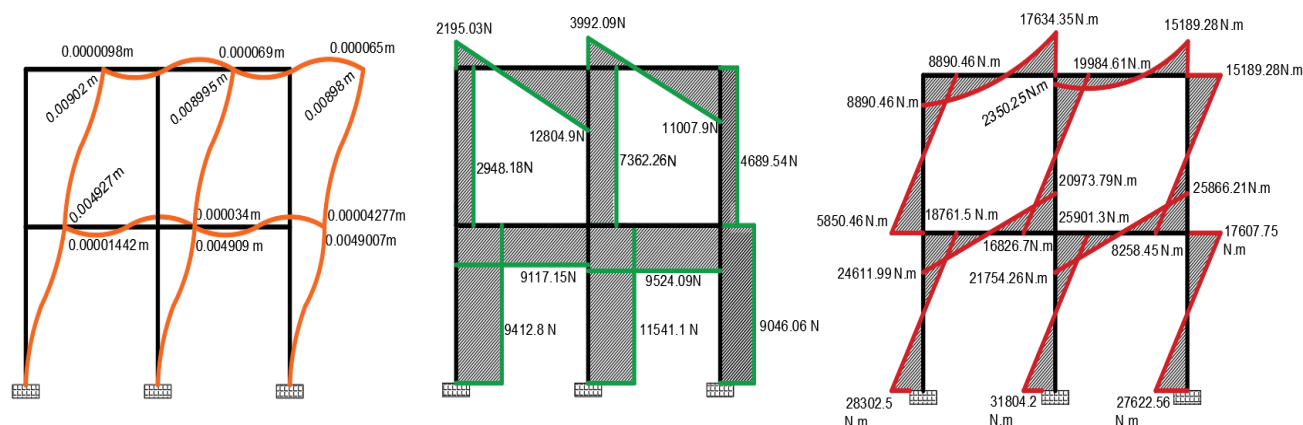
۲.۳.۴. با قراردادن مقادیر ماتریس C در معادله‌های حاکم بر هر المان در زیربخش ۱.۳.۴؛ معادله‌های خیز، لنگر، و برش هر المان به‌دست می‌آیند؛ که در بازه‌ی ۰ تا l (طول المان) تعیین می‌شوند و با مقادیر محاسبه‌شده‌ی لنگر در جدول ۷، برش در جدول ۸، و خیز در جدول ۹ از روش اجزاء محدود مقایسه

جدول ۸. مقایسه‌ی برش به‌دست‌آمده از روش ترکیب نیرو- جابجایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Shear			
	Mixed-Forced Displacement Method		Finite Element Method	
	First node	End node	First node	End node
Element1	9412.821677	9412.821677	9413	9413
Element2	-9117.157079	-9117.157079	-9117	-9117
Element3	11541.11406	11541.11406	11541	11541
Element4	-9524.096684	-9524.096684	-9524	-9524
Element5	9046.064258	9046.064258	9046	9046
Element6	2984.186374	2984.186374	2984	2984
Element7	2195.036171	-12804.96383	2195	-12805
Element8	7362.264596	7362.264596	7362	7362
Element9	3992.091231	-11007.90877	3992	-11008
Element10	4689.54903	4689.54903	4690	4690

جدول ۹. مقایسه‌ی خیز بدست آمده از روش ترکیب نیرو- جابه‌جایی با روش اجزاء محدود.

Number of Element	Deflection					
	Mixed-Forced Displacement Method			Finite Element Method		
	First node	End node	Max value	First node	End node	Max value
Element1	0	0.004927558	0.004927558	0	0.004928	0.004928
Element2	1.44211e-5	-3.41461e-5	0.000146785	0.000014	-0.000034	0.000147
Element3	0	0.004909776	0.004909776	0	0.00491	0.00491
Element4	-3.41461e-5	-4.2775e-5	0.000385077	-0.000034	-0.000043	0.000385
Element5	0	0.0049007	0.0049007	0	0.004901	0.004901
Element6	0.004927558	0.009020482	0.009020482	0.004928	0.00902	0.00902
Element7	9.84809e-6	-6.91399e-5	9.84809e-6	0.00001	-0.000069	0.00001
Element8	0.004909776	0.008995375	0.008995375	0.00491	0.008995	0.008995
Element9	-6.91399e-5	-6.57082e-5	4e-6	-0.000069	-0.000066	0.000004
Element10	0.0049007	0.008985605	0.008985605	0.004901	0.008986	0.008986



شکل ۷. (a) نمودار لنگر قاب ساده با ۱۰ المان؛ (b) نمودار برش قاب ساده با ۱۰ المان؛ (c) نمودار خیز قاب ساده با ۱۰ المان.

و با انتگرال‌گیری، ثابت‌های انتگرالی به‌عنوان متغیرهای مجهول مسئله در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم روش پیشنهادی به‌سادگی قابل پیاده‌سازی در قالب کد رایانه‌ای است و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های مرسوم تحلیل قاب‌ها استفاده شود. از مزیت‌های روش ترکیبی می‌توان به یافتن پاسخ دقیق در هر نقطه از سازه بدون نیاز به شبکه‌بندی، الگوریتم ساده و قابل تعمیم، سادگی حل برای قاب‌های نامعین، و عدم نیاز به پس‌پردازش اشاره کرد. به‌منظور روشن‌سازی کارایی روش مذکور، سه قاب صفحه‌ای با افزایش تدریجی اعضا و دهانه‌ها تحلیل شده‌اند. راستی‌آزمایی روش با مقایسه‌ی پاسخ‌ها با روش اجزاء محدود صورت پذیرفته است؛ که نتایج به‌دست‌آمده، تطابق پاسخ‌ها را نشان می‌دهند و نمودارهای برش، خمش، و تغییر مکان قاب‌های انتخابی رسم شده‌اند.

شده‌اند، که تطابق خوبی دارند. در شکل ۷، نمودارهای مربوط به مقادیر لنگر، برش، و خیز حاصل از روش پیشنهادی مشاهده می‌شود. از مزیت روش پیشنهادی می‌توان به حل دقیق قاب، سهولت استفاده، و در دسترس بودن پاسخ در هر نقطه بدون نیاز به انتخاب گره و در نظر گرفتن آثار محوری اعضاء قاب اشاره کرد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روش ترکیبی نیرو- جابجایی به‌منظور تحلیل قاب‌های صفحه‌ای دوبعدی ارائه شده است؛ که با در نظر گرفتن همزمان شرایط تعادل و سازگاری، دستگاه معادله‌های حاکم بر قاب‌های صفحه‌ای را تشکیل می‌دهند. ابتدا معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر اعضاء تک‌محوری در مختصات محلی تولید

References - منابع

1. Macaulay, W., 1919. Note on the deflection of beams. *The Messenger of Mathematics*, 48pp. 129-130
2. Brungraber, R., 1965. Singularity functions in the solution of beam-deflection problems. *Journal of Engineering Education (Mechanics Division Bulletin)*, 1(9)pp. 278-280
3. Falsone, G., 2002. The use of generalised functions in the discontinuous beam bending differential equations. *International Journal of Engineering Education*, 18(3)pp. 337-343
4. Rahami, H., Kaveh, A., Asl, M.A., Mirghaderi, S., 2015. Finite element analysis using mixed force-displacement method via singular value decomposition. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 39(C1)pp. 1. [In Persian]. <https://doi.org/10.22099/ijstc.2015.2736>.
5. Xu, G., Chen, Q., Zhu, S., Wang, Z., Wu, B., 2018. Force-Displacement Mixed Control Method for 3-DOFs Loading System. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 34(4)pp. 586-595. <https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2018.04.02>
6. Pan, P., Zhao, G., Lu, X., Deng, K., 2014. Force-displacement mixed control for collapse tests of multistory buildings using quasi-static loading systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(2)pp. 287-300. <https://doi.org/10.1002/eqe.2344>
7. Pan, P., Nakashima, M., Tomofuji, H., 2005. Online test using displacement-force mixed control. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(8)pp. 869-888. <https://doi.org/10.1002/eqe.457>
8. Zhou, H., Wang, T., Du, C., Chen, C., 2021. Multi-degree-of-freedom force-displacement mixed control strategy for structural testing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(2)pp. 354-374. <https://doi.org/10.1002/eqe.3334>
9. Jiang, Z., 2021. Programming for matrix displacement method based on MATLAB. *Proceedings of the 2021 4th International Conference on Mathematics and Statistics*.pp. 35-41. <https://doi.org/10.1145/3475827.3475833>
10. Li, Z., 2021. Development of Program for Solving Plane Rigid Frame Based on MATLAB. *2021 IEEE 12th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*. IEEE,pp. 64-67. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT52186.2021.9476148>
11. Khennane, A., 2013. *Published: CRC Press*. Introduction to finite element analysis using MATLAB® and abaqus.
12. McNeice, G., Hunnisett, S., 1972. Mixed-displacement finite-element analysis with particular application using plane-stress triangles. *Journal of Strain Analysis*, 7(4)pp. 243-252. <https://doi.org/10.1243/03093247V074243>
13. Liu, H., 2021. Internal Force Solution of Plane Rigid Frame Based on Matrix Displacement Method. *International Conference on Architecture, Materials and Construction*. Springer,pp. 58-64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94514-5_7
14. Qi, H., 2020. Calculation of Frame Internal Force Based on MATLAB Matrix Displacement Method. *International Conference on Computing and Data Science (CDS)*. IEEE,pp. 367-372. <https://doi.org/10.1109/CDS49703.2020.00077>
15. Falsone, G., Settineri, D., 2013. A Mixed Force-Displacement Method for the Exact Solution of Plane Frames. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(4)pp. 82-91. <https://doi.org/10.12691/ajcea-1-4-3>
16. Shahabian, F., Alamatian, J., 2012. Stochastic Nonlinear Dynamic Analysis of Portal Frames in Random Fields. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, 45(6)pp. 659-670. [In Persian].
17. Mohemmi, M., Broujerdian, V., Rajaeian, P., 2020. An equivalent method for bar slip simulation in reinforced concrete frames. *International Journal of Civil Engineering*, 18pp. 851-863. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00507-6>
18. Sae-Long, W., Limkatanyu, S., Hansapinyo, C., Imjai, T., Kwon, M., 2020. Forced-based shear-flexure-interaction frame element for nonlinear analysis of non-ductile reinforced concrete columns. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, pp. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.32731.2065>
19. Sabet Rasekh, M., Behnamfar, F., 2020. Displacement-Based Design Of Torsional Buildings Considering Two-Way Nonlinearities. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36.2(1.1)pp. 69-77. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2018.5713.2269>
20. M Kani, I., Moghaddasi Bonab, N., 2009. Computer Program For Analysis Of Substitute Frame Of Flat Slabs And Slabs Supported On Beams. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 24(46.1)pp. 95-102. [In Persian].
21. Thai, H-T., Nguyen, T-K., Lee, S., Patel, V.I., Vo, T.P., 2020. Review of nonlinear analysis and modeling of steel and composite structures. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(04)pp. 2030003. <https://doi.org/10.1142/S0219455420300037>
22. Namadchi, A., Alamatian, J., Mohammadlahi Arehkamar, H., 2022. Semi-explicit Unconditionally

- Stable Time Integration method based on Generalized- α technique. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37(4.1)pp. 135-145. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2021.55958.279>
23. Limkatanyu, S ., Spacone, E., 2002. Reinforced concrete frame element with bond interfaces. I: Displacement-based, force-based, and mixed formulations. *Journal of Structural Engineering*, 128(3)pp. 346-355. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:3\(346\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(346))
24. Sepulveda, C ., Mosqueda, G., 2023. Performance assessment of a mixed displacement and force control mode for hybrid simulation. *13th Chilean Conference of Seismology and Earthquake Engineering*. pp.
25. Sepulveda, C ., Mosqueda, G ., Wang, KJ ., Huang, PC ., Huang, CW ., Uang, CM ., Chou, CC., 2024. Hybrid simulation framework with mixed displacement and force control for fully compatible displacements. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(2)pp. 838-855. <https://doi.org/10.1002/eqe.4048>
26. Pian, C ., Qian, J ., Muho, EV ., Beskos, DE., 2020. A hybrid force/displacement seismic design method for reinforced concrete moment resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129pp. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.002>
27. Mohammad Rezaiee-Pajand, AAS., 2010. Extending Kani Method for Analysis of Braced Frames. *Journal of Structure & Steel*, 6(8)pp. 83-98. [In Persian].
28. Khabiri, A ., Javadi, AS., 2022. Vibration analysis of buried pipelines and piles using differential transformation method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 175(2)pp. 83-90. <https://doi.org/10.1680/jencm.21.00013>
29. Alaneme, GU ., Bahrami, A ., Ibe Iro, U ., Ganasen, N ., Otu, ON ., Udeala, RC ., Ifebude, BO ., Onwusereaka, EA., 2023. Numerical Analysis and Parametric Study on Multiple Degrees-of-Freedom Frames. *Civil Engineering Journal*, 9(7)pp. 1709-1736. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-07-012>
30. Colombo, IG ., Colombo, M ., di Prisco, M ., Magri, A ., Martinelli, P ., Mazzoleni, L ., Zani, G., 2023. *Published: Springer*. Solution of Complex Frames. Structural Analysis of Plane Frames: Solved Examples with Force and Displacement Methods. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35267-6_3
31. Connor, JJ ., Faraji, S., 2016. Finite Element Displacement Method for Framed Structures. *Fundamentals of Structural Engineering*, pp. 805-869. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24331-3_12
32. Karnovsky, IA ., Lebed, O., 2021. The Displacement Method. *Advanced Methods of Structural Analysis*, pp. 367-403. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44394-8_10
33. Toniolo, G., 2019. Displacement Method. *Introduction to Frame Analysis: First and Second Order Theories*, pp. 157-275. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14664-1_3
34. Kien, ND., 2004. Beam element for large displacement analysis of elasto-plastic frames. *Vietnam Journal of Mechanics*, 26(1)pp. 39-54. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/26/1/5688>
35. Krenk, S ., Høgsberg, J ., Krenk, S ., Høgsberg, J., 2013. Deformation and Element Methods for Frames. *Statics and Mechanics of Structures*, pp. 267-320. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6113-1_7
36. Rezaiee-Pajand, M ., Gharaei-Moghaddam, N., 2017. Frame nonlinear analysis by force method. *International Journal of Steel Structures*, 17pp. 609-629. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6019-3>
37. Raju, NK ., Nagabhushanam, J., 2000. Nonlinear structural analysis using integrated force method. *Sadhana*, 25pp. 353-365. <https://doi.org/10.1007/BF03029720>
38. Wang, Y ., Senatore, G., 2020. Extended integrated force method for the analysis of prestress-stable statically and kinematically indeterminate structures. *International Journal of Solids and Structures*, 202pp. 798-815. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.029>
39. Zhang, SY ., Dong, MH., 2014. A Transfer Matrix Method for Frame Shear Wall Structures. *Applied Mechanics and Materials*, 482, pp. 207-212. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.482.207>
40. Tzimas, AS ., Karavasilis, TL ., Bazeos, N ., Beskos, D., 2013. A hybrid force/displacement seismic design method for steel building frames. *Engineering Structures*, 56pp. 1452-1463. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.014>
41. Mazzoni, S ., McKenna, F ., Scott, MH ., Fenves, GL., 2006. OpenSees command language manual. *Pacific earthquake engineering research (PEER) center*, 264(1)pp. 137-158
42. McKenna, F., 2011. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4)pp. 58-66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>

پیوست ۱ (مقادیر به‌دست‌آمده‌ی ماتریس C برای مثال اول)

$$c_1^1 = 0.2354552680462094 \times 10^{-5}$$

$$c_1^2 = 0$$

$$c_1^3 = -37.290031773506646 \times 10^{-5}$$

$$c_1^4 = 110.00762360632475 \times 10^{-5}$$

$$c_1^5 = 0$$

$$c_1^6 = 0$$

$$c_2^1 = -0.1277995763532447 \times 10^{-5}$$

$$c_2^2 = 598.219633131004 \times 10^{-5}$$

$$c_2^3 = 17.659145103465697 \times 10^{-5}$$

$$c_2^4 = -76.44253526120848 \times 10^{-5}$$

$$c_2^5 = 83.91272086279045 \times 10^{-5}$$

$$c_2^6 = -1.1772763402310474 \times 10^{-5}$$

$$c_3^1 = -0.6773970062878016 \times 10^{-5}$$

$$c_3^2 = 0$$

$$c_3^3 = -42.730598594612775 \times 10^{-5}$$

$$c_3^4 = 118.93572679664533 \times 10^{-5}$$

$$c_3^5 = 0$$

$$c_3^6 = 0$$

پیوست ۲ (مقادیر به‌دست‌آمده‌ی ماتریس C برای مثال دوم)

$$c_1^1 = -1.376922557393458 \times 10^{-6}$$

$$c_1^2 = 0$$

$$c_1^3 = -112.71398501108096 \times 10^{-6}$$

$$c_1^4 = 368.73249218731557 \times 10^{-6}$$

$$c_1^5 = 0$$

$$c_1^6 = 0$$

$$c_2^1 = 4.747146866518923 \times 10^{-6}$$

$$c_2^2 = 2260.948131277258 \times 10^{-6}$$

$$c_2^3 = -103.26919180450917 \times 10^{-6}$$

$$c_2^4 = -194.83743286808874 \times 10^{-6}$$

$$c_2^5 = 434.73764829806544 \times 10^{-6}$$

$$c_2^6 = 6.884612786967266 \times 10^{-6}$$

$$\begin{aligned}
 c_3^1 &= -7.013939499782052 \times 10^{-6} & c_3^2 &= 0 \\
 c_3^3 &= -185.29784937038561 \times 10^{-6} & c_3^4 &= 487.8067407062156 \times 10^{-6} \\
 c_3^5 &= 0 & c_3^6 &= 0 \\
 c_4^1 &= -2.276508874913778 \times 10^{-6} & c_4^2 &= 2237.212396944662 \times 10^{-6} \\
 c_4^3 &= -160.564654288163 \times 10^{-6} & c_4^4 &= 22.009101963653204 \times 10^{-6} \\
 c_4^5 &= 122.81058640125665 \times 10^{-6} & c_4^6 &= 35.06969749891038 \times 10^{-6} \\
 c_5^1 &= -4.109137942824491 \times 10^{-6} & c_5^2 &= 0 \\
 c_5^3 &= -170.73816561853335 \times 10^{-6} & c_5^4 &= 462.6299975698297 \times 10^{-6} \\
 c_5^5 &= 0 & c_5^6 &= 0
 \end{aligned}$$

پیوست ۳ (مقادیر به دست آمده‌ی ماتریس c برای مثال سوم)

$$\begin{aligned}
 c_1^1 &= 0.2884217044890889 \times 10^{-5} & c_1^2 &= 0 \\
 c_1^3 &= -29.41506774151249 \times 10^{-5} & c_1^4 &= 88.4455783553693 \times 10^{-5} \\
 c_1^5 &= 0 & c_1^6 &= 0 \\
 c_2^1 &= -0.3556401956926527 \times 10^{-5} & c_2^2 &= 492.7558181606057 \times 10^{-5} \\
 c_2^3 &= 28.49111587189769 \times 10^{-5} & c_2^4 &= -76.91247385029613 \times 10^{-5} \\
 c_2^5 &= 74.53954500794028 \times 10^{-5} & c_2^6 &= -1.4421085224454455 \times 10^{-5} \\
 c_3^1 &= -0.6829214772844596 \times 10^{-5} & c_3^2 &= 0 \\
 c_3^3 &= -36.065981452242313 \times 10^{-5} & c_3^4 &= 99.38817846164188 \times 10^{-5} \\
 c_3^5 &= 0 & c_3^6 &= 0 \\
 c_4^1 &= -0.1815214678391231 \times 10^{-5} & c_4^2 &= 490.9776171821422 \times 10^{-5} \\
 c_4^3 &= 29.762802135959387 \times 10^{-5} & c_4^4 &= -67.98208838870316 \times 10^{-5} \\
 c_4^5 &= 46.11612415518059 \times 10^{-5} & c_4^6 &= 3.414607386422305 \times 10^{-5} \\
 c_5^1 &= -0.8555002272046297 \times 10^{-5} & c_5^2 &= 0 \\
 c_5^3 &= -28.26895080624522 \times 10^{-5} & c_5^4 &= 86.32051879784443 \times 10^{-5} \\
 c_5^5 &= 0 & c_5^6 &= 0 \\
 c_6^1 &= -0.091459840469547 \times 10^{-5} & c_6^2 &= 1.4421085224454451 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

$$c_6^3 = -9.213082418461455 \times 10^{-5}$$

$$c_6^4 = 18.282713498103068 \times 10^{-5}$$

$$c_6^5 = 74.5395450079402 \times 10^{-5}$$

$$c_6^6 = 492.7558181606057 \times 10^{-5}$$

$$c_7^1 = -0.5021589010871805 \times 10^{-5}$$

$$c_7^2 = 902.0482448753133 \times 10^{-5}$$

$$c_7^3 = -6.859488035215988 \times 10^{-5}$$

$$c_7^4 = -27.78269859420432 \times 10^{-5}$$

$$c_7^5 = 50.78958226768675 \times 10^{-5}$$

$$c_7^6 = -0.984809320097716 \times 10^{-5}$$

$$c_8^1 = -0.6998772941386157 \times 10^{-5}$$

$$c_8^2 = -3.414607386422298 \times 10^{-5}$$

$$c_8^3 = -23.00707686322756 \times 10^{-5}$$

$$c_8^4 = 52.58346509832587 \times 10^{-5}$$

$$c_8^5 = 46.11612415518052 \times 10^{-5}$$

$$c_8^6 = 490.97761718214245 \times 10^{-5}$$

$$c_9^1 = -0.1953978762441461 \times 10^{-5}$$

$$c_9^2 = 899.5374503698778 \times 10^{-5}$$

$$c_9^3 = -12.475285095612197 \times 10^{-5}$$

$$c_9^4 = -7.344557988096302 \times 10^{-5}$$

$$c_9^5 = 21.444988856465075 \times 10^{-5}$$

$$c_9^6 = 6.913993857115411 \times 10^{-5}$$

$$c_{10}^1 = -0.4586628653918375 \times 10^{-5}$$

$$c_{10}^2 = -4.277501136023145 \times 10^{-5}$$

$$c_{10}^3 = -14.65484071831097 \times 10^{-5}$$

$$c_{10}^4 = 25.80768705771217 \times 10^{-5}$$

$$c_{10}^5 = 78.2407089111572 \times 10^{-5}$$

$$c_{10}^6 = 490.070009842947 \times 10^{-5}$$



Research Article

Mathematical Modeling of Uncertainty in River Cross-Sections on Hydrodynamic Parameters of Steady Flow

Raziyeh Valizadeh, Mahdi Mazaheri * and Jamal Mohammad Vali Samani

Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* corresponding author: (m.mazaheri@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 13 April 2024

Revised: 7 July 2024

Accepted: 13 August 2024

Keywords:

Monte Carlo,
Normal Distribution,
Uniform Distribution,
River Cross Sections

Abstract

In order to analyze the uncertainty of the geometric characteristics of the river on the hydrodynamic model, the uncertainty of the river cross-sections was investigated for a hypothetical example and a real river. Accordingly, taking into account 5%, 10% and 20% errors in the harvested points and $\pm 6\%$, $\pm 3\%$ and 0 errors in the entire section, 15 scenarios were defined for generating new cross-sections. In order to investigate the effect of the selected distribution in generating random points on the output results, the random points of each section in each of the proposed scenarios were generated once by normal distribution and once again by uniform distribution. Five statistical indicators were used in river analysis mode and section by section analysis to analyze the two characteristics of the flow output, i.e. velocity and cross-sectional area. The results indicate that with the increase of the error in picking the points of each cross-section, the thickness of the 95% confidence interval, the coefficient of variation, the dispersion index and the result of dividing the actual value of each characteristic by the deviation from the criterion of that characteristic in different repetitions for both river and cross-sectional conditions increases. This is despite the fact that increasing the error of the entire section does not change much in the output of the results. By comparing the results of the two mentioned distributions, the uncertainty indices in the scenarios implemented with a uniform distribution show more dispersion. The result of dividing the thickness of the 95% confidence interval by the standard deviation of the data in each scenario in both distributions is also around a constant axis with little fluctuation in change. The results of the investigation of two types of systematic and random errors showed that the change of systematic error does not impose uncertainty on the output of the model. Also, in the case of normal error distribution, with the increase of the percentage of error, the statistical indicators change in such a way that the statistical indicators do not undergo unacceptable fluctuations up to the 20% error that was investigated in this study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:

Valizadeh, R., Mazaheri, M. and Vali Samani, J. 2025. Mathematical modeling of uncertainty in river cross-sections on hydrodynamic parameters of steady flow, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 28-41.

<https://doi.org/10.24200/j30.2024.64363.3320>



مدل سازی ریاضی عدم قطعیت در مقاطع عرضی رودخانه در پارامترهای هیدرودینامیک جریان در حالت ماندگار

راضیه ولی زاده، مهدی مظاهری* و جمال محمد ولی سامانی

دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (m.mazaheri@modares.ac.ir)

چکیده

با توجه به رشد کاربرد مدل سازی آب های سطحی، یکی از مسائل مهم در فرآیند مدل سازی، شناسایی منابع عدم قطعیت است. به منظور تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار، عدم قطعیت مقاطع رودخانه برای یک مثال فرضی و یک رودخانه‌ی واقعی بررسی شده و با در نظر گرفتن خطاهای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد در نقاط برداشت شده و خطاهای ± 3 ، ± 6 ، و ۰ درصد در کل مقطع، ۱۵ سناریو برای تولید مقاطع تصادفی جدید یکبار از طریق توزیع نرمال و باردیگر توسط توزیع یکنواخت تعریف شده‌اند. در پژوهش حاضر مشخص شده است که در صورت احصاء مقاطع عرضی رودخانه از نقشه برداری یا تصاویر ماهواره‌ای یا هر روش دیگر، چه میزان خطا در مقاطع مذکور، چه خطایی را در نهایت در متغیرهای جریان در بر خواهند داشت. نتایج حاصل از بررسی دو نوع خطای سیستماتیک و تصادفی نشان داده است که تغییر خطای سیستماتیک بر خروجی، مدل عدم قطعیتی را تحمیل نمی کند. در حالی که با افزایش عدم قطعیت، مشخصات هندسی رودخانه حاصل از خطای تصادفی، عدم قطعیت مشخصه های جریان افزایش می یابد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

واژگان کلیدی:

مونت کارلو،

توزیع نرمال،

توزیع یکنواخت،

مقاطع عرضی رودخانه.

۱. مقدمه

یکی از چالش های مهم پیش روی شناسایی مشخصات جریان در رودخانه ها، وجود عدم قطعیت ها در پارامترهای ورودی و خروجی است؛ که از جمله ی آن ها می توان به عدم قطعیت موجود در مشخصات هندسی رودخانه اشاره کرد، که همواره به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در مدل سازی جهت اندازه گیری دبی، سطح مقطع، و میزان اختلاط آلاینده در رودخانه ها مورد توجه پژوهشگران بوده است. در تعیین پارامترهای هندسی، همواره روش های نقشه برداری میدانی دقیق ترین روش ها هستند و عدم قطعیت کمتری نسبت به سایر روش ها، از جمله استفاده از تصاویر ماهواره ای دارند. اجرای عملیات نقشه برداری در مناطق کوهستانی به دلیل صعب العبور بودن ممکن نیست و یا با هزینه ی عملیاتی زیادی همراه است. همچنین رودخانه ها تحت تأثیر عوامل مختلفی، از جمله خصوصیات زمین شناسی منطقه و شرایط هیدرولیکی جریان، تغییر پذیری دارند. عوامل ذکر شده باعث می شوند که مشخصات هندسی رودخانه به طور مداوم دستخوش تغییرات شود؛ در نتیجه، داده های حاصل از نقشه برداری مستقیم در طولانی مدت قابل استفاده نیستند. بنابراین، انجام مطالعات گسترده در زمینه ای که عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه را در مدل هیدرودینامیک تحلیل کند، ضروری به نظر می رسد.

منظور از عدم قطعیت، میزان خطا در اندازه گیری یا برآورد یک پارامتر است، که می تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی، از قبیل: خطای انسانی، خطای دستگاه های اندازه گیری، یا خطای روش های استفاده شده در اندازه گیری باشد و به عنوان رخداد پدیده هایی که خارج از کنترل انسان است، تعریف می شود.^[۱] به طور کلی، عدم قطعیت ها از خطاهای اندازه گیری مرتبط با ورودی سیستم، مشکلات ساختاری مدل به دلیل فرضیات و ساده سازی و تقریب در تعیین پارامترها ناشی می شوند.^[۲] عدم قطعیت های طبیعی، عدم قطعیت مربوط به مدل، فراسنجه ها، و داده های ورودی آن، و عدم قطعیت های عملکردی از جمله منابع مولد عدم قطعیت در مدل های مذکور هستند.^[۳] و^[۴] اندازه گیری مستقیم پارامترها معمولاً کاری فشرده، زمانبر، و پرهزینه است، که منجر به عدم قطعیت در سیستم های مدل سازی می شود.^[۵] ممکن است حتی در مدل های خیلی پیچیده با واسنجی مطلوب، اطلاعات ورودی مدل نیز عدم قطعیت داشته باشند؛^[۶] بنابراین مسئله ی عدم قطعیت، یکی از مهم ترین بازدارنده ها در کاربرد نتایج مدل سازی در مسائل واقعی است و کمی سازی عدم قطعیت پیش بینی نتایج هر مدل سازی با توجه به اهداف خاص آن ضروری به نظر می رسد.^[۷]

روش های متعددی جهت به کمیت درآوردن عدم قطعیت موجود در شبیه سازی وجود دارد، که از جمله ی آن ها می توان به روش های آماری و روش های

به صورت تحلیلی برای کانال های مثلثی و سهمی حل شود. گرمالدی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۰] به مطالعه ای اثر هندسه ی رودخانه در مدل های هیدرولیکی پیش بینی سیل پرداخته و روشی را برای نشان دادن هندسه ی رودخانه با استفاده از زمان و هزینه ی محدود ایجاد کرده اند. شبیه سازی مدل براساس هندسه ی ساده ی رودخانه با استفاده از ترکیبی از فرمول های تجربی موجود در سطح جهان، داده های سنجش از دور و تعداد محدودی از اندازه گیری ها انجام شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد. بهروز و همکاران (۲۰۱۴)^[۲۱] به تحلیل حساسیت عدم قطعیت های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، و اقتصادی در طراحی سیستم های کنترل سیلاب پرداخته و جهت تحلیل عدم قطعیت ها از روش مونت کارلو استفاده کرده اند. هوانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۲] به مطالعه ی عدم قطعیت در شکل هیدروگراف سیل، پیش بینی سیل، ظرفیت دبی مخازن، منحنی های ذخیره ی سطح آب، و تأثیر موج باد در حین عملیات کنترل مخزن سیل پرداخته و با در نظر گرفتن عدم قطعیت های متعدد، ارزیابی جامعی از خطر سیل در طول عملیات کنترل مخزن سیل با استفاده از روش LHS ارائه داده اند.

روش GLUE تخمین عدم قطعیت تشابه های عمومی، یکی از روش های متداول در تحلیل عدم قطعیت پارامترها در مدل سازی هاست، که بیون و باینلی^{۱۴} (۱۹۹۲) آن را پیشنهاد کرده اند، که در آن شبیه سازی مونت کارلو و تئوری بیز تلفیق شده است.^[۲۳] در روش GLUE، عدم قطعیت در همه ی اجزاء مدل (ورودی ها، پارامترها، متغیرهای حالت، و غیره) به صورت یکجا در نظر گرفته می شود؛ در حالی که در برخی روش ها، عدم قطعیت اجزاء مختلف مدل، به صورت مجزا برآورد می شود. تجزیه و تحلیل روش عدم قطعیت GLUE در مطالعه ی ناندینگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۱)^[۲۴] نشان می دهد که توزیع پارامترهای شبیه سازی GLUE نه فقط به انتخاب مقادیر آستانه بستگی دارد، بلکه به کیفیت تخمین های بارندگی و خود پارامتر نیز بستگی دارد و هر عاملی که در کیفیت تخمین داده های بارندگی تأثیر می گذارد، در عدم قطعیت پارامتر و در نتیجه شبیه سازی دبی تأثیر خواهد داشت. بررسی کارایی تحلیل عدم قطعیت ضریب های مدل شبه دو بُعدی توزیع سرعت و تنش برشی در رودخانه ها،^[۲۵] ضریب های نفوذ در مدل سازی حرکت آب در خاک،^[۲۶] تحلیل بیزین عدم قطعیت تراز سطح آب در رودخانه ها،^[۲۷] و عدم قطعیت اندازه گیری دبی و منحنی دبی - اشل رودخانه ها،^[۲۸] از جمله مواردی است که نشانگر کاربرد موفق تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل های هیدرولیکی در مهندسی رودخانه است. همان طور که گفته شد، منابع مولد عدم قطعیت باعث ایجاد ابهام، کاهش دقت، و کاهش قابلیت اطمینان در تفسیر نتایج می شود. برآورد مطمئن ویژگی های هیدرولیکی جریان در رودخانه ها، و کسب دانش دقیق از عدم قطعیت های موجود در نتایج مدل های هیدرولیکی در بررسی های مهندسی رودخانه، ساماندهی رودخانه ها، مدیریت سیلاب، و مدیریت ظرفیت انتقال رودخانه ها اهمیت بارزی دارد.^[۲۹ و ۳۰] ادغام تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در طراحی سازه های هیدرولیکی می تواند بینشی در مورد راهبردهای مدیریت ارائه

مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو^۱ و نمونه گیری تصادفی،^[۸] برآورد عدم قطعیت با نمونه گیری بازگشتی،^[۹] تحلیل عدم قطعیت مبتنی بر نظریه ی اطلاعات بیزین^۲، الگوریتم مونت کارلو زنجیر مارکوف^۳،^[۱۰] روش گشتاور دوم مرتبه ی اول پیرامون میانگین (MFOSM^۴)،^[۱۱] و روش عمومی عدم قطعیت همانندی،^[۱۲] اشاره کرد. انتخاب هر کدام از روش های مذکور به ماهیت موضوع مورد نظر، از جمله در دسترس بودن اطلاعات، پیچیدگی مدل، نوع، و دقت نتایج مورد نظر بستگی دارد. روش مونت کارلو، یک روش عمومی تحلیل عدم قطعیت محسوب می شود و فرضیات کمتری نسبت به سایر روش ها دارد؛ و در آن، مقادیر تصادفی هر یک از متغیرهای غیرقطعی با توجه به توزیع های احتمالاتی مربوط به آن ها تولید و مدل چندین بار با مجموعه های مختلف متغیرهای ورودی اجرا می شود. در پژوهش دیمتریادیس^۵ و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۳] حساسیت عمق آب و حجم سیلاب در برابر متغیرهای دبی جریان، شیب های طولی و عرضی، زبری، و اندازه ی سلول شبکه ارزیابی و نشان داده شده است که به طور کلی، عدم قطعیت حجم سیلاب با افزایش دبی، شیب طولی، و زبری کانال کاهش می یابد. مطالعات آپل^۶ و همکاران (۲۰۰۸)^[۱۴] و بوزی^۷ و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۵] نیز به ترتیب به منظور کمی سازی عدم قطعیت پارامتر در رابطه ی دبی - اشل و بررسی عدم قطعیت زبری و دبی بر محاسبات تراز سطح آب در چارچوب مونت کارلو صورت گرفته است.

از روش های دیگر محاسبه ی عدم قطعیت می توان به روش های LHS^۸، GLUE^۹، هار، و... اشاره کرد. در روش LHS، نمونه ها و اجراهای کامپیوتری کمتری نیاز است تا بتوان به درجه ای از دقت که قابل مقایسه با نمونه گیری تصادفی از پارامترهای ورودی باشد، دست یافت.^[۱۶] از مطالعات صورت گرفته به روش LHS می توان به این موارد اشاره کرد: وول^{۱۰} (۱۹۹۸)^[۱۷] مطالعاتی در زمینه ی عدم قطعیت دبی در ارتباط با ضریب زبری انجام داده و دریافته است که روش تخمین دبی با مدل Step-Backwater، بهتر و کم خطا تر از روش های غیرمستقیم برآورد دبی است. محمدزاده و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۸] با استفاده از اطلاعات هندسی و هیدرولیکی مقطع رودخانه، رابطه ی دبی - اشل را محاسبه کرده اند. یکی از اطلاعات مذکور، ضریب زبری مانینگ است، که برای محاسبه ی ضریب زبری رابطه ی دقیقی وجود ندارد و بنابر تجربه ی شخصی و جدول های مرجع تخمین زده می شود. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که هر چه دقت تعیین ضریب زبری به عنوان پارامتر ورودی بیشتر باشد، عدم قطعیت در تخمین دبی کاهش خواهد یافت. جفری^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۹] به مطالعه ی ترکیب مؤثر عدم قطعیت هندسه ی مقطع کانال در مدل های طغیان سیل در مقیاس منطقه ای و جهانی پرداخته اند. هدف ایشان، ایجاد یک متغیر پیوسته بوده است، که می تواند برای نشان دادن تنوع شکل کانال ساده نزدیک مثلث و نزدیک مستطیل استفاده شود. مطالعه ی ایشان، رویکرد یک ساختار مدل انعطاف پذیر را ارائه داده است که می تواند کانال های مختلف را آزمایش کند. مدل هندسه ی جدید با استفاده از یک آزمون آزمایشی ساده براساس یک کانال مستقیم با خواص کانال و هندسه های ثابت قابل تأیید است، که می تواند

^۹ Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

^{۱۰} Wohl

^{۱۱} Jeffrey

^{۱۲} Grimaldi

^{۱۳} Huang

^{۱۴} Beven & Binley

^{۱۵} Nanding

^۱ Monte Carlo simulation

^۲ Bayesian information-theoretic

^۳ Markov chain Monte Carlo simulation

^۴ Mean First-Order Second-Moment

^۵ Dimitriadis

^۶ Apel

^۷ Bozzi

^۸ Latin hypercube sampling

در نظر گرفتن نقاط هر مقطع به عنوان مولدهای عدم قطعیت، عدم قطعیت کلی مقطع هم به عنوان عاملی از ΔZ_{max} آن مقطع در نظر گرفته شده است.

۲. مبانی تئوری و روش‌ها

همان‌طور که عنوان شده است، تاکنون پژوهشی در خصوص تحلیل عدم قطعیت مقاطع رودخانه بر مدل هیدرودینامیک انجام نشده است. در پژوهش حاضر، اثر تغییر شکل مقاطع رودخانه در مشخصات جریان در حالت ماندگار با استفاده از شاخص‌های آماری محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪، ضریب تغییرات، ضریب پخشیدگی، نسبت ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار واقعی داده‌ها، و ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر انحراف از معیار داده‌ها در دو مثال از یک رودخانه‌ی فرضی و یک رودخانه‌ی واقعی تحلیل و مقایسه شده است.

۱.۲. حل معادله‌های حاکم بر جریان ماندگار

انواع جریان در کلنال‌های روباز به دو گروه جریان‌های ملندگار و غیرملندگار تقسیم می‌شوند. در جریان ماندگار در یک نقطه از مسیر، جریان با گذشت زمان تغییر نمی‌کند و در جریان غیرماندگار عکس این موضوع اتفاق می‌افتد. اساس معادله‌ی حاکم بر جریان ماندگار، معادله‌ی انرژی در دو مقطع متوالی است. انرژی در هر مقطع از رودخانه مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

$$E = y \cos^2 \theta + Z + \alpha \frac{Q^2}{A^2 2g} \quad (1)$$

که در آن، E انرژی مقطع، y عمق آب در مقطع، θ زاویه‌ی شیب کلنال، Z اختلاف ارتفاع از سطح مبنا، Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، g شتاب گرانش، و α ضریب تصحیح انرژی جنبشی هستند.

اگر دو مقطع متوالی از یک رودخانه در نظر گرفته شود، جریان با عبور از مقطع ۱ و رسیدن به مقطع ۲، دچار افت انرژی خواهد شد. معادله‌ی حاکم بین دو مقطع ۱ و ۲، مطابق معادله‌ی ۲ خواهد بود. مقدار افت انرژی نیز مطابق معادله‌ی ۳ محاسبه خواهد شد. [۳۳]

$$y_1 \cos^2 \theta + Z_1 + \alpha_1 \frac{Q^2}{A_1^2 2g} - h_f = y_2 \cos^2 \theta + Z_2 + \alpha_2 \frac{Q^2}{A_2^2 2g} \quad (2)$$

$$h_f = S_f L \quad (3)$$

که در آن، h_f افت انرژی است. L فاصله‌ی بین دو مقطع متوالی و S_f شیب خط انرژی است، که از معادله‌ی مانینگ (رابطه‌ی ۴) محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در آن، Q دبی جریان، A سطح مقطع، و R شعاع هیدرولیکی هستند. با حل معادله‌های اخیر و با در نظر گرفتن مقدار ثابت دبی، مشخصات جریان در هر مقطع تعیین می‌شود. در هر مرحله با تولید نقاط تصادفی، مقاطع تصادفی ساخته می‌شوند و از کنار هم قرار گرفتن مقاطع مذکور، رودخانه‌های تصادفی جدید تشکیل خواهند شد. این بدین معناست که هر بار مشخصات هندسی تصادفی جدیدی وارد معادله‌های مذکور می‌شوند و در هر مرحله با توجه به مشخصات هندسی جدید، خروجی‌های جریان محاسبه خواهد شد.

۲.۲. تعیین تابع توزیع احتمال جهت تولید مقاطع تصادفی

در روش‌های تحلیل عدم قطعیت استفاده از تابع توزیع احتمال مناسب، اهمیت بسیار ویژه‌ای در تسریع جواب دارد. مهم‌ترین عامل مؤثر در کیفیت نتایج

دهد، که ممکن است حالت‌های بالقوه‌ی شکست، عدم قطعیت‌ها، و خطرهای مرتبط را در نظر بگیرد. [۳۰]

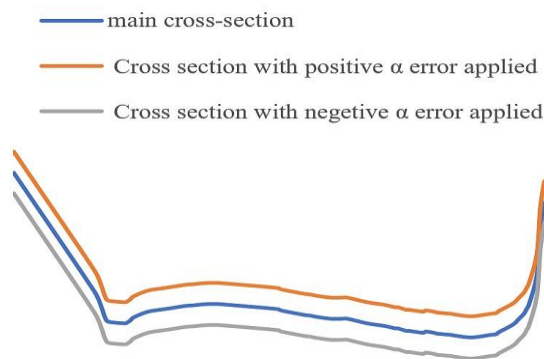
تاکنون بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی واسنجی، راستی‌آزمایی، و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولیکی در تحلیل جریان رودخانه‌ها انجام شده است. [۳۱] و [۳۲] درستی مدل‌سازی و سودمندی بررسی‌های اخیر به دقت اندازه‌گیری‌های میدانی و واسنجی مدل هیدرولیکی بستگی دارد. [۲۶] بنابراین لازم است در تحلیل نتایج مدل‌های هیدرولیکی، عدم قطعیت نتایج در نتیجه‌ی فراسنجه‌های مدل‌سازی بررسی شود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، تاکنون مطالعه‌ای که به‌طور خاص عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه را بررسی کند، انجام نشده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از روش مونت کارلو با تعیین توزیع مناسب به بررسی عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر دو مشخصه‌ی اصلی جریان، یعنی سرعت و سطح مقطع، با در نظر گرفتن خطا در برداشت هر نقطه از مقطع و لحاظ خطای کل مقطع پرداخته شده است. خطاهای تصادفی منجر به اندازه‌گیری‌هایی می‌شوند که به روشی غیرقابل پیش‌بینی دقیق نیستند و نتیجه‌گیری‌های کمتر قطعی را در پی دارند. علاوه بر وجود خطاهای تصادفی، توجه به امکان بروز خطاهای سیستماتیک نیز ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن دو خطای تصادفی و سیستماتیک در برداشت مشخصات هندسی مقاطع، به تحلیل مشخصه‌های جریان ماندگار پرداخته شده است. دقت شود که در رودخانه‌های دائمی، جریان غالب در رودخانه‌ها، عمدتاً ماندگار یا دست‌کم شبه‌ماندگار است. شبه‌ماندگار بدین معناست که با وجود دبی پایه در رودخانه‌ها، تغییرات زمانی سطح آب و دبی در مقاطع مختلف رودخانه کم است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. جریان غیرماندگار کامل در زمان سیلاب، رهاسازی ناگهانی سدها و نظایر آن‌ها رخ می‌دهد. از آنجایی که هدف بررسی عدم قطعیت مقاطع است، این امر به نوعی با ترازها و دبی‌های مختلف در مقاطع اتفاق می‌افتد. در جریان‌های غیرملندگار نیز اتفاق مشابهی رخ می‌دهد. از آنجایی که در پژوهش حاضر، تحلیل جریان ماندگار با دبی و ترازهای مختلف آب انجام شده است، تغییرات سطح آب و دبی در هر بار در مقطع و به نوعی عدم قطعیت مذکور لحاظ می‌شود و مشلبه جریان غیرماندگار خواهد بود. با روش ذکر شده، ساده‌سازی چشم‌گیری انجام می‌شود و پیچیدگی‌های مربوط به جریان غیرملندگار، مانند حل معادله‌های سنت-ونانت و پیچیدگی‌های مرتبط، تنوع شرایط مرزی و اولیه و تفکیک آثار آن‌ها در عدم قطعیت نهایی و امثال آن، وجود نخواهد داشت.

بروز خطای سیستماتیک، عدم قطعیت یکسانی را به مدل القا می‌کند، در حالی که خطاهای تصادفی برای هر یک از نقاط برداشت شده، مقدار متغیری خواهند داشت. تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر خروجی مدل هیدرودینامیک می‌تواند سبب تخمین مشخصات هندسی رودخانه به نتایج مطلوب با دقت کمتری شود. در پژوهش حاضر، به بررسی دو نوع خطای همزمان سیستماتیک و تصادفی با دو تابع احتمال مختلف در بررسی عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه در حل مدل‌های هیدرودینامیک پرداخته شده است. نکته‌ی قابل توجه در پژوهش حاضر، علاوه بر نکات ذکر شده این است که عدم قطعیت هم به‌صورت نقطه‌ای و هم به‌صورت مقطعی بررسی شده است. بدان معنا که در هر مقطع، خطا در برداشت هر نقطه (X, Z) می‌تواند یک عامل مستقل تولید عدم قطعیت باشد. جدا از

جدول ۱. شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت.

Row	Indicator	Formula	
1	95% Confidence Interval	-	-
2	Coefficient of Variation	$CV = \frac{\sigma}{\mu}$	(7)
3	Dispersion Index	$D = \frac{\sigma^2}{\mu}$	(8)
4	The ratio of 95% confidence interval to standard deviation	$BS = \frac{95\% \text{ bandwidth}}{\sigma}$	(9)
5	The ratio of the 95% confidence interval to the original value	-	-



شکل ۱. اعمال خطای α .

۴.۲. گام‌های اجرا شده

در هر مقطع، $\Delta Z_{\max}$ محاسبه شده است. مقدار خطای کل با در نظر گرفتن یک ضریب ثابت از $\Delta Z_{\max}$ محاسبه و کلیه نقاط (X, Z) هر مقطع به یک مقدار مطابق شکل ۱ جابجا شده‌اند. این اعمال خطا برای شش حالت با مقادیر ± 6 ، ± 3 ، و 0 درصد برای α اجرا شده است. پس از اعمال خطای یکسان برای همه‌ی نقاط، از هر نقطه به عنوان یک منبع عدم قطعیت به طور مجزا با استفاده از دو توزیع نرمال و یکنواخت، نقاط تصادفی جدیدی به تعداد زیاد تولید شده است. از تولید نقاط تصادفی، هر بار یک مقطع تصادفی جدید شکل گرفته و به این ترتیب رودخانه‌های تصادفی تولید شده‌اند. در جدول ۲، یک مقطع تولیدشده با توزیع نرمال با درصد خطاهای مختلف α و β ارائه شده است.

همان‌طور که ذکر شد، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی عدم قطعیت مشخصات هندسی بر خروجی‌های جریان است. به همین منظور از روش ذکرشده، مقاطع تصادفی جدیدی با خطاهای مشخص تولید شده است. در هر رودخانه‌ی تصادفی تولیدشده، معادله‌ی انرژی برای مقاطع متوالی حل و دو مشخصه‌ی جریان یعنی سرعت و سطح مقطع برای هر کدام از مقاطع تغییر یافته محاسبه شده است. محاسبات ذکرشده برای ۱۵ سناریوی عنوان شده در هر یک از توزیع‌های انتخابی به تعداد زیاد اجرا شده است. مشخصه‌های محاسبه‌شده‌ی جریان نیز با استفاده از شاخص‌های آماری ذکرشده در جدول ۱ تحلیل شده‌اند.

شبیه‌سازی، مناسب بودن تابع توزیع احتمال برای پارامترهای تصادفی است. [۳۴] انتخاب تابع چگالی احتمال فقط برای به دست آوردن نمونه‌ی پارامترها از فضای پارامتری مرتبط اهمیت دارد. [۳۵] پس از تعیین تابع توزیع احتمال مناسب، مشخصات هندسی رودخانه به طور تصادفی تولید می‌شوند. به دلیل تبعیت خطای پدیده‌های طبیعی از توزیع نرمال، فضای پارامتری یک بار با استفاده از توزیع نرمال و جهت بررسی اثر توزیع انتخابی در عدم قطعیت‌های خروجی، یک بار با استفاده از توزیع یکنواخت ایجاد شده است.

۳.۲. تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه با استفاده از روش مونت کارلو

تحلیل عدم قطعیت نیازمند شناسایی منابع مولد عدم قطعیت و تحلیل آماری آن‌ها به منظور دستیابی به نمونه‌های تصادفی با شمار زیاد است. [۳۶] در پژوهش حاضر، منابع عدم قطعیت برآورد مشخصات هندسی رودخانه، نقاط (X, Z) هستند، که دقت در برداشت آن‌ها با دقت نقشه‌بردار، روش نقشه‌برداری، و... ارتباط مستقیم دارد. نقاط (X, Z) می‌توانند در هر نقطه از محدوده‌ی باند عدم قطعیت وجود داشته باشند؛ بنابراین، انتخاب تصادفی آن‌ها می‌تواند مقطع جدیدی با مشخصات هندسی جدید را تولید کند. نقاط (X, Z) با توجه به توزیع‌های احتمالاتی عنوان شده از باند عدم قطعیت به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. اساس کار روش‌های تحلیل عدم قطعیت، نمایش ترکیب‌های تصادفی با تولید آن‌ها با توجه به حالت‌های ممکن از عدم قطعیت‌هایی است که در یک مطالعه رخ می‌دهند. بنابراین، با انتخاب نقاط تصادفی از باند عدم قطعیت، مقاطع جدید رودخانه بارها تولید و سپس متناظر با هر یک از مقاطع تولیدشده، مشخصات هندسی محاسبه و وارد مدل هیدرودینامیک می‌شوند. این عمل بارها تکرار و منتج به ایجاد تعداد زیادی نتایج مستقل و جداگانه خواهد شد. در مطالعه‌ی حاضر، نقاط (X, Z) در هر مقطع با 5 ، 10 ، و 20 درصد خطا و کل مقطع ± 6 ، ± 3 ، و 0 درصد در ۱۵ سناریو برای هر کدام از دو توزیع نرمال و یکنواخت تولید شده‌اند. روابط 5 و 6 ، نحوه‌ی تولید نقاط تصادفی جدید را نشان می‌دهند:

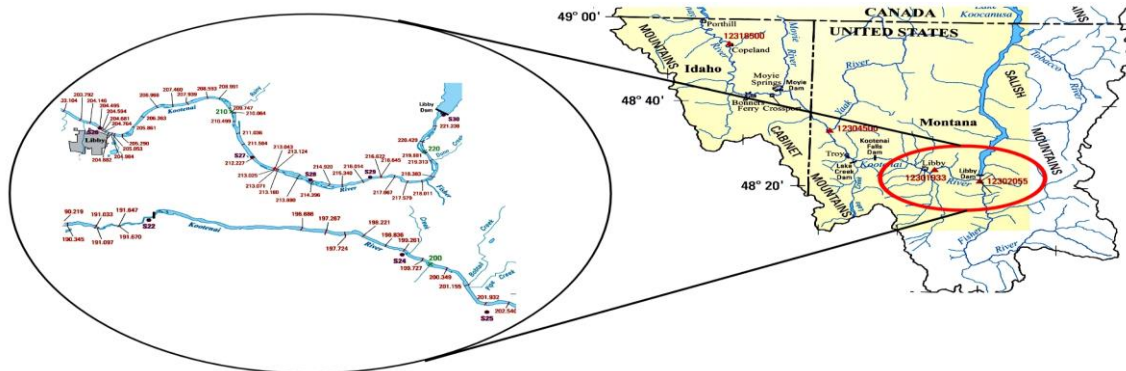
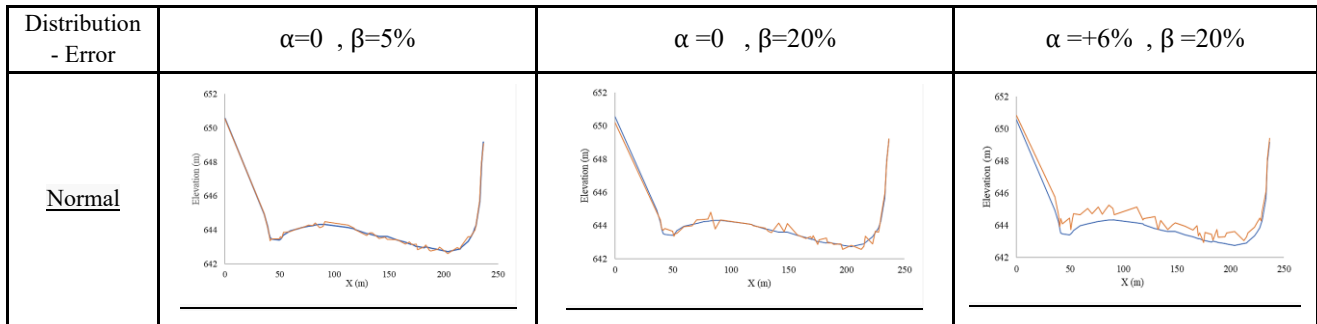
$$\Delta Z_{\max} = Z_{\max} - Z_{\min} \quad (5)$$

$$Z_i = Z_i \pm \alpha \Delta Z_{\max} + \beta \Delta Z_{\max} \quad (6)$$

که در آن‌ها، $\Delta Z_{\max}$ بیشینه‌ی اختلاف ارتفاع نقاط هر مقطع را محاسبه می‌کند. $\alpha \Delta Z_{\max}$ در هر مقطع برای مقادیر ± 6 ، ± 3 ، و 0 درصد برای α اجرا می‌شود. در واقع α بیانگر خطای سیستماتیک مدل است و برای هر مقطع مقدار ثابتی دارد و به آن معناست که $\alpha \Delta Z_{\max}$ کل مقطع را به سمت پایین یا بالا جابجا می‌کند. β بیانگر خطای تصادفی در برداشت هر نقطه است و عدم قطعیت مستقل هر نقطه را نشان می‌دهد و برای هر نقطه از مقطع با توجه به توزیع انتخابی، میزان متغیری دارد و در واقع باعث نوسان مقدار Z در هر نقطه می‌شود. در پژوهش حاضر، مقادیر β با خطاهای 5 ، 10 ، و 20 درصد با دو توزیع نرمال و یکنواخت تولید شده‌اند. Z_i نیز ارتفاع هر نقطه را نشان می‌دهد.

در هر سناریو، تعداد زیادی مجموعه‌ی پارامتر به عنوان پارامترهای ورودی مدل نمونه‌گیری شده‌اند. مدل‌سازی جریان با استفاده از مجموعه‌ی پارامترهای تولیدشده اجرا و نتایج هر اجرا به صورت مجزا ذخیره شده است. برای تحلیل نتایج خروجی و تعیین میزان عدم قطعیت پارامترهای خروجی از ۵ شاخص آماری مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۲. مقاطع تصادفی تولید شده با درصد خطاهای مختلف.



شکل ۲. موقعیت رودخانه‌ی کوتنای.

حاصل از مدل‌سازی با استفاده از شاخص‌های آماری انجام شده است. فلوچارت روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. تحلیل عدم قطعیت آزمون مثال بررسی شده اول

برای محاسبه‌ی شاخص‌های آماری در تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی در حالت تحلیل رودخانه‌ای پس از اجرای مدل و محاسبه‌ی سرعت و سطح مقطع، میانگین سرعت‌ها به‌عنوان سرعت رودخانه و میانگین سطوح مقطع محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای سرعت و سطح مقطع به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. تغییر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع، نشانگر افزایش خطای نقاط در هر دو توزیع است، که موجب بروز تغییرهای بیشتری در خروجی‌های جریان می‌شود. ضریب تغییرات در واقع پراکندگی داده‌ها حول میانگین را نشان می‌دهد؛ که نشان‌دهنده‌ی نسبت انحراف معیار استاندارد به میانگین است. هر چه میزان ضریب تغییرات کمتر باشد، بدین معناست که پراکندگی در اطراف نقطه‌ی میانگین کمتر است و داده‌ها یکدست‌تر هستند. هر چه میزان ضریب تغییرات بالاتر باشد، نشانه‌ی پراکندگی و فاصله‌ی بیشتر داده‌ها از میانگین است. مطابق جدول‌های ۳ و ۴، با افزایش خطا در برداشت نقاط، میزان ضریب تغییرات افزایش یافته است. همچنین با توجه به جدول‌های مذکور، مقادیر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع در حالت مقطع کلی ثابت، برای هر کدام از دو توزیع بررسی‌شده، روند نسبتاً ثابتی را در بر گرفته است.

با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪، سرعت و سطح مقطع با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط افزایش یافته است. نتایج حاصل از مقایسه‌ی دو توزیع نرمال و یکنواخت در محاسبه‌ی ضخامت باند مذکور

۲.۵. آزمون مثال بررسی شده ارائه‌شده از مقاطع رودخانه جهت مدل‌سازی

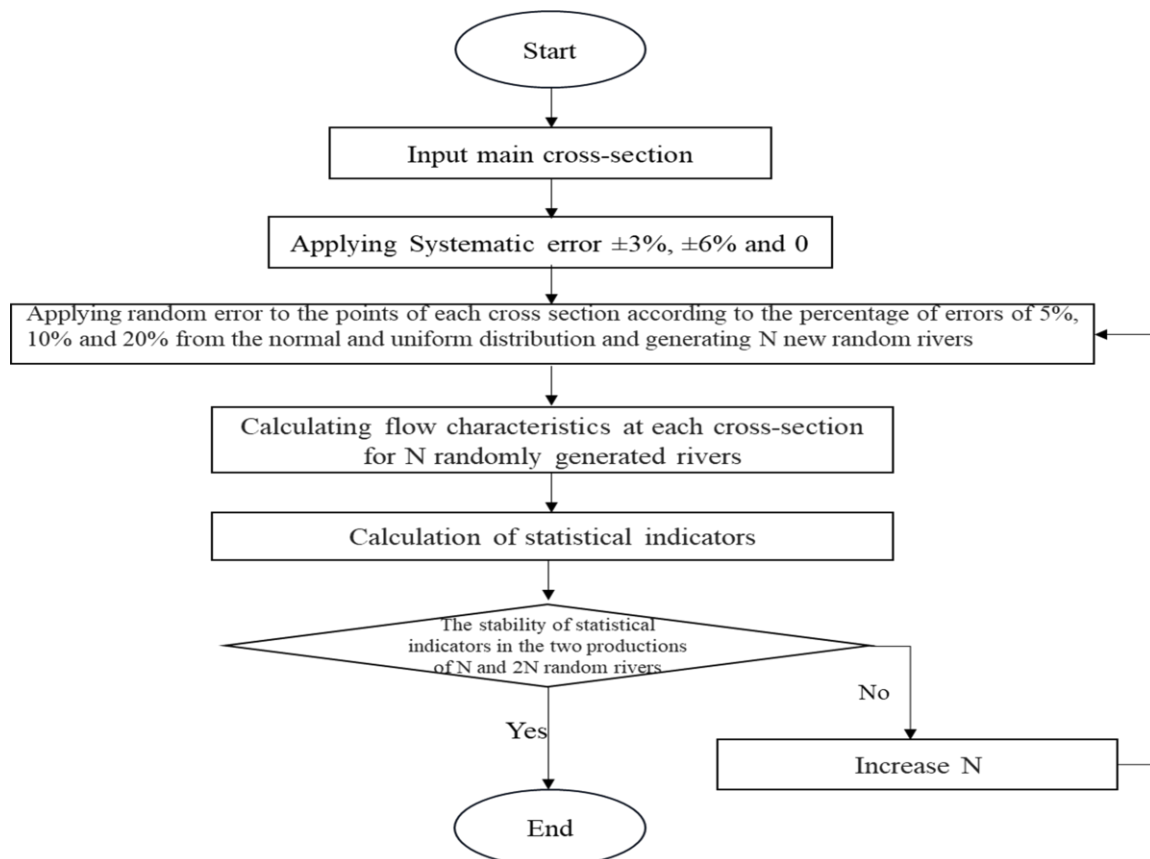
در تعیین رودخانه‌ی مناسب برای مدل‌سازی این نکته حائز اهمیت است که علاوه بر اینکه مقاطع قابل اعتماد باشند، داده‌های در دسترس نیز برای طول قابل قبولی از رودخانه موجود باشند. قابل اعتماد بودن به آن معناست که مقاطع از دید مهندسی قابل پذیرش بوده و شکل منطقی داشته باشند. به منظور ارزیابی و کاربرد روش تحلیل عدم قطعیت پیشنهادی، دو آزمون ارائه شده است، که در مثال بررسی شده اول، مقاطع ساده از یک رودخانه‌ی فرضی به طول ۱۲ کیلومتر و با تعداد ۲۸ مقطع ارزیابی شده‌اند. در مثال بررسی شده دوم، نیز عدم قطعیت مقاطع یک رودخانه‌ی واقعی به طول ۴۵ کیلومتر با تعداد ۴۵ مقطع تحلیل شده است.

۲.۱.۵. آزمون مثال بررسی شده اول: مدل‌سازی با عدم قطعیت در مقاطع ساده‌ی یک رودخانه‌ی فرضی

برای تولید رودخانه‌ی فرضی با مقاطع منظم ۲۸ مقطع عرضی با تعداد نقاط برداشت‌شده‌ی مختلف تولید شده است، که مجموعه‌ی آن‌ها یک رودخانه‌ی فرضی به طول ۱۲ کیلومتر را تشکیل داده‌اند.

۲.۲.۵. آزمون مثال بررسی شده دوم: مدل‌سازی با عدم قطعیت در مقاطع یک رودخانه‌ی واقعی

پس از بررسی مقاطع چند رودخانه‌ی مختلف، به منظور راستی‌آزمایی ارائه‌شده با داده‌های واقعی، در نهایت بخشی از رودخانه‌ی کوتنای به‌عنوان رودخانه‌ی مورد مطالعه انتخاب شده است؛ که از کشور کانادا سرچشمه می‌گیرد و از دو ایالت آیداهو و مونتانا می‌گذرد و سپس به کانادا باز می‌گردد. بازه‌ی مطالعه‌شده در نوشتار حاضر در محدوده‌ی طول و عرض جغرافیایی (۴۸° ۲۰' - ۴۸° ۳۰' و ۱۱۵° ۴۵' - ۱۱۵° ۲۰') قرار دارد (شکل ۲). [۳۷] داده‌های مقاطع بازه‌ی مذکور به طول ۴۵ کیلومتر و ۴۵ مقطع برداشت شده است. طبق توضیحات بیان‌شده از مقاطع رودخانه‌ی کوتنای، مقاطع تصادفی تولید و ارزیابی نتایج



شکل ۳. فلوچارت روش استفاده شده در پژوهش حاضر.

جدول ۳. شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سرعت در جریان ماندگار رودخانه ای فرضی.

Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.019	0.038	0.021	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04
	Thickness of 95% confidence interval	0.1	0.2	0.1	0.2	0.11	0.2	0.1	0.21	0.1	0.22
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.13	0.24	0.13	0.24	0.13	0.24	0.13	0.25	0.13	0.27
	Dispersion	0.0003	0.0014	0.0003	0.0015	0.0003	0.0015	0.0003	0.0015	0.0003	0.0014
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.1	6	6	6	6	6.2	6	6.35	6.3
10%	coefficient of variation	0.046	0.081	0.047	0.084	0.048	0.084	0.046	0.083	0.046	0.08
	Thickness of 95% confidence interval	0.22	0.4	0.24	0.4	0.23	0.4	0.24	0.4	0.24	0.41
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.26	0.5	0.28	0.5	0.28	0.5	0.29	0.5	0.29	0.5
	Dispersion	0.0018	0.0055	0.0019	0.0058	0.0019	0.0058	0.0018	0.0056	0.0018	0.0058
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.3	6	6	6	6	6	6.3	6	6.3	6.1
20%	coefficient of variation	0.086	0.17	0.087	0.17	0.085	0.17	0.089	0.17	0.088	0.17
	Thickness of 95% confidence interval	0.44	0.9	0.44	0.95	0.43	0.95	0.45	0.93	0.47	0.91
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.56	1.1	0.54	1.15	0.5	1.16	0.5	1.14	0.58	1.1
	Dispersion	0.006	0.02	0.006	0.025	0.006	0.025	0.006	0.025	0.0064	0.02
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.5	6.2	6.6	6.1	6.6	6.2	6.6	6.5	6.5

جدول ۴: شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای سطح مقطع در جریان ماندگار رودخانه فرضی.

Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.018	0.035	0.018	0.036	0.019	0.036	0.018	0.036	0.018	0.036
	Thickness of 95% confidence interval	31.39	59	31.9	58	31.1	58	31.5	59.2	31.2	60.7
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.11	0.21	0.11	0.21	0.11	0.21	0.11	0.22	0.11	0.22
	Dispersion	0.09	0.35	0.09	0.35	0.09	0.36	0.09	0.35	0.093	0.35
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.3	6	6.2	6.2	6.2	6	6.2	6.2	6.2	6.2
10%	coefficient of variation	0.04	0.071	0.04	0.071	0.04	0.071	0.04	0.071	0.04	0.072
	Thickness of 95% confidence interval	68	118	68.5	117	68	116.9	68	117	66.4	116.3
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.25	0.43	0.25	0.43	0.25	0.42	0.25	0.43	0.24	0.42
	Dispersion	0.43	1.4	0.44	1.4	0.44	1.4	0.43	1.4	0.43	1.4
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6	6.3	6	6.2	6	6.3	6	6.2	6
20%	coefficient of variation	0.074	0.14	0.077	0.14	0.075	0.14	0.076	0.14	0.076	0.14
	Thickness of 95% confidence interval	128	230.4	130	230	129	233	126.5	230	129	229.8
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.47	0.86	0.46	0.87	0.47	0.88	0.46	0.87	0.47	0.84
	Dispersion	1.5	5.5	1.58	4.5	1.5	6.5	1.6	6.5	1.5	5.5
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.1	6.3	6.1	6.2	6.1	6.3	6.1	6.2	6.1

در هر سناریو است. با افزایش خطا و در نتیجه‌ی آن، افزایش ضخامت باند اطمینان ۹۵٪، بدیهی است که انحراف معیار داده‌ها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، حاصل تقسیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها در هر سناریو حول محور ثابتی با نوسان کم در تغییر است.

۲.۳. تحلیل عدم قطعیت آزمون مثال بررسی شده دوم

پس از تحلیل عدم قطعیت، مشخصات هندسی یک رودخانه‌ی فرضی جهت راستی‌آزمایی و مقایسه‌ی نتایج حاصل، به تحلیل عدم قطعیت مقاطع واقعی حاصل از نقشه‌برداری رودخانه کوتنای پرداخته شده است. نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای سرعت و سطح مقطع رودخانه کوتنای به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن‌ها، با افزایش خطا در برداشت نقاط، میزان ضریب تغییرات افزایش یافته است. مقادیر ضریب تغییرات سرعت و سطح مقطع در حالت مقطع کلی ثابت، برای هر کدام از دو توزیع بررسی‌شده، روند نسبتاً ثابتی را در بر گرفته است. ضریب تغییرات سرعت در سه خطای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد از توزیع نرمال با ثابت‌بودن شکل کلی مقطع، به ترتیب مقداری برابر با ۰/۰۱۷، ۰/۰۳۶، و ۰/۰۷ داشته است. مقادیر مذکور در خطای اعمال‌شده با توزیع یکنواخت تقریباً دو برابر شده و به ترتیب مقادیر ۰/۰۳، ۰/۰۶، و ۰/۱۳ را در بر گرفته است.

در تحلیل روند ضریب تغییرات سطح مقطع نیز برای مقدار ثابت $\alpha=0$ در سه خطای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد از توزیع نرمال طبق جدول ۶ به ترتیب مقدار ضریب تغییرات برابر با ۰/۰۱۵، ۰/۰۳۱، و ۰/۰۶۱ بوده است؛ که در خطای اعمال‌شده با توزیع یکنواخت افزایش یافته و به ترتیب مقادیر ۰/۰۵۸، ۰/۰۷۱، و ۰/۱۱ را شامل شده‌اند. بنابراین، افزایش عدم قطعیت در داده‌های مربوط به نقاط مقطع باعث افزایش پراکندگی خروجی‌های جریان خواهد شد. با

نشان داد در مقاطعی که نقاط آن‌ها با استفاده از خطای یکنواخت تولید شده‌اند، عدم قطعیت بیشتری وجود دارد. حال اگر درصد خطای نقاط مقاطع در هر کدام از دو توزیع مذکور ثابت در نظر گرفته شود و خطای کل مقطع افزایش یابد، ضخامت باند عدم قطعیت سرعت و سطح مقطع برای ۵ سناریو با خطاهای $\pm 3\%$ ، و 0% درصد در مقطع با در نظر گرفتن مقادیر β ثابت، تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد.

شاخص دیگری که در پژوهش حاضر، ارزیابی شده است، حاصل تقسیم ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار اولیه‌ی حاصل از مدل‌سازی جریان با شکل اصلی مقطع است. همان‌طور که بیان شد، افزایش خطا در برداشت نقاط مقطع باعث افزایش محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ خواهد شد. بدیهی است تقسیم این مقدار بر مقدار اولیه‌ی متغیر مورد مطالعه با افزایش خطا، رابطه‌ی مستقیم دارد. مقایسه‌ی مقادیر شاخص ذکر شده در تغییر شکل کلی مقطع با درصد تغییرات مذکور نشان داد نوسان کلی دره‌ی رودخانه، تغییری در محاسبه‌ی شاخص اخیر ایجاد نخواهد کرد. بررسی شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع در تکرار سناریوهای مطرح‌شده با درصد خطاهای عنوان‌شده نیز نشان داد که افزایش خطا باعث افزایش شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع خواهد شد. با افزایش میزان خطا و در نتیجه‌ی آن، افزایش ضریب تغییرات، انحراف از معیار، و میانگین داده‌ها افزایش خواهد یافت. این افزایش در خطای اعمال‌شده توسط توزیع یکنواخت بیشتر از خطای اعمال‌شده توسط توزیع نرمال برآورد شده است و همانند سه شاخص بررسی‌شده‌ی دیگر با افزایش خطای کل رودخانه، تغییری در روند آن مشاهده نشده است. شاخص دیگری که برای تحلیل کمی خروجی‌های جریان در پژوهش حاضر استفاده شده است، حاصل تقسیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها

جدول ۵: شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سرعت در جریان ماندگار رودخانه کوتناي.

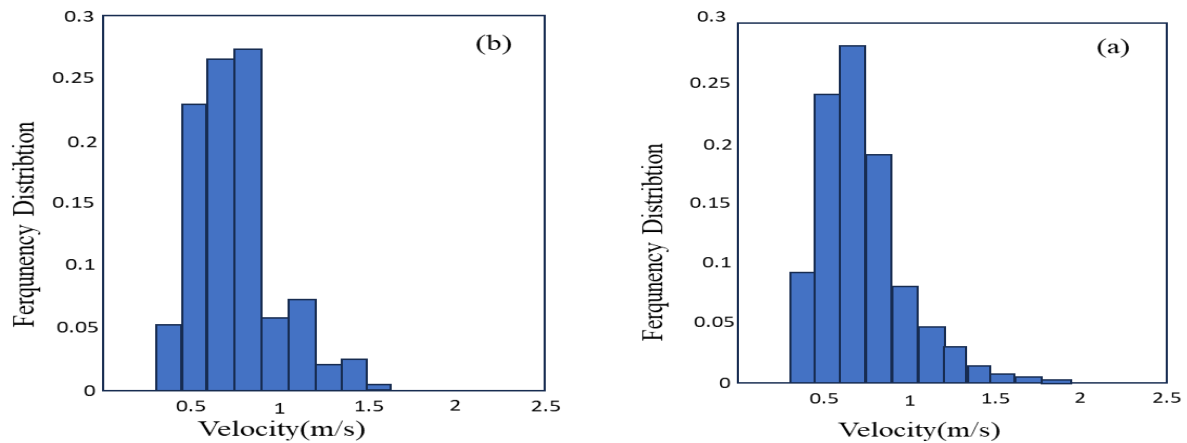
Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.0175	0.03	0.017	0.03	0.017	0.03	0.017	0.03	0.0172	0.03
	Thickness of 95% confidence interval	0.0816	0.15	0.08	0.15	0.08	0.16	0.08	0.16	0.0802	0.15
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.108	0.2	0.11	0.2	0.11	0.2	0.11	0.2	0.1057	0.2
	Dispersion	0.00023	0.0008	0.0002	0.0008	0.00021	0.0008	0.00022	0.0008	0.00022	0.0008
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.18	6.1	6.24	6	6.13	6	6.13	6.2	6.22	6.1
10%	coefficient of variation	0.037	0.068	0.037	0.06	0.036	0.06	0.035	0.066	0.036	0.065
	Thickness of 95% confidence interval	0.17	0.32	0.18	0.32	0.17	0.31	0.17	0.3	0.17	0.3
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.23	0.4	0.23	0.4	0.22	0.4	0.22	0.4	0.23	0.4
	Dispersion	0.001	0.0033	0.001	0.0033	0.001	0.0033	0.0009	0.0033	0.0009	0.0033
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.3	6.4	6.3	6.4	6.3	6.3	6.5	6.2	6.33	6.3
20%	coefficient of variation	0.071	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.07	0.13	0.069	0.13
	Thickness of 95% confidence interval	0.34	0.7	0.34	0.7	0.33	0.67	0.33	0.67	0.34	0.67
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.44	0.93	0.44	0.9	0.44	0.88	0.46	0.86	0.45	0.88
	Dispersion	0.0037	0.013	0.0037	0.013	0.0035	0.013	0.0036	0.013	0.0035	0.013
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.4	7.1	6.4	6.9	6.6	7	6.4	6.7	6.6	7

جدول ۶: شاخص های عدم قطعیت رودخانه ای سطح مقطع در جریان ماندگار رودخانه کوتناي.

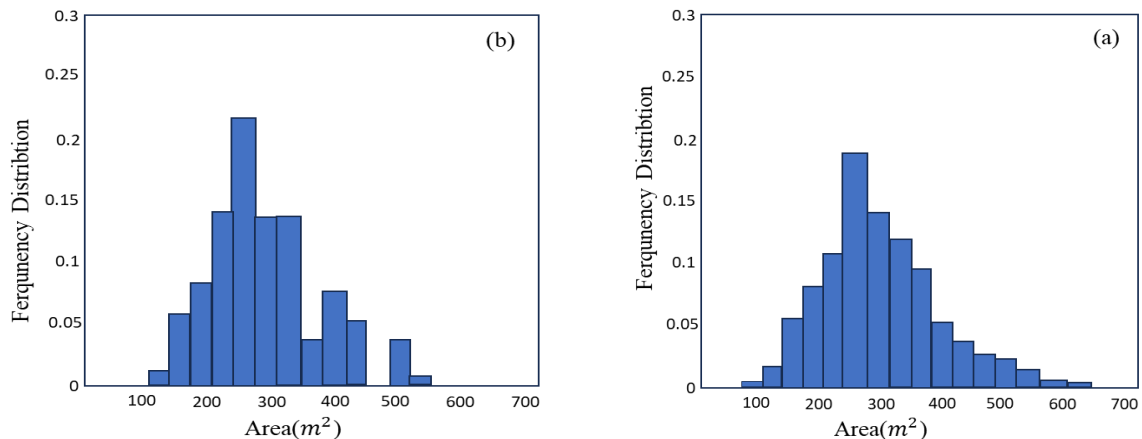
Index- Distribution		-6%		-3%		0		+3%		+6%	
		Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform	Uniform	Normal	Uniform	Normal	Uniform
5%	coefficient of variation	0.015	0.03	0.015	0.03	0.015	0.03	0.015	0.03	0.015	0.03
	Thickness of 95% confidence interval	27.6	52.7	27.7	53.2	27.4	51	28	53.4	27.5	52.7
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.095	0.18	0.095	0.18	0.1	0.18	0.095	0.18	0.094	0.17
	Dispersion	0.068	0.26	0.067	0.26	0.067	0.25	0.066	0.25	0.067	0.25
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.2	6.13	6.2	6.13	6.27	6.13	6.26	6.13	6.16	6
10%	coefficient of variation	0.031	0.06	0.031	0.057	0.031	0.058	0.031	0.058	0.031	0.058
	Thickness of 95% confidence interval	58.9	107	60.5	106.5	60	105.3	58	103.9	58.8	104
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.2	0.35	0.2	0.37	0.2	0.35	0.2	0.33	0.2	0.36
	Dispersion	0.29	1	0.29	1	0.29	1	0.31	1	0.31	1
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.44	6	6.3	6.14	6.3	6.1	6.3	6.2	6.3	6.1
20%	coefficient of variation	0.061	0.11	0.06	0.11	0.061	0.11	0.065	0.11	0.06	0.11
	Thickness of 95% confidence interval	113.3	207	113.1	206.5	114.3	206.3	113	212	114.3	206.2
	Actual value of the characteristic/thickness 95% confidence interval	0.4	0.71	0.39	0.73	0.39	0.71	0.39	0.71	0.4	0.71
	Dispersion	1.1	3.7	1.07	3.8	1.1	3.7	1.1	3.7	1.08	3.7
	Standard deviation/thickness of 95% confidence interval	6.4	6.2	6.25	6.2	6.24	6	6.2	6.1	6.38	6.1

خطای ۵٪ به ضخامت ۰/۱۷ متر بر ثانیه در خطای ۱۰٪ و در نهایت به ضخامت ۰/۳۳ متر بر ثانیه در خطای ۲۰٪ رسیده است. در تحلیل خروجی های سطح مقطع نیز این روند حفظ شده است، به گونه ای که ضخامت باند اخیر در مقاطع تصادفی حاصل از توزیع نرمال برای خطاهای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد به ترتیب ۲۷/۴، ۶۰، و ۱۱۴/۳ مترمربع بوده است. مقادیر ارائه شده برای مقاطع تصادفی حاصل از توزیع یکنواخت افزایش یافته و به ترتیب ۵۱، ۱۰۵/۳، و ۲۰۶/۳ مترمربع بوده است. همچنین مطابق نتایج حاصل از

مقایسه ی ضریب تغییرات برای مقادیر مختلف α با ثابت بودن شکل کلی مقطع در کلیه ی سناریوهای جدول های ۵ و ۶ نیز می توان دریافت که تغییر یکسان کلیه ی نقاط مقطع در محاسبه ی ضریب تغییرات اثر گذار نیست. با توجه به جدول های ۵ و ۶، ضخامت محدوده ی اطمینان ۹۵٪ سرعت و سطح مقطع با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط افزایش یافته است. به گونه ای که در مقاطع تصادفی تولید شده با استفاده از توزیع نرمال، ضخامت این باند در تحلیل سرعت خروجی، بدون تغییر کلی مقطع از حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه در



شکل ۴. توزیع فراوانی سرعت: (a) توزیع یکنواخت، (b) توزیع نرمال.



شکل ۵. توزیع فراوانی سطح مقطع: (a) توزیع یکنواخت، (b) توزیع نرمال.

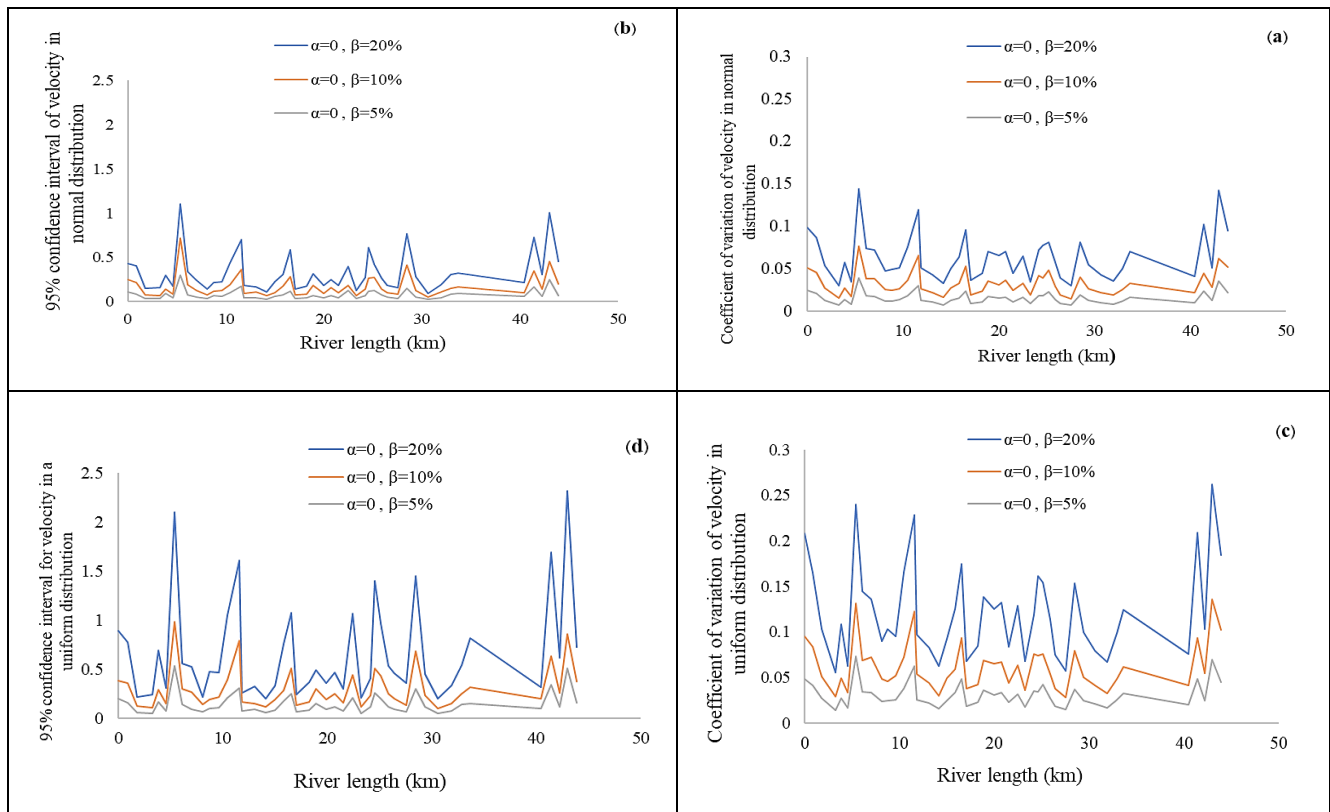
افزایش شاخص مذکور شده است. حاصل تقسیم ضخامت باند اطمینان ۹۵٪ بر انحراف معیار داده‌ها در هر سناریو نیز مطابق رودخانه‌ی فرضی حول محور ثابتی در تغییر بوده است. برای درک بهتر اثر خطای برداشت نقاط و اثر توزیع انتخابی در خروجی‌های جریان، برای چند سناریو از سناریوهای مطرح‌شده، نمودارهای توزیع فراوانی رودخانه‌ای رسم شده است. نمودارهای فراوانی سرعت و سطح مقطع برای خطای ۲۰٪ از هر دو توزیع، در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، گستردگی طیف داده‌های سرعت و سطح مقطع در خطای یکنواخت در مقایسه با خطای نرمال بیشتر بوده است. مطابق شکل ۴، مقادیر سرعت در توزیع نرمال دارای بازه‌ی کمتری هستند، که این گستردگی در توزیع یکنواخت بیشتر بوده است. در نتایج حاصل از فراوانی سطح مقطع در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود سطح مقطع در خطای توزیع یکنواخت بازه‌ی ۱۰۰-۵۵۰ مترمربعی را شامل می‌شود، در حالی که با همان درصد خطا در توزیع یکنواخت، این بازه حدوداً ۵۰-۶۵۰ مترمربع است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در تولید نقاط تصادفی با توزیع نرمال از هر نقطه با میانگین خودش در مقطع اصلی و انحراف معیاری برابر با خطای در نظر گرفته‌شده، نقاط جدیدی تولید شده است. این در حالی است که در تولید نقاط تصادفی با توزیع یکنواخت، احتمال بروز هر نقطه در محدوده‌ی تعیین‌شده یکسان است. بدیهی است که نوسان نقاط تصادفی تولیدشده با توزیع نرمال کمتر از نوسان نقاط تصادفی تولیدشده با توزیع یکنواخت بوده است. بنابراین، مقاطع تصادفی حاصل از تولید نقاط با توزیع یکنواخت، تغییرات بیشتری

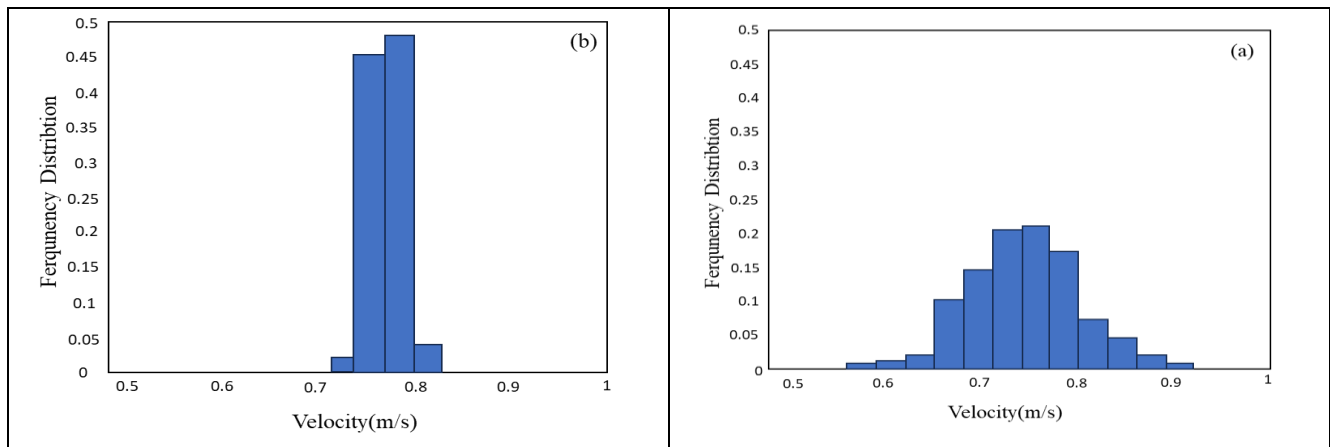
محاسبه‌ی محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ رودخانه‌ی فرضی، افزایش خطای کل مقطع، اثر چندانی در ضخامت باند عدم قطعیت سرعت و سطح مقطع در هیچ‌یک از ۵ سناریوی ذکرشده نداشته است. مطابق جدول ۵، برای خطای ثابت با بتای ۵٪ از توزیع نرمال، مقادیر ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ سرعت در حدود ۰/۰۸ متر بر ثانیه بوده است. این مقادیر در بتای ۱۰٪ از توزیع نرمال به عدد ثابت ۰/۱۷ متر بر ثانیه رسیده و در بتای ۲۰٪ از توزیع نرمال، حدوداً ۰/۳۳ متر بر ثانیه بوده است، که نشان می‌دهد خطایی که شکل اصلی مقطع را تغییر ندهد، اثر چشمگیری در ضخامت محدوده‌ی اطمینان نخواهد داشت. همچنین توزیع یکنواخت در محاسبه‌ی شاخص اخیر، عدم قطعیت خروجی بیشتری را به دنبال دارد.

حاصل تقسیم ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بر مقدار اولیه‌ی حاصل از مدل‌سازی جریان برای سرعت بدون در نظر گرفتن خطای کل مقطع، برای خطاهای ۵، ۱۰، و ۱۵ درصد از توزیع نرمال به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲۲، و ۰/۳۳ و برای همان درصد خطا از توزیع یکنواخت به ترتیب برابر با ۰/۲، ۰/۴، و ۰/۶۷ بوده است. مقادیر ذکرشده برای سطح مقطع جریان به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۲، و ۰/۳۹ برای خطای حاصل از توزیع نرمال و ۰/۱۸، ۰/۳۵، و ۰/۷۱ برای خطای حاصل از توزیع یکنواخت بوده است، که با نتایج حاصل از آزمون مثال بررسی شده فرضی در تطابق است.

بررسی شاخص پراکندگی سرعت و سطح مقطع در تکرار سناریوهای مطرح‌شده با درصد خطاهای عنوان‌شده نیز نشان داد که افزایش خطا باعث



شکل ۶. (a) و (b) به ترتیب ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان سرعت در توزیع یکنواخت؛ (c) و (d) به ترتیب ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان سرعت در توزیع نرمال.



شکل ۷. (a) توزیع فراوانی سرعت مقطعی در مقطع تولیدشده با توزیع یکنواخت با خطای ۲۰٪، (b) توزیع فراوانی سرعت مقطعی در مقطع تولیدشده با توزیع نرمال با خطای ۵٪

محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ در تمامی مقاطع افزایش یافته است. عدم یکسان بودن ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ بیانگر این مطلب است که هر مقطع مستقلاً عدم قطعیتی را به خروجی‌های مدل القا می‌کند. ضریب تغییرات، شاخص پراکندگی، و حاصل تقسیم ضخامت باند در هر مقطع بر مقدار واقعی مشخصه‌ی مطالعه‌شده در آن مقطع، یعنی سرعت و سطح مقطع، با افزایش خطا، با نوسان بیشتری در تغییر است. مشابه تحلیل نتایج رودخانه‌ای، میزان نوسان شاخص‌های ذکرشده در مقاطع تولیدشده با توزیع یکنواخت از مقاطع تولیدشده با توزیع نرمال بیشتر بوده است. تحلیل شاخص‌های آماری سطح مقطع رودخانه نیز در هر دو مثال بررسی شده بررسی‌شده نیز همین روند را داشته است. در شکل ۷-الف، فراوانی داده‌های سرعت در تکرارهای مختلف از یک مقطع دلخواه با خطای یکنواخت ۲۰٪ از نقاط برداشت‌شده و در شکل ۷-ب، فراوانی داده‌های

داشته‌اند. بنابراین، خطا در توزیع یکنواخت دارای عدم قطعیت بیشتری نسبت به خطا در توزیع نرمال بوده است.

۱.۲.۳. مقایسه‌های مقطعی

تا کنون به بررسی نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت رودخانه‌ای پرداخته شده است. در گام بعد، تحلیل کلیه‌ی نتایج به صورت مقطع به مقطع انجام شده است. در شکل ۶، شاخص‌های مقطعی سرعت در $\alpha=0$ برای حالت‌های مختلف عدم قطعیت نقاط برای دو شاخص ضریب تغییرات و محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ در دو توزیع نرمال و یکنواخت مشاهده می‌شوند.

مطابق شکل ۶، در تحلیل نتایج حاصل از شاخص‌های عدم قطعیت مقطعی سرعت به نظر می‌رسد با افزایش میزان خطا در برداشت نقاط، ضخامت

محاسبه‌ی شاخص‌های عدم قطعیت نتایج نشان داد با افزایش خطا، روند تغییرات پراکندگی داده‌ها، ضخامت محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪، ضریب تغییرات، و حاصل تقسیم مقدار واقعی هر مشخصه بر انحراف از معیار آن، مشخصه‌ی افزایشی است که به معنای بروز عدم قطعیت بیشتر در خروجی‌های مدل است. با در نظر گرفتن خطاهای تصادفی ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد و خطای سیستماتیک صفر، ضخامت باند عدم قطعیت سرعت به ترتیب مقادیر ۰/۸، ۰/۱۷، و ۰/۳۳ را در بر می‌گیرد. با افزایش میزان خطا، ضخامت محدوده‌ی اخیر افزایش یافته است. تغییرات محدوده‌ی مذکور و سایر آماره‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر در حالت توزیع نرمال تا خطای ۲۰٪ به گونه‌ای است که شرایط حاکم بر جریان را به هم نمی‌زنند.

با در نظر گرفتن ۲۰٪ خطای تصادفی و خطاهای سیستماتیک ± 3 ، ± 6 ، و ۰ درصد محدوده‌ی اطمینان ۹۵٪ سرعت و سطح مقطع تقریباً ثابت است و نشان می‌دهد که بروز خطاهای سیستماتیک، عدم قطعیتی را به مدل وارد نخواهد کرد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داده است که تعیین تابع توزیع خطا، یکی از مهم‌ترین عوامل در تسطیح داده‌های نقشه‌برداری به شمار می‌رود. عدم قطعیت با در نظر گرفتن خطای یکنواخت در مقایسه با خطای نرمال به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

سرعت در تکرارهای مختلف از یک مقطع دلخواه با خطای نرمال ۵٪ و خطای ۱۰٪ از کل مقطع مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، فراوانی داده‌ها در درصد خطای نرمال ۵٪ در بازه‌ی کمتری در نوسان هستند؛ لذا، مقادیر خروجی بسیار به هم نزدیک هستند. با افزایش خطا، فراوانی هر بازه کم و گستردگی داده‌ها بیشتر شده است. به گونه‌ای که در مقاطع تصادفی تولیدشده از مقطع شماره‌ی ۴۱ رودخانه کوتنای، خطای نرمال ۵٪ بیشترین فراوانی در کمترین بازه‌ی تغییرات و خطای یکنواخت ۲۰٪، کمترین فراوانی در بیشترین بازه‌ی تغییرات را داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

عدم قطعیت در داده‌های ورودی جزء جدانشدنی مدل‌سازی‌های هیدرولیکی است. در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن دو نوع خطای سیستماتیک و تصادفی در ۱۵ سناریو به تحلیل عدم قطعیت مشخصات هندسی رودخانه بر مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار پرداخته شده است. مقاطع تصادفی با در نظر گرفتن خطاهای سیستماتیک ± 3 ، ± 6 ، و ۰ درصد و خطاهای ۵، ۱۰، و ۲۰ درصد تصادفی با دو توزیع نرمال و یکنواخت برای هر سناریو به تعداد ۸۰۰ بار تولید و به عنوان عامل عدم قطعیت در نتایج خروجی مدل هیدرودینامیک در حالت جریان ماندگار تحلیل شده‌اند.

با در نظر گرفتن تبعیت خطای تصادفی نقشه‌برداری از توزیع نرمال، با افزایش میزان خطای تصادفی، عدم قطعیت مشخصه‌های جریان افزایش می‌یابد.

References- منابع

1. Fisher, H.B., 1968. Dispersion predictions in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 94(5), pp.927-943. DOI:10.1061/JSEDAI.0000900
2. Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B.A. and Zyvoloski, G.A., 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31(4), pp.630-648. DOI:10.1016/j.advwatres.2007.12.003
3. Koo, H., Iwanaga, T., Croke, B.F., Jakeman, A.J., Yang, J., Wang, H.H., Sun, X., Lü, G., Li, X., Yue, T. and Yuan, W., 2020. Position paper: Sensitivity analysis of spatially distributed environmental models-a pragmatic framework for the exploration of uncertainty sources. *Environmental modelling & software*, 134, p.104857. DOI:10.1016/j.envsoft.2020.104857.
4. Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F., Dutta, D. and Kim, S.J.E.M., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling & software*, 90, pp.201-216. DOI:10.1016/j.envsoft.2017.01.006
5. Wu, J. and Zeng, X., 2013. Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation. *Chinese Science Bulletin*, 58, pp.3044-3052. DOI: 10.1007/s11434-013-5950-8.
6. Rojas, R., Kahunde, S., Peeters, L., Batelaan, O., Feyen, L. and Dassargues, A., 2010. Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), pp.416-435. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.09.016
7. Guo, A., Chang, J., Wang, Y., Huang, Q. and Li, Y., 2020. Uncertainty quantification and propagation in bivariate design flood estimation using a Bayesian information-theoretic approach. *Journal of Hydrology*, 584, p.12467. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124677.
8. Serinaldi, F., 2013. An uncertain journey around the tails of multivariate hydrological distributions. *Water Resources Research*, 49(10), pp.6527-6547. DOI:10.1002/wrcr.20531
9. Dung, N.V., Merz, B., Bárdossy, A. and Apel, H., 2015. Handling uncertainty in bivariate quantile estimation—An application to flood hazard analysis in the Mekong Delta. *Journal of Hydrology*, 527, pp.704-717. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.05.033.
10. Pinheiro, V.B., Naghettini, M. and Palmier, L.R., 2019. Uncertainty estimation in hydrodynamic modeling using Bayesian techniques. *RBRH*, 24, p.e38.

DOI:10.1590/2318-0331.241920180110

11. Eftekharian, L.E.Y.L.A., Abrishamchi, A. and Tajrishi, M., 2005. Uncertainty Analysis of Water Levels of Sistan River and Reliability Analysis of Flood Control System. *Journal of Hydraulics*, 1(1), pp.39-54. [In Persian an]. DOI:10.30482/jhyd.2005.85363
12. Masoumi, F., Najjar-Ghabel, S. and Salimi, N., 2021. Automatic calibration of the two-dimensional hydrodynamic and water quality model using sequential uncertainty fitting approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, pp.1-15. DOI:10.1007/s10661-020-08831-z
13. Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D. and Efstratiadis, A., 2016. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, pp.478-492. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.01.020.
14. Apel, H., Merz, B. and Thielen, A.H., 2008. Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), pp.149-162. DOI:10.1080/15715124.2008.9635344.
15. Bozzi, S., Passoni, G., Bernardara, P., Goutal, N. and Arnaud, A., 2015. Roughness and discharge uncertainty in 1D water level calculations. *Environmental Modeling & Assessment*, 20, pp.343-353. DOI:10.1007/s10666-014-9430-6
16. Papadopoulos, C.E. and Yeung, H., 2001. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12(4), pp.291-298. DOI:10.1016/S0955-5986(01)00015-2.
17. Wohl, E.E., 1998. Uncertainty in flood estimates associated with roughness coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2), pp.219-223. DOI:10.1061/(ASCE)07339429(1998)124:2(219).
18. Mohammadzade Vatanchi, S. and Maghrebi, M., 2022. Uncertainty Analysis of Stage-Discharge Rating Curves In Rivers. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 52(106), pp.157-167. [In Persian] DOI:ceej.tabrizu.ac.ir/article_11115.html
19. Neal, J.C., Odoni, N.A., Trigg, M.A., Freer, J.E., Garcia-Pintado, J., Mason, D.C., Wood, M. and Bates, P.D., 2015. Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 529, pp.169-183. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.026.
20. Grimaldi, S., Li, Y., Walker, J.P. and Pauwels, V.R.N., 2018. Effective representation of river geometry in hydraulic flood forecast models. *Water Resources Research*, 54(2), pp.1031-1057. DOI:10.1002/2017WR021765
21. Behrooz, M., Alimohammadi, S. and Atari, J., 2014. Sensitivity analysis of hydrologic, hydraulic and economic uncertainties in design of flood control systems. *Iran-Water Resources Research*, 10(2), pp.69-81. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_13440.html
22. Huang KangDi, H.K., Ye Lei, Y.L., Chen Lu, C.L., Wang QuanSen, W.Q., Dai Ling, D.L., Zhou JianZhong, Z.J., Singh, V.P., Huang MuTao, H.M. and Zhang JunHong, Z.J., 2018. Risk analysis of flood control reservoir operation considering multiple uncertainties. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.08.040
23. Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), pp.279-298. DOI:10.1002/hyp.3360060305
24. Nanding, N., Rico-Ramirez, M.A., Han, D., Wu, H., Dai, Q. and Zhang, J., 2021. Uncertainty assessment of radar-raingauge merged rainfall estimates in river discharge simulations. *Journal of Hydrology*, 603, p.127093. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.127093
25. Riahi-Madvar, H. and Seifi, A., 2018. Uncertainty analysis in bed load transport prediction of gravel bed rivers by ANN and ANFIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), p.688. DOI:10.1007/s12517-018-3968-6
26. Soroush, F. and Riahi Madvar, H., 2019. Uncertainty Analysis of Infiltration Parameters of WinSRFR Furrow Irrigation Simulation Model with Monte Carlo Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), pp.1007-991. [in Persian]. <https://www.magiran.com/p2018514>
27. Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F. and Le Boursicaud, R., 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, pp.573-587. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.11.016.
28. Di Baldassarre, G. and Montanari, A., 2009. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), pp.913-921. DOI:10.5194/hess-13-913-2009.
29. Vatanchi, S.M. and Maghrebi, M.F., 2019. Uncertainty in rating-curves due to manning roughness coefficient. *Water Resources Management*, 33(15), pp.5153-5167. DOI:10.1007/s11269-019-02421-6
30. Sadeghfam, S., Shams, H., Crookston, B.M., Babaeian Amini, A. and Daneshfaraz, R., 2023. Reliability Analysis of Water Supply Channels for Conveying Design Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(12), p.04023028. DOI:10.1061/JIDEDH.IRENG-10179
31. Saberi Tanasvan, M., Noroozi, Z.G., Delghandi, M., Ashouri, S.N. and Dorostkar, V., 2020. Sensitivity

- analysis of flood parameters to roughness variation. *Journal Irrigation and Water Engineering*, 10(40), pp. 164-177. [In Persian]. DOI:10.22125/iwe.2020.110081
32. Scharffenberg, W.A. and Kavvas, M.L., 2011. Uncertainty in flood wave routing in a lateral-inflow-dominated stream. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), pp.165-175. DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000298.
33. Henderson, F.M., 1996. Open channel flow.
34. Bates, B.C. and Townley, L.R., 1988. Nonlinear, discrete flood event models, 3. Analysis of prediction uncertainty. *Journal of Hydrology*, 99(1-2), pp.91-101. DOI:10.1016/0022-1694(88)90080-7
35. Jacquin, A.P. and Shamseldin, A.Y., 2007. Development of a possibilistic method for the evaluation of predictive uncertainty in rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 43(4). DOI:10.1029/2006WR005072.
36. Dalledonne, G.L., Kopmann, R. and Brudy-Zippelius, T., 2019. Uncertainty quantification of floodplain friction in hydrodynamic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), pp.3373-3385.. DOI:10.5194/hess-23-3373-2019
37. Barton, G.J., Moran, E.H. and Berenbrock, C., 2004. *Surveying cross sections of the Kootenai River between Libby Dam, Montana, and Kootenay Lake, British Columbia, Canada* (No. 2004-1045). US Geological Survey. DOI:10.3133/ofr20041045



Research Article

Investigation of Liquefiable Sandy Soil Improvement by Ordinary and Geotextile-Reinforced Stone Columns Using a Small-Scale Shaking Table

Parna Yarbakhti and Ali Akbar Golshani*

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* corresponding author: (golshani@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 28 April 2024

Revised: 18 June 2024

Accepted: 12 August 2024

Keywords:

Liquefaction,
shaking table,
stone column,
geotextile.

Abstract

The increase in construction in coastal cities, which are prone to liquefaction due to the high level of underground water and soil type, along with their soil conditions that do not meet the technical requirements, has led engineers to undertake soil improvement. Among the liquefaction mitigation methods, the stone column technique has been considered one of the most versatile and economical ground improvement techniques, including increasing the density of surrounding soil by vibration and replacement, expediting drainage, and reducing the shear stress of surrounding soil by introducing stiff elements. This study evaluated the seismic performance of stone columns and full- and partial-length geotextile-encased stone columns as a liquefaction countermeasure in the loose sample of Firoozkooh No. 161 sand. The sands were susceptible to liquefaction in a loose state, i.e., around 25% relative density, when subjected to a sinusoidal acceleration of 0.35g and 3Hz frequency. A group of nine ordinary and geotextile-reinforced stone columns with a diameter and length of 5 cm and 50 cm, respectively, has been created. In order to evaluate the seismic behavior, four reduced-scale 1-g model tests were conducted using a uniaxial shake table on a group of ordinary and geotextile-reinforced stone columns. Based on the obtained results, reinforcing the full length of the stone columns using geotextile has prevented liquefaction in the surface layers, reduced the excess pore water pressure ratio, increased the soil stiffness, and overall, has provided more effective performance than ordinary stone columns.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:

Yarbakhti, P. and Golshani, A.A. 2025. Investigation of liquefiable sandy soil improvement by ordinary and geotextile-reinforced stone columns using a small-scale shaking table, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 42-57. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.64343.3319>



مطالعه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای روانگرا توسط ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با ژئوتکستایل با استفاده از میز لرزان کوچک مقیاس

پرنا یاربختی و علی اکبر گلشنی*

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (golshani@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹	افزایش ساخت‌وساز در شهرهای ساحلی، مناطق مستعد روانگرایی به دلیل سطح بالای آب زیرزمینی و نوع خاک، و همچنین در مناطقی که شرایط ژئوتکنیکی الزامات فنی را برآورده نمی‌سازد، مهندسان را ناچار به انجام بهسازی خاک کرده است. در مطالعه‌ی حاضر، رفتار گروه ستون‌های سنگی سنتی و محصورشده توسط ژئوتکستایل به عنوان روشی جهت مقابله با روانگرایی خاک ارزیابی شده است. تسلیح ستون‌های سنگی در دو حالت، تسلیح تمام طول و تسلیح بخش فوقانی (به طول ۴ برابر قطر ستون سنگی) انجام شده است. به منظور ارزیابی عملکرد، چهار آزمایش میز لرزان روی گروه‌های ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با آرایش مربعی انجام شده است. براساس نتایج به دست آمده، تسلیح تمام طول ستون‌های سنگی توسط ژئوتکستایل، منجر به عدم وقوع روانگرایی در لایه‌های سطحی، کاهش نسبت فشار آب منفذی اضافی، افزایش سختی خاک، و در مجموع عملکرد مؤثرتر نسبت به ستون‌های سنگی سنتی شده است. ستون‌های سنگی محصورشده توسط ژئوتکستایل در مقایسه با ستون‌های سنگی سنتی، منجر به کاهش در حدود ۳۰٪ بیشینه‌ی مقدار نسبت اضافه فشار آب منفذی در سطح و در حدود ۸٪ در عمق شده است. از سوی دیگر، افزایش سختی مدل در قالب افزایش دامنه‌ی شتاب در سطح، در صورت اجرای گروه ستون سنگی مسلح در حدود ۱۲٪ نسبت به گروه ستون سنگی سنتی افزایش داشته است.
تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲	
واژگان کلیدی:	
روانگرایی،	
میز لرزان،	
ستون سنگی،	
ژئوتکستایل.	

۱. مقدمه

رایج‌ترین آن‌ها، مسلح‌کننده‌های ژئوستنتیکی و ستون‌های سنگی هستند. این موضوع عمدتاً به سهولت ساخت، سادگی، و صرفه‌ی اقتصادی آن‌ها مربوط می‌شود، که موردعلاقه‌ی مهندسان است.^[۱۲] مطالعات گسترده‌ای روی کاهش پتانسیل روانگرایی با استفاده از ستون‌های سنگی به روش‌های تحلیلی،^[۷ و ۱۳] مطالعات موردی میدانی،^[۱۴] آزمایش‌های میدانی،^[۱۵ و ۱۶] آزمایش‌های فیزیکی،^[۱۶ و ۱۷] و شبیه‌سازی‌های عددی،^[۱۷] انجام شده است.

مطالعات موردی زمین‌لرزه‌ها، آزمایش‌های سانتریفیوژ و مطالعات عددی نشان داده‌اند که اجرای ستون‌های سنگی، روش بهسازی مؤثری جهت کاهش خطرهای روانگرایی است. برنان و مدابوشی^۸ (۲۰۰۶)، کاهش پدیده‌ی روانگرایی را با استفاده از زهکش‌های عمودی با عمق نفوذ متغیر بررسی کرده‌اند. طبق نتایج به دست آمده، در لایه‌های عمیق‌تر، خاک سریع‌تر و به‌طور کارآمدتری تحت تأثیر وجود زهکش قرار می‌گیرد.^[۱۸] هوانگ^۹ و همکاران (۲۰۱۶)، نشان داده‌اند

رشد روزافزون ساخت‌وساز در مناطق شهری و کلان‌شهرها، منجر به افزایش چشمگیر ارزش زمین و نبود زمین‌های مناسب جهت گسترش شده است. در نتیجه، در حال حاضر ساخت‌وساز در زمین‌هایی انجام می‌شود که به دلیل شرایط نامناسب ژئوتکنیکی، پیش از این از لحاظ اقتصادی، توجیهی برای گسترش نداشته‌اند. از جمله‌ی مناطق مذکور، شهرهای ساحلی هستند، که به دلیل نوع خاک و تراز بالای آب زیرزمینی، پتانسیل روانگرایی دارند. خطر روانگرایی و تغییر شکل‌های ناشی از آن با استفاده از انواع روش‌های بهسازی خاک، مانند: متراکم‌سازی درجای مصالح^۱، جایگزینی یا حذف خاک نامناسب، اختلاط عمیق خاک^۲، جامدسازی^۳ (مثلاً سیمان‌تاسیون^۴)، و استفاده از چاه‌های زهکش^۵، از جمله زهکش‌های شنی جهت کنترل فشار آب حفره‌ای، تراکم دینامیکی^۶، اشباع‌زدایی^۷، استفاده از ژئوکامپوزیت‌ها، ژئوگریدها، و غیره، می‌تواند کاهش یابد.^[۱۱-۱] از میان روش‌های مختلف بهسازی زمین، احتمالاً

⁶ Dynamic compaction

⁷ Desaturation

⁸ Brennan & Madabhushi

⁹ Huang

¹ In-situ material densification

² Deep soil mixing

³ Solidification

⁴ Cementation

⁵ Relief wells

در زمینه‌ی کاهش پتانسیل روانگرایی لایه‌های ماسه‌ای بهسازی‌شده توسط ستون‌های سنگی مسلح انجام نشده است.

در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور ارزیابی اثر تسلیح ستون‌های سنگی با استفاده از پوشش ژئوتکستایل در کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای لایه‌ای، ۴ آزمایش میز لرزان کوچک‌مقیاس انجام شده است. نتایج جهت بررسی رفتار ماسه‌ی مستعد روانگرایی بهسازی‌شده به دو روش گروه‌های ستون‌های سنگی سنتی و محصورشده توسط ژئوتکستایل تجزیه و تحلیل شده است.

۲. مشخصات مصالح

۱.۲. خاک

استفاده از یک نوع خاک با شرایط و ویژگی‌های ثابت، که همگان بتوانند آزمایش‌های یکسان روی آن انجام دهند، قابلیت تکرارپذیری نتایج و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف را ممکن می‌سازد. خاک مناسب برای این منظور باید ویژگی‌های خاصی داشته باشد. مورد اول: در دسترس بودن خاک آزمایشی به میزان قابل توجه و با مشخصات فیزیکی ثابت است. مورد دوم: حتی‌الامکان مشخصات خاک آزمایشی به‌عنوان نمونه‌ی ماسه‌ای، مشابه ماسه‌ی های استاندارد شناخته‌شده در دنیا باشد، تا بتوان نتایج مطالعات را با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران در جهان مقایسه کرد. با توجه به آنچه که بیان شده است، در پژوهش حاضر از ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه به‌عنوان مصالح استاندارد پایه برای مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است. ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، ماسه‌ای تمیز با دانه‌های گوشه‌دار طلایی‌رنگ با دانه‌بندی یکنواخت است. خلاصه‌ای از مشخصات ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه در جدول ۱ ارائه شده است.^[۳۰]

۲.۲. ستون سنگی

از مصالح سنگ شکسته با اندازه‌ی دانه‌های ۲/۴ تا ۱۰ میلی‌متر با مشخصات فیزیکی ارائه‌شده در جدول ۲ به‌عنوان مصالح ستون سنگی استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای و مصالح ستون سنگی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. طراحی دانه‌بندی ستون سنگی با هدف اطمینان از زهکشی مطلوب انجام شده است. بدین منظور از رابطه‌ی براون^{۱۸} جهت ارزیابی مصالح ستون سنگی استفاده شده است. براون (۱۹۷۷)، یک شاخص کمی به نام عدد تناسب (SN)^{۱۹}، جهت ارزیابی مصالح دانه‌ای ستون سنگی به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف کرده است:^[۳۰]

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

USCS classification	C_u	C_c	e_{min}	e_{max}
SP	1.87	0.88	0.548	0.942

جدول ۲. مشخصات مصالح ستون سنگی.

USCS classification	C_u	C_c	Percentage of gravel
GP	2.055	1.202	78.9

که اثربخشی ستون‌های سنگی جهت کاهش خطر روانگرایی خاک حین زلزله، به زهکشی در امتداد ستون سنگی، کاهش تنش برشی تناوبی^{۱۰} خاک، و تراکم خاک اطراف بستگی دارد.^[۱۹] نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ نشان داده است که تراکم ناشی از اجرای ستون‌های سنگی، نه تا حد رضایت‌بخشی، اما تا حدی منجر به کاهش نشست دائمی فونداسیون و نیز موجب تقویت نیروها و شتاب‌های اعمالی به روسازه‌ها شده است.^[۲۰] بیاتی و باقری‌پور (۲۰۱۹)، با انجام آزمایش‌های میز لرزان، رفتار ماسه‌های اشباع بهسازی‌شده توسط ستون‌های سنگی را حین روانگرایی ارزیابی کرده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از ستون‌های سنگی منجر به تأخیر در زمان وقوع بیشینه‌ی نشست شده است. این موضوع در ماسه‌های سست در مقایسه با ماسه‌های بسیار سست، چشمگیرتر بوده است.^[۲۱] نتایج مطالعه‌ی قربانی و همکاران (۲۰۲۰)، نشان داده است که طول ستون‌های سنگی و زاویه‌ی اصطکاک بالاتر مصالح سنگ-دانه‌ای، اثر قابل توجهی در مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییرشکل داشته است.^[۲۲]

اونو^{۱۱} و همکاران (۱۹۸۷)، نشان داده‌اند که حین روانگرایی، نفوذپذیری ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوسنتتیک حدود ۶۰٪ کاهش یافته است. در حالی که کاهش نفوذپذیری ستون‌های سنگی سنتی، به‌دلیل گرفتگی، بیشتر از ۶۰٪ بوده است.^[۲۳] پوشش ژئوسنتتیک منجر به افزایش سختی محوری و برشی^{۱۲} ستون‌های سنگی و بازتوزیع^{۱۳} تنش‌های ناشی از زلزله یا تنش‌های از پیش موجود می‌شود. استفاده از ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوسنتتیک به‌عنوان یک روش تسلیح خاک می‌تواند منجر به تغییر شرایط خاک، پاسخ شتاب اصلاح‌شده از نظر محتوای بسامدی و دامنه در جریان زلزله شود.^[۲۴]

بهسازی به کمک ستون سنگی محصورشده توسط ژئوسنتتیک، منجر به اتلاف کامل اضافه فشار آب منفذی با نرخ سریع‌تری نسبت به ستون‌های سنگی سنتی می‌شود. تحت گرا دیان هیدرولیکی بالا، ستون سنگی مسلح می‌تواند تا ۴۴٪ منجر به کاهش مقدار بیشینه‌ی اضافه فشار آب شود. برای نسبت‌های بالای قطر به قطر مؤثر ستون سنگی، نفوذپذیری کم ستون سنگی می‌تواند در کاهش گرفتگی^{۱۴} تأثیرگذار باشد. پوشش تمام طول ستون سنگی در مقایسه با پوشش بخشی از طول آن، از نقطه‌نظر جلوگیری از آلودگی و گرفتگی ستون سنگی برتری دارد.^[۲۵] چاکرابورتی و ساوانت^{۱۵} (۲۰۲۲)، با بررسی تغییرات نسبت اضافه فشار آب منفذی در اعماق مختلف به این نتیجه رسیدند که برای نسبت ثابتی از فاصله‌ی مرکز به مرکز به قطر ستون‌های سنگی، افزایش قطر ستون‌های سنگی منجر به کاهش اثربخشی آن‌ها می‌شود. در حالی که برای نسبت ثابت، قطرهای بزرگ‌تر ستون‌های سنگی در مقایسه با قطرهای کوچک‌تر، تأثیر بیشتری در کاهش نشست خواهد داشت.^[۲۶] اسوکاواتی^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۳)، با انجام مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آپنسیس^{۱۷} روی خاک ماسه‌ی سیلتی مستعد روانگرایی نشان داده‌اند که در مقایسه با میدان آزاد، اجرای ستون‌های سنگی محصورشده توسط ژئوسنتتیک، بیشینه‌ی مقدار اضافه فشار آب منفذی و نشست به ترتیب در حدود ۱۰ و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.^[۲۷] ستون سنگی محصورشده توسط ژئوسنتتیک به‌طور مؤثری جهت کاهش تغییرشکل پی‌های مستقر روی خاک نرم استفاده شده است.^[۲۸] و^[۲۹] در حالی که پژوهش‌های کافی

¹⁵ Chakraborty & Sawant

¹⁶ Asokawati

¹⁷ OpenSees

¹⁸ Brown

¹⁹ Suitability Number

¹⁰ Cyclic shear stress

¹¹ Onoue

¹² Axial and shear stiffness

¹³ Redistribute

¹⁴ Clogging

جدول ۲. عدد تناسب براون^[۳۰].

Suitability No.	0-10	10-20	20-30	30-50	>50
rating	Excellent	Good	Fair	Poor	Unsuitable

جدول ۳. مشخصات ژئوتکستایل.

Ultimate tensile strength (kN/m)	Strain at ultimate strength (%)	Secant stiffness at ultimate Strain (J) (kN/m)	Thickness (mm)
6.5	27.6	23.5	0.7

مطابق با ISO:۱۳۹۳۴-۱:۲۰۱۳ تعیین شده است. در جدول ۳، خلاصه‌ای از مشخصات ژئوتکستایل مسلح‌کننده ارائه شده است.

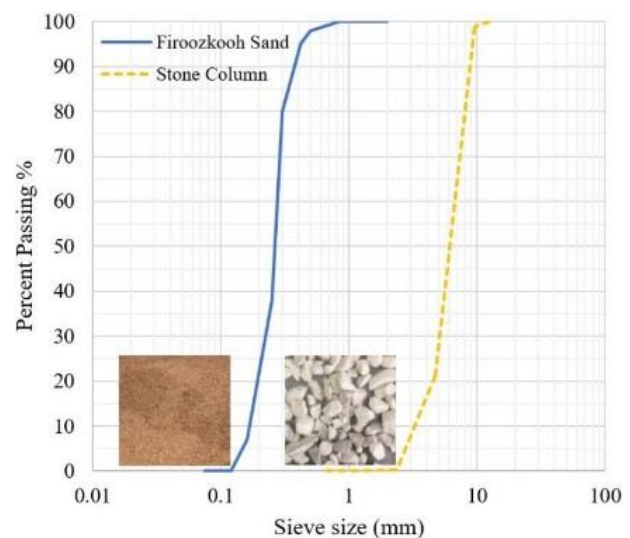
۳. سازوکار زهکشی ستون‌های سنگی

نفوذپذیری زیاد ستون‌های سنگی منجر به کاهش رشد فشار آب حفره‌ای در آن‌ها می‌شود، که گرادیان فشاری بین ستون‌ها و خاک اطراف آن‌ها ایجاد می‌کند. این امر منجر به حرکت جریان آب به سمت ستون‌ها و در نتیجه باعث کاهش فشار آب حفره‌ای در خاک می‌شود.^[۳۳] به‌طور کلی، طراحی ستون سنگی به منظور مقابله با روانگرایی، در درجه‌ی اول به تعیین فاصله‌ی مناسب ستون‌ها برای قطر انتخابی مربوط می‌شود. قطر ستون سنگی نیز عمدتاً به تجهیزات استفاده‌شده بستگی دارد.^[۸] در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور ارزیابی مشخصات موردنیاز برای زهکش، از نمودارهای طراحی در نوشتار پال و دب^[۲۰] (۲۰۱۸)،^[۹] استفاده شده است، که راه‌حلی ساده جهت تعیین ظرفیت زهکش‌ها حین روانگرایی خاک با اعمال اثر نفوذپذیری محدود و سختی زهکش‌های شنی در مدل نوشتار سید و بوکر^[۳۱] (۱۹۷۷)،^[۱] پیشنهاد شده است. با استفاده از نمودارهای طراحی پال و دب (۲۰۱۸) و در نظر گرفتن $r_{II} = 0/3$ و $r_{II} = 4$ = سیکل موردنیاز تنش لرزه‌ای برای شروع روانگرایی، مقادیر مناسب طول و قطر ستون‌های سنگی جهت ساخت در آزمایشگاه ارزیابی شده است.

با انتخاب قطر ۵ سانتی‌متری برای ستون سنگی (با توجه به امکانات ساخت و همچنین ابعاد جعبه)، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی از نمودارهای طراحی به‌دست می‌آیند. فاصله‌ی به‌دست‌آمده از نمودارهای طراحی، بیشینه‌ی مقدار است.^[۳۴] برای قطر انتخابی ستون سنگی، با توجه به ابعاد جعبه‌ی آزمایش، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی باید به گونه‌ای انتخاب شود که در نهایت قطر مؤثر ستون‌های سنگی کاملاً در محیط خاکی و در فاصله‌ی مناسبی از دیواره‌های جعبه قرار گیرد. بنابر آنچه که بیان شد، برای قطر ۵ سانتی‌متر، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

۴. آزمایش میز لرزان

شبیه‌سازی زلزله برای ۴ مدل با استفاده از دستگاه میز لرزان دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران انجام شده است. دستگاه میز لرزان، امکان اعمال محدوده‌ی بسامد ۰/۱ تا ۱۵ هرتز با دامنه‌ی ± 125 میلی‌متر دامنه و شتاب ۱ g را فراهم



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح ستون سنگی و ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{30})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}} \quad (1)$$

که در آن، D_{10} ، D_{20} ، D_{30} و D_{10} قطرهایی در واحد میلی‌متر هستند، که به ترتیب ۵۰، ۲۰ و ۱۰ درصد دانه‌های خاک از آن‌ها کوچک‌تر هستند. هر چه مقدار S_N کمتر باشد، مصالح دانه‌ای معرفی‌شده برای ستون سنگی مناسب‌تر هستند. با توجه به منحنی دانه‌بندی شکل ۱، مقدار S_N مصالح شنی برابر ۰/۸ به‌دست آمده است. مطابق اعداد تناسب متناظر با درجه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، که در جدول ۲ ارائه شده است، مصالح انتخابی به عنوان ستون سنگی، در درجه‌ی عالی ارزیابی شده‌اند.

۳.۲. مصالح پوشش ستون سنگی

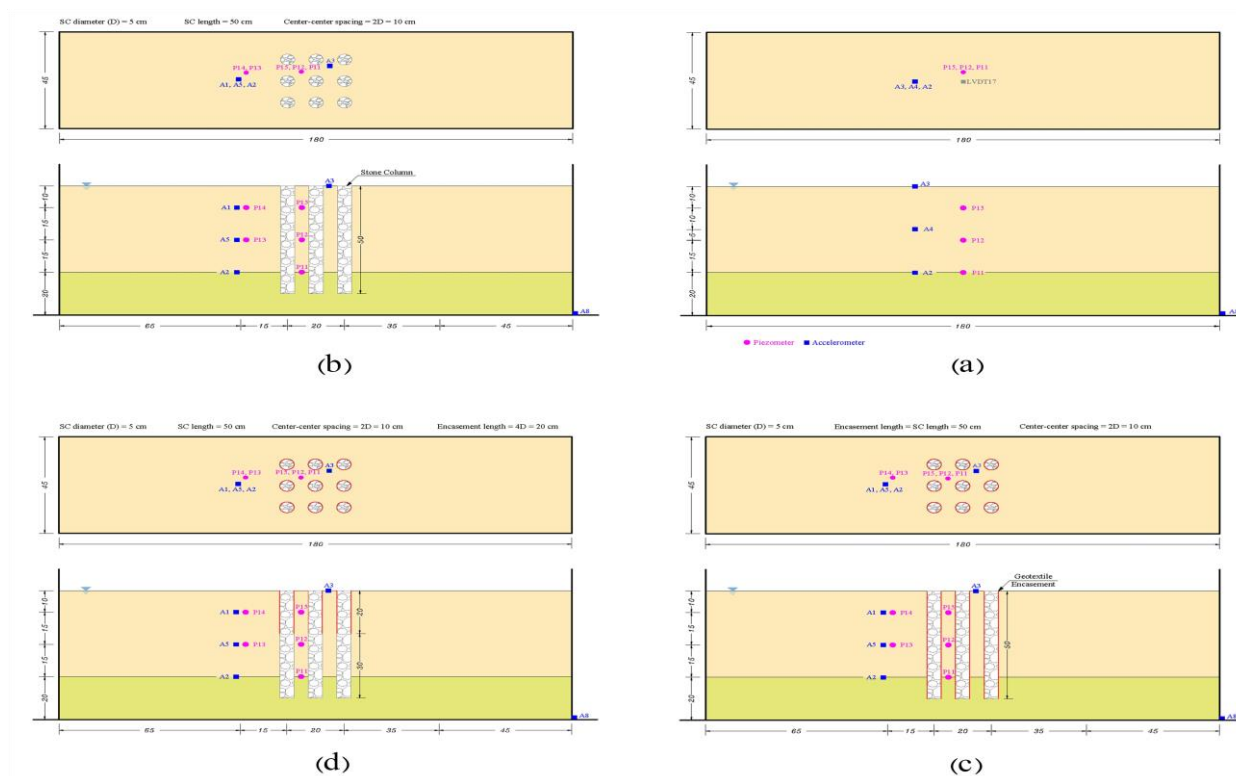
در عمل، ژئوتکستایل‌ها جهت پوشش عمودی ستون‌های سنگی، با قطرهای ۴۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر، بیشینه‌ی مقاومت کششی $400 (kN/m)$ و سختی کششی ۱۰۰۰ تا $4000 (kN/m)$ تولید می‌شوند.^[۳۱] براساس قوانین اثر مقیاس، رابطه‌ی میان سختی مسلح‌کننده در نمونه‌ی اولیه (J_p) و سختی مسلح‌کننده در مدل (J_m) را می‌توان به‌صورت $J_p = J_m \times \mu$ محاسبه کرد، که در آن μ ضریب مقیاس است.^[۳۲] در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوتکستایل بافته‌شده جهت محصور کردن ستون‌های سنگی استفاده شده است. مشخصات مقاومت کششی ژئوتکستایل مذکور براساس آزمایش‌های کشش استاندارد

²¹ Seed & Booker

²⁰ Pal & Deb

جدول ۴. خلاصه‌ی مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی.

No. Test	Test Description
1	Free Field
2	Improvement using group of ordinary stone columns
3	Improvement using group of encased stone columns (full-length encasement)
4	Improvement using group of encased stone columns (partial-length encasement)



شکل ۲. نما و مقطع عرضی: مدل (a)، مدل (b)، مدل (c)، و مدل (d) ۴.

۱.۵. مدل‌سازی فیزیکی

در آزمایش‌های فیزیکی جهت بررسی روانگرایی خاک، استفاده از ماسه‌های سست، یعنی بسیار سست‌تر از ماسه‌ی درجا پیشنهاد شده است.^[۲۶] در مطالعه‌ی حاضر، از تیپ III قانون مقیاس‌بندی تعمیم‌یافته‌ی نوشتار ایای^{۲۵} و همکاران (۲۰۰۵)،^[۲۲] استفاده شده است. با توجه به ابعاد جعبه‌ی صلب، ضریب مقیاس هندسی (نسبت نمونه‌ی اولیه به مدل)، $\mu = 12$ در نظر گرفته شده است.

۱.۵. ساخت بستر خاکی

بستر خاکی به روش بارش خشک و در لایه‌های یکنواخت ۵ سانتی‌متری ایجاد شده است. مدل خاکی شامل لایه‌ی غیرروانگرا به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم نسبی ۸۵٪ در بخش تحتانی و لایه‌ی روانگرا به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و تراکم نسبی ۲۵٪ در بخش فوقانی بوده است. وزن مخصوص خشک ماسه نیز به ترتیب برابر با ۱۴/۱۰ و ۱۶/۱۷ (kN/m^3) متناظر با تراکم نسبی ۲۵ و ۸۵ درصد بوده است. در تمام آزمایش‌ها، پس از تکمیل ساخت مدل،

کرده است. عرشه‌ی میز با ابعاد ۱/۸×۱/۲ (بر حسب متر) می‌تواند بیشینه‌ی بار عمودی ۵۰ کیلو نیوتن را تحمل کند.

۱.۴. جعبه‌ی ۲۲ آزمایش

از جعبه‌ی صلب با ابعاد ۱۸۰×۴۵×۷۰ (ارتفاع×عرض×طول) سانتی‌متر استفاده شده است. محفظه‌ای که از صفحه‌هایی با جنس پلاستیک شیشه‌ای^{۲۳} به ضخامت ۲ سانتی‌متر ساخته و توسط یک قاب فولادی در بالا، پایین، و اطراف جعبه مهار شده است.

ورق‌های پلاستیکی شفاف، رفتار مدل حین آزمایش را قابل مشاهده می‌سازد. جعبه‌ی مذکور، جهت شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد، در دو وجه داخلی خود در راستای عرضی، دو لایه‌ی فوم پلی‌استایرن جاذب به ضخامت ۲۵ میلی‌متر دارد، که مرزهای ویسکوزی را در شرایط میدان آزاد ایجاد می‌کنند.^[۲۵] در جدول ۴، مشخصات کلی مدل‌ها ارائه شده است. همچنین، در شکل ۲، به‌طور شماتیک هندسه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی و موقعیت حسگرها^{۲۴} مشاهده می‌شود.

²⁴ Instruments

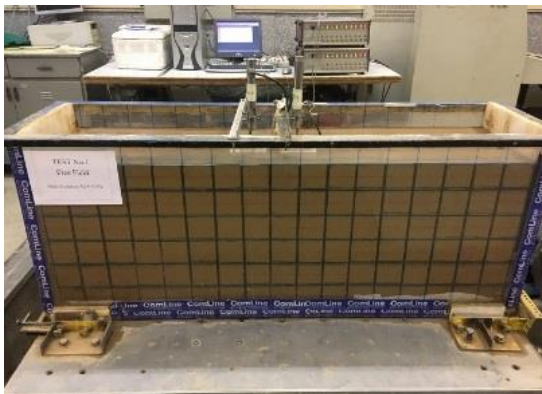
²⁵ Iai

²² Box

²³ Plexiglas



شکل ۴. نمای پلان گروه سنگی ساخته شده (نسبت ابعاد مدل به ابعاد نمونه‌ی واقعی: ۱ به ۱۲).



شکل ۵. مدل ۱ پیش از اعمال تحریک و شروع آزمایش.

زهکش‌هایی که تا عمیق‌ترین بخش لایه‌ی روانگرا ادامه نمی‌یابند، به زمان بیشتری جهت شروع انتقال جبهه‌های جریان از بخش تحتانی خود نیاز دارند؛ زیرا به جای مصالح زهکش، ماسه‌ی ریز با نفوذپذیری پایین‌تر در زیر آن‌ها قرار دارد. در نتیجه، ستون‌های سنگی جهت حفظ عملکرد زهکشی مطلوب، باید تا عمق لایه‌ی روانگرا ادامه یابند.^{[۱۸] و [۲۷]} بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، ستون‌های سنگی از لایه‌ی روانگرا عبور کرده و ۱۰ سانتی‌متر در لایه‌ی غیرروانگرایی تحتانی نفوذ داشته است.

۳.۵. ساخت ستون سنگی مسلح

از میان مسلح‌کننده‌های مسطح و سلولی^{۲۷}، نوع سلولی در بهبود مقاومت مؤثرتر است.^[۱۲] به منظور ساخت ستون سنگی مسلح، ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن بافته شده^{۲۸} به شکل مستطیل بریده و با استفاده از چسب حرارتی به استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر / ۲۰ سانتی‌متر با درز طولی تبدیل شده است. قطر غلاف ژئوتکستایل برابر قطر ستون سنگی بوده و البته در هنگام برش، حدود ۱۵ میلی‌متر هم‌پوشانی در محل درز در نظر گرفته شده است. توجه به این نکته ضروری است که در عملیات بهسازی میدانی، غلاف بدون درز ساخته شده است، تا هیچ نقطه‌ضعفی وجود نداشته باشد.^[۳۸] پس از تخلیه‌ی خاک داخل لوله‌ها، غلاف ژئوتکستایل به سمت داخل لوله رانده شده است. سپس ساخت ستون سنگی مطابق توضیحات بخش ۲.۵. ساخت ستون سنگی (زیربخش ۵) انجام شده است. غلاف ژئوتکستایلی قادر به اعمال اثر محصورکنندگی برای دانه‌های ستون‌های سنگی است، که آن‌ها را در موقعیت خود نگه می‌دارد و تاب‌خوردگی حین لرزش را به میزان کمینه می‌رساند.^[۳۷] در شکل‌های ۵ و ۶، تصاویری از مدل پیش از انجام آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل ۳. شابلون استفاده شده جهت ساخت ستون‌های سنگی.

دی‌اکسیدکربن از شیرهای تعبیه شده در کف مدل به داخل محیط خاکی منتشر شده است. این روش جهت اطمینان از اشباع بهتر محیط خاک انجام شده است. زیرا دی‌اکسیدکربن با آب واکنش می‌دهد تا اسید کربنیک (H_2CO_3) تشکیل دهد، در حالی که هوای داخل حفره‌های خاک با آب مخلوط نمی‌شود و به شکل حباب درون آب باقی می‌ماند و منجر به رفتار سخت‌تر خاک می‌شود. در مرحله‌ی بعد، ورود آب به محفظه تا رسیدن به تراز برابر تراز پروفیل خاک ادامه یافته است.

۲.۵. ساخت ستون سنگی

روش رایج ساخت ستون سنگی در مدل‌سازی‌های فیزیکی، که شامل تعبیه‌ی لوله در جعبه و ساخت ستون پیش از انجام خاکریزی است، هیچ‌گونه تطابقی با شرایط واقعی اجرا ندارد. بنابراین فرایندی جهت ساخت ستون‌های سنگی بالاترین کیفیت مد نظر قرار گرفته است. در روش مذکور، پس از اتمام ساخت بستر خاکی، به منظور ساخت ستون‌های سنگی از لوله‌های توخالی و ته‌باز از جنس PVC، به قطر خارجی ۵۰ (برابر با قطر ستون سنگی) و ضخامت ۱/۸ میلی‌متر استفاده شده است. جهت حفظ فاصله‌ی دقیق مرکز به مرکز ستون‌ها و همچنین اجرای شاقول آن‌ها، شابلونی مطابق شکل ۳ ساخته شده است. شابلون در دو تراز با فاصله‌ی حدود ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر ساخته شده است، که سبب کمینه‌سازی انحراف محور قائم ستون‌های سنگی هنگام ساخت می‌شود. شابلون به کمک دو گیره در دو طرف به جعبه‌ی مدل متصل و ثابت نگه داشته شده است. پس از ثابت کردن شابلون روی جعبه، لوله‌ی توخالی توسط چکش لاستیکی به داخل لایه‌ی ماسه‌ای کوبیده شده است، تا به تراز انتهای ستون سنگی برسد.

سپس از اوگری مارپیچ به قطر ۴۵ میلی‌متر جهت تخلیه‌ی ماسه‌ی نفوذکرده به داخل لوله استفاده شده است. گمانه‌ی ایجادشده با استفاده از سنگ‌دانه‌ها در ۱۰ لایه با ضخامت یکسان پُر شده است. وزن سنگ‌دانه‌ها برای هر لایه براساس وزن مخصوص خشک $16/4 \text{ (} kN/m^3 \text{)}$ محاسبه شده است. هر لایه با استفاده از یک میله‌ی چوبی به خوبی متراکم شده است، تا ضخامت ۵ سانتی‌متر (برابر قطر ستون سنگی) به دست آید. پس از کوبش هر لایه، لوله به آرامی به مقدار کمتر از ۵ سانتی‌متر (جهت حفظ هم‌پوشانی لایه‌ها و جلوگیری از نفوذ سنگ‌دانه‌ها به خاک اطراف ناشی از کوبش هر لایه) به بالا کشیده و ساخت لایه‌ی بعد انجام شده است. این روند تا زمان ساخت ستون سنگی به طول ۵۰ سانتی‌متر ادامه یافته است. مراحل مذکور تا ساخت گروه، شامل ۹ ستون سنگی با آرایش مربعی با نسبت جایگزینی سطح^{۲۶} ۱۹/۱۶ تکرار شده است (شکل ۴).

²⁷ Cellular

²⁸ Woven

²⁶ Area Replacement Ratio (Arr)



شکل ۸. پدیده‌ی گرفتگی در مدل ۲.

روانگرایی افزایش یافته است. با وقوع روانگرایی، روند شتاب به گونه‌ای تغییر کرده است که دامنه‌ی شتاب به تدریج در اثر از دست رفتن مقاومت خاک ناپدید شده است. از لحاظ زمانی، در لایه‌های سطحی‌تر، دامنه‌های شتاب نسبت به لایه‌های عمیق‌تر به دلیل فشار محصورکننده‌ی کمتر، زودتر کاهش یافته است. کاهش شدید دامنه‌ی شتاب با گذشت زمان نشان داده است که روانگرایی ابتدا در سطح یا در نزدیکی سطح رخ داده و آثار روانگرایی از سطح به سمت عمق مدل پیشروی کرده است. نتیجه‌ی مشابه توسط فیلم‌های ضبط‌شده از عملکرد هر آزمایش نیز تأیید شده است.

به دلیل عدم روانگرایی لایه‌ی متراکم تحتانی، رکورد شتاب در مرز بین دو لایه (ACC_2)، روندی شبیه به تاریخچه‌ی زمانی شتاب پایه (شکل ۷) با تقویت جزئی را تجربه کرده است. نتایج به دست آمده با یافته‌های مطالعات انجام‌شده توسط برخی نوشتارها،^[۳۹-۴۱] مطابقت داشته است. در تمام مدل‌ها، نتایج ACC_1 و ACC_3 نشان داده‌اند که به دلیل مقاومت ذاتی پایین در برابر روانگرایی ناشی از تنش محصورکننده‌ی بسیار کم در مجاورت سطح، روانگرایی در دو شتاب‌سنج رخ داده است. روند مشابهی در برخی مطالعات،^[۴۲ و ۳۴، ۴۳] مشاهده شده است. مطابق نتایج به دست آمده مشهود است که با توجه به روانگرایی و در نتیجه از دست دادن مقاومت برشی خاک، دامنه‌ی رکوردهای شتاب در لایه‌ی روانگراشونده در مراحل اولیه‌ی تحریک به طور قابل توجهی کاهش یافته است. کاهش چشمگیر شتاب پس از سیکل سوم در ACC_3 در مدل ۱، نشان‌دهنده‌ی نرم‌شدگی خاک و روانگرایی بسیار شدید است. با وجود اینکه همین رفتار در تراز مشابه، در مدل‌های ۲ و ۳ نیز رخ داده است، اما دامنه‌ی شتاب تا سیکل هفتم کاهش نیافته است. مشاهده می‌شود که وجود ستون‌های سنگی منجر به تأخیر در فاز نرم‌شدگی خاک شده است، اما کاملاً از آن جلوگیری نکرده است. مدل ۳ در مقایسه با مدل ۲، به دلیل سختی بیشتر، افزایش دامنه‌ی بیشتری را تجربه کرده است. اثر افزایش سختی در اعماق سطحی‌تر بیشتر بوده است، به گونه‌ای که برای سطح، عمق ۱۰ و ۲۵ سانتی-متری، به ترتیب مدل ۳ در حدود ۱۲، ۷، و ۵ درصد افزایش دامنه را نسبت به مدل ۲ تجربه کرده است.

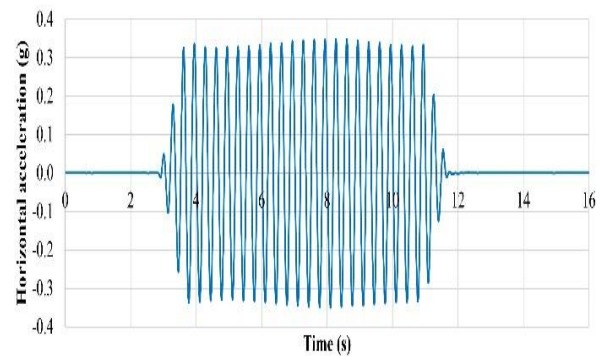
کاهش دامنه‌ی شتاب در نتیجه‌ی نرم‌شدگی خاک در مدل ۳ در مقایسه با مدل ۲، به تدریج و با تأخیر رخ داده است در حالی که کاهش مذکور در مدل ۲ زودتر اتفاق افتاده است. براساس نتایج مدل‌های ۳ و ۴، تسلیح تمام طول ستون سنگی در مقایسه با تسلیح بخش فوقانی، منجر به رفتار سخت‌تر مدل شده است.

۳.۷. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای

در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶، تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب منفذی ($r_u = \Delta u / \sigma'_{v0}$) برای ۴ مدل مشاهده می‌شود. یادآور می‌شود که Δu اضافه



شکل ۶. مدل ۴ پیش از ورود آب و انجام آزمایش.



شکل ۷. تحریک ورودی به عرشه‌ی دستگاه میز لرزان.

۶. تحریک اعمالی

سوابق پیشین زمین لرزه‌ها نشان می‌دهند اغلب زلزله‌هایی که خسارت شدیدی به بار آورده‌اند، دارای PGA در محدوده‌ی ۲/۹۴ تا ۴/۹۰ (m/s^2) بوده‌اند.^[۳۶] با توجه به قابلیت میز لرزان موجود و این واقعیت که هر تابع تناوبی (به عنوان مثال حرکت ورودی زلزله) را می‌توان با استفاده از تحلیل فوری، به صورت مجموع چند سری تابع هارمونیک ساده بیان کرد، بارگذاری هارمونیک به عنوان تحریک ورودی انتخاب شده است.^[۳۵] در مطالعه‌ی حاضر، تحریک ورودی به صورت تابع هارمونیک سینوسی با دامنه‌ی $0.35g$ و بسامد $3 Hz$ در ۲۴ سیکل در جهت طولی میز لرزان اعمال شده است. بسامد ۳ هرتز به دلیل نزدیکی آن به بسامد معمول زمین لرزه‌ها،^[۳۵] استفاده شده است، که بسیار کمتر از بسامد اصلی مدل بوده است. تحریک ورودی به عرشه‌ی دستگاه میز لرزان در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

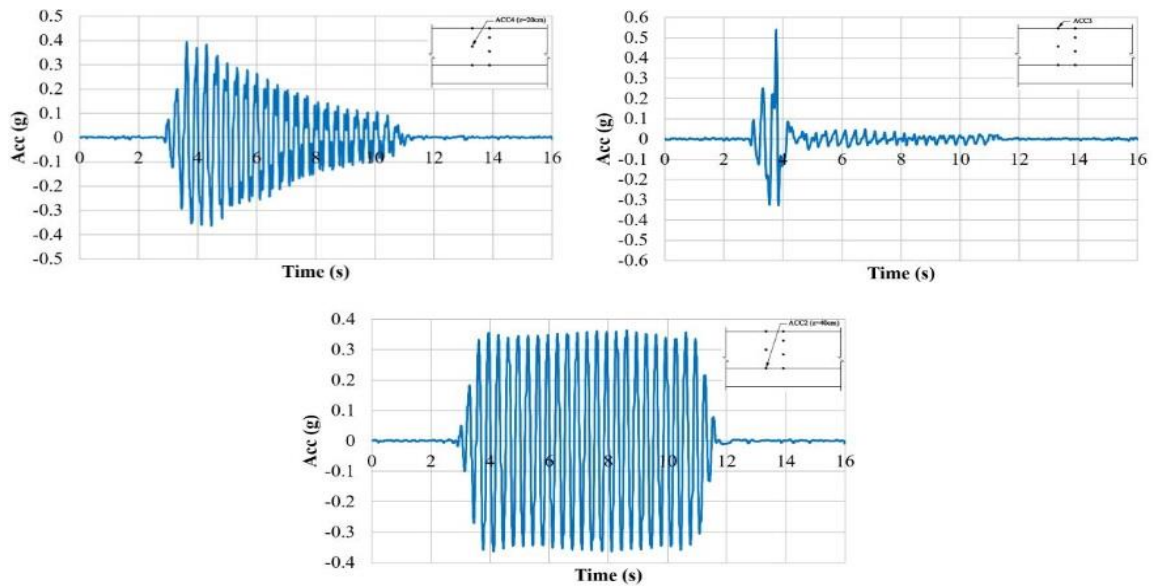
۷. نتایج آزمایش‌ها

۱.۷. اثر گرفتگی

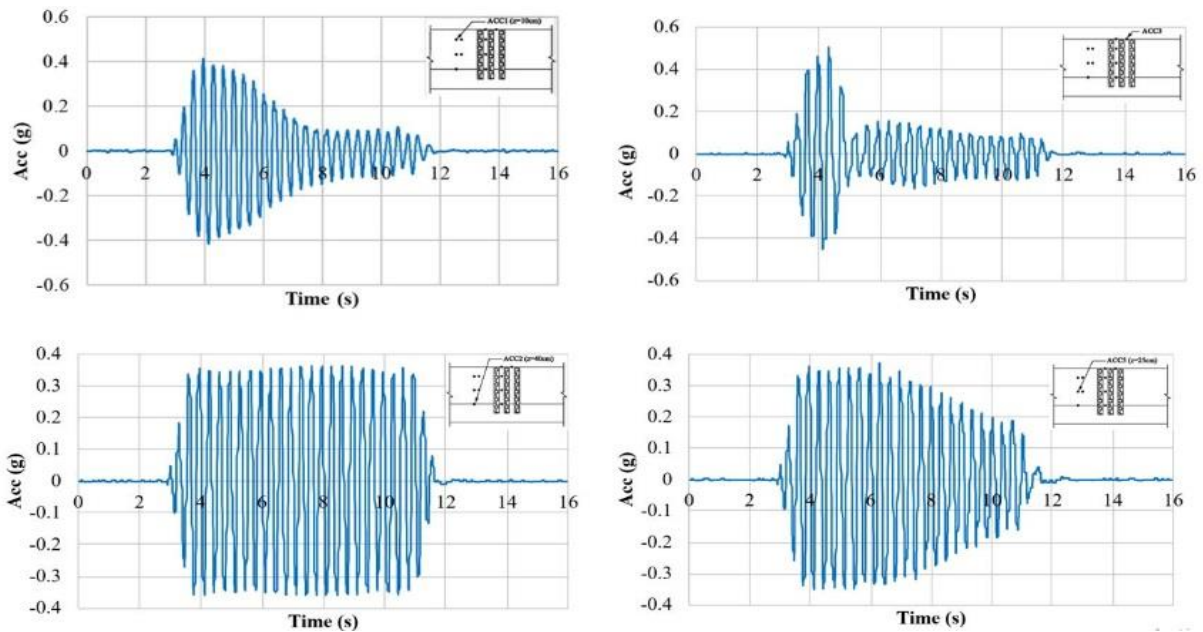
با جریان آب در خاک ماسه‌ای، دانه‌های خاک توسط نیروهای هیدرودینامیکی از هم جدا و سپس با تراوش آب منتقل می‌شوند. انتقال ذرات ریز خاک ماسه‌ای به منافذ زهکش شنی، منجر به گرفتگی در ستون‌های سنگی می‌شود. پس از اتمام آزمایش، مدل ۲ برای تشخیص پدیده‌ی گرفتگی به دقت بررسی شده است. مقطع عرضی ستون‌های سنگی در مدل ۲ پس از اعمال تحریک در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقدار قابل توجهی از ماسه‌ی ریز به داخل ستون‌های سنگی نفوذ کرده است. بنابراین، اثربخشی ستون‌های سنگی به عنوان یک مسیر زهکشی با پدیده‌ی گرفتگی کاهش می‌یابد.

۲.۷. تاریخچه‌ی زمانی شتاب افقی

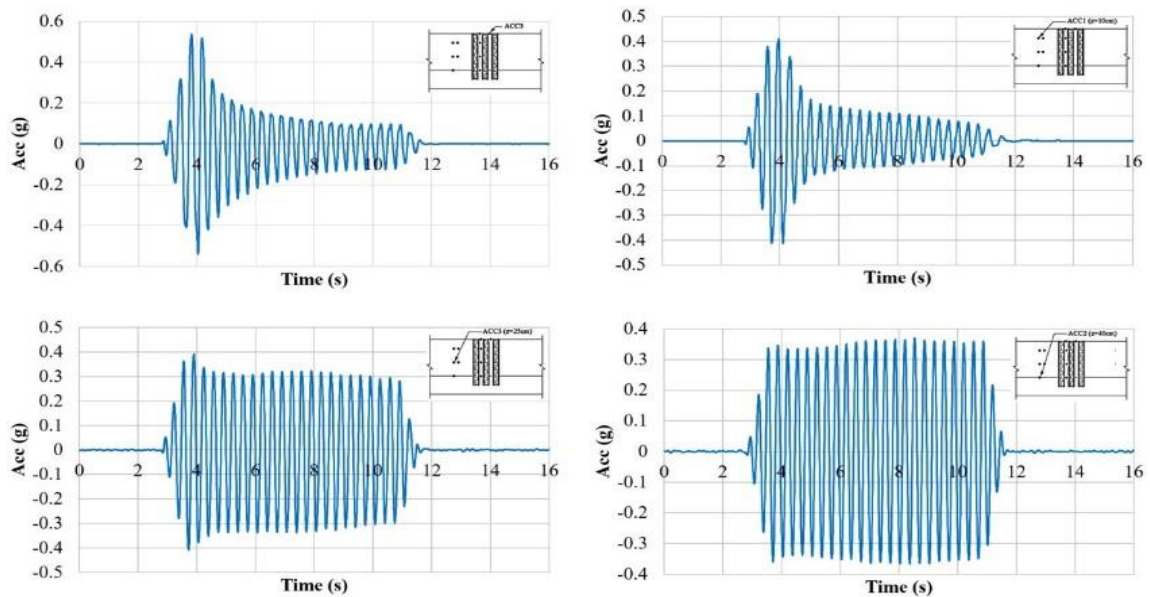
در شکل‌های ۹ الی ۱۲، تاریخچه‌ی زمانی شتاب برای ۴ مدل مشاهده می‌شود. متأسفانه رکوردی از ACC_5 در مدل ۴ به دست نیامده است. براساس نتایج به دست آمده، دامنه‌ی شتاب پایه در اثر انتقال به سطح زمین تا پیش از



شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی شتاب افقی (مدل ۱).

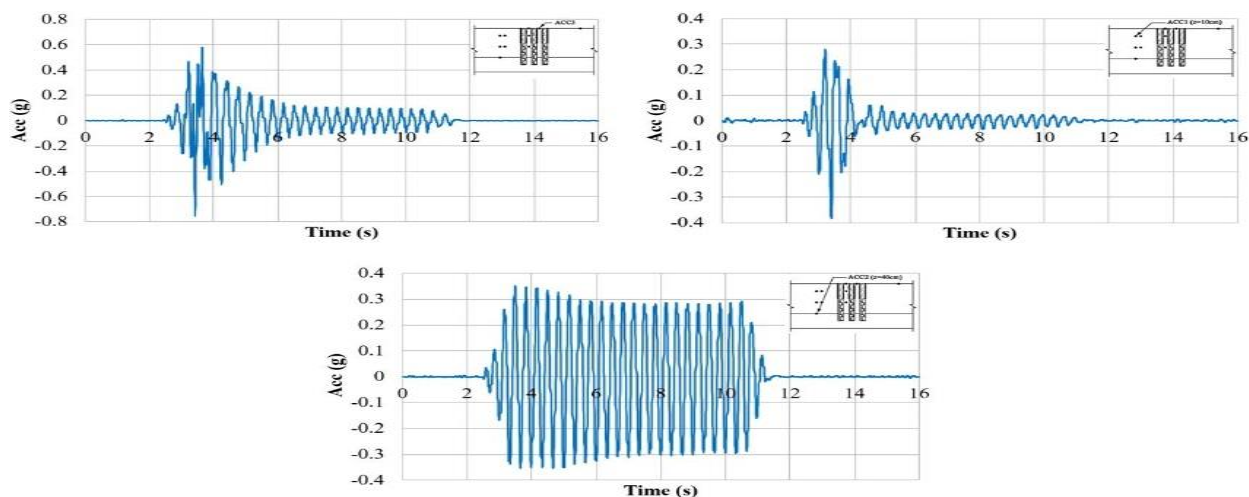


شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی شتاب افقی (مدل ۲).

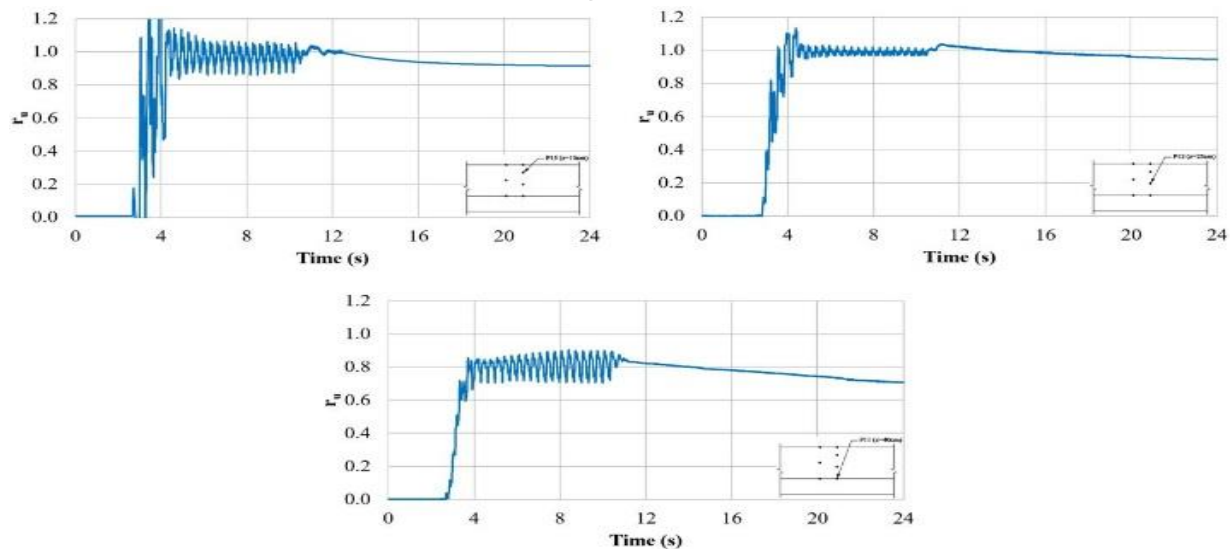


شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی شتاب (مدل ۳).

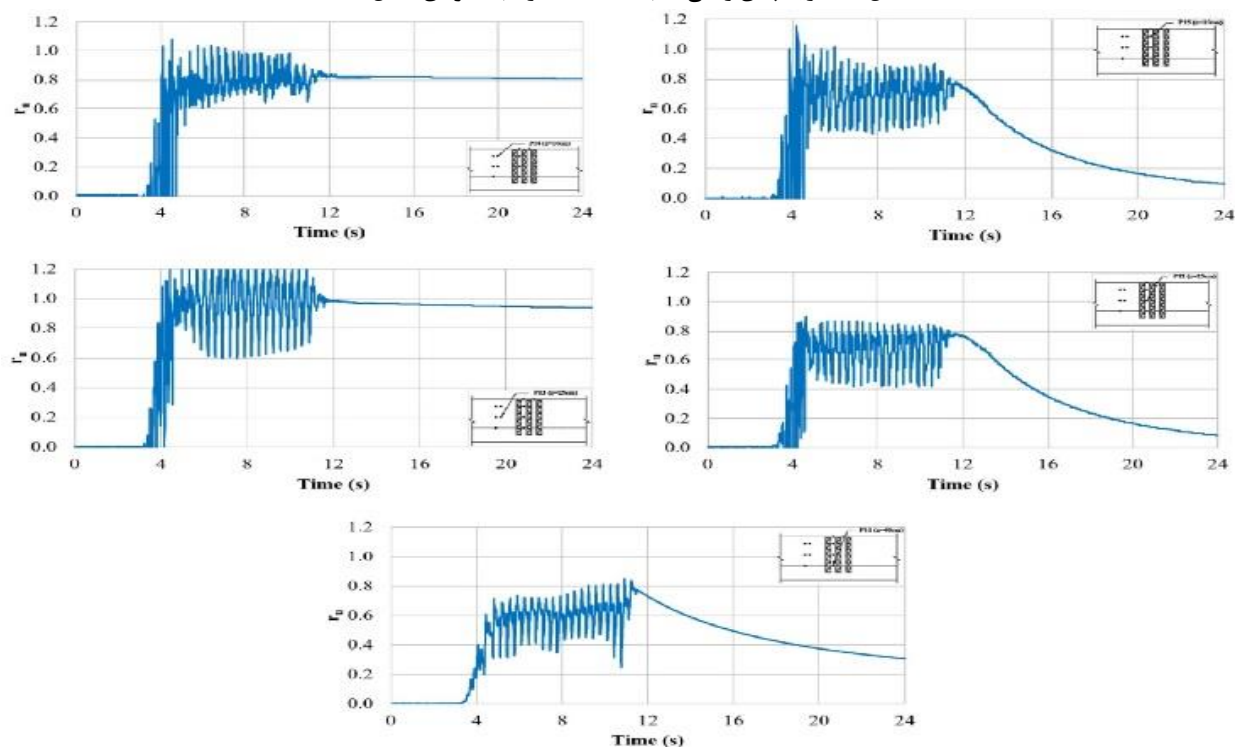
مطالعه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای روانگرا توسط ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با ژئوتکستایل با استفاده از میز لرزان کوچک مقیاس - پرنای پاریختی و همکار



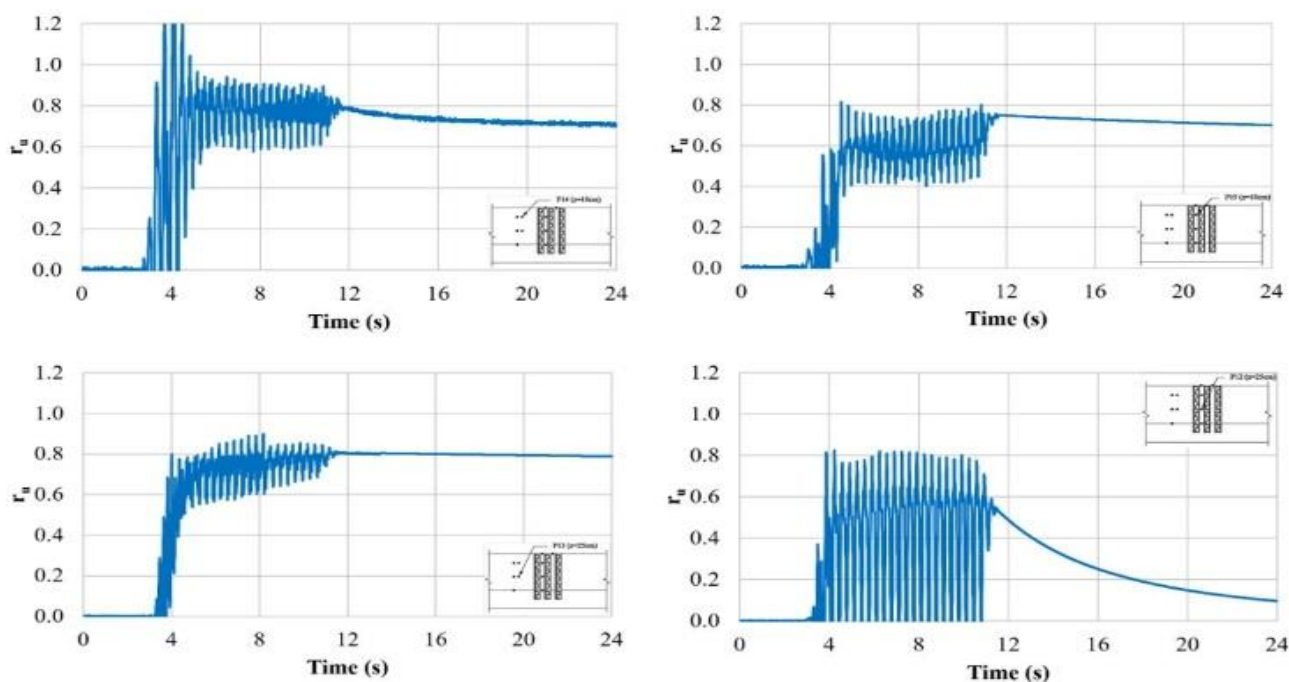
شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی شتاب (مدل ۴).



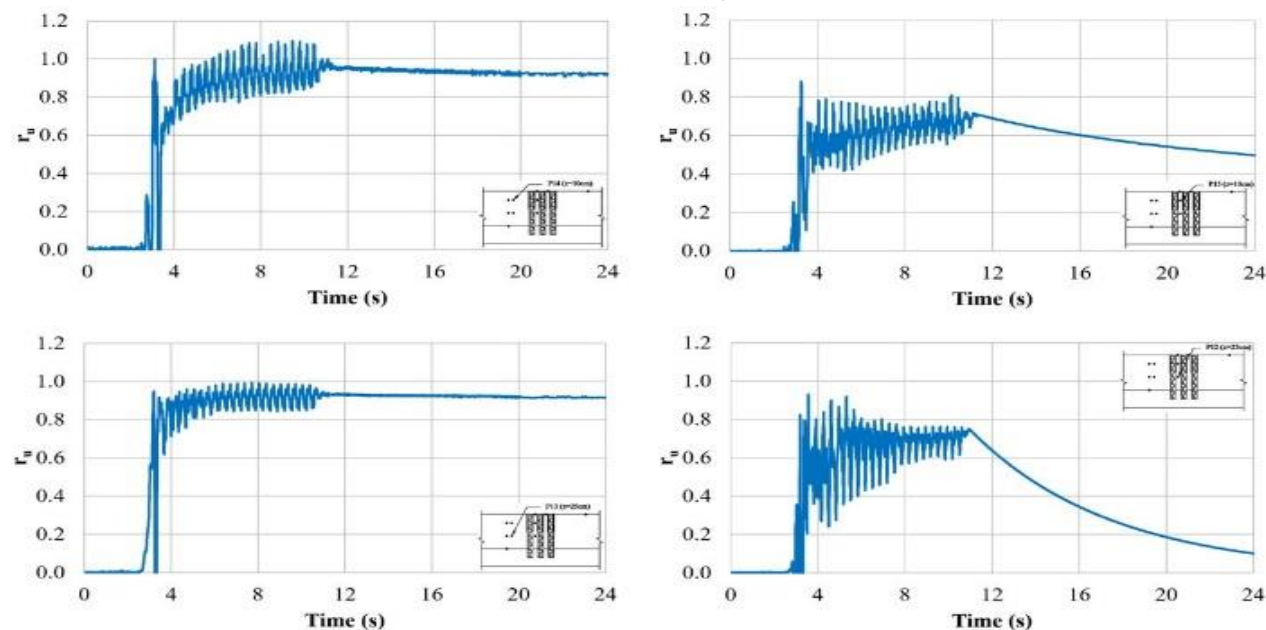
شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۱).



شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۲).



شکل ۱۵. تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۳).

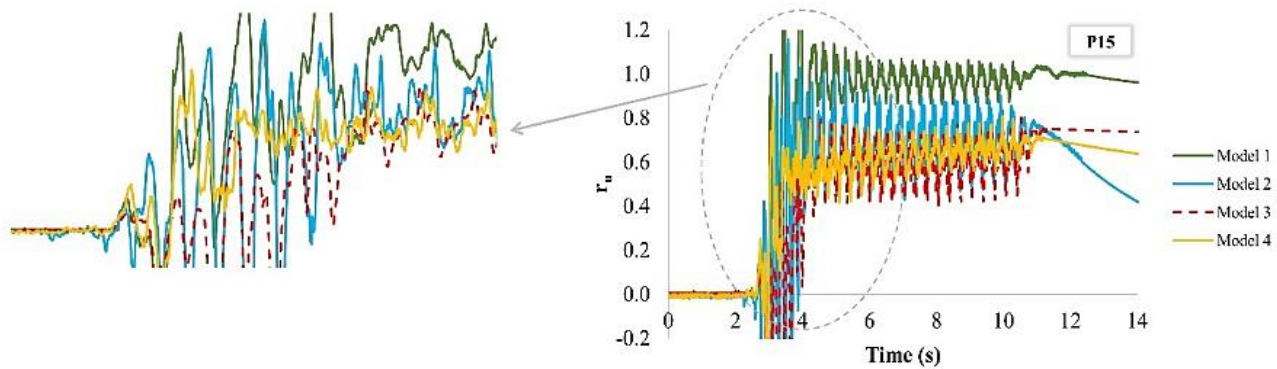


شکل ۱۶. تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۴).

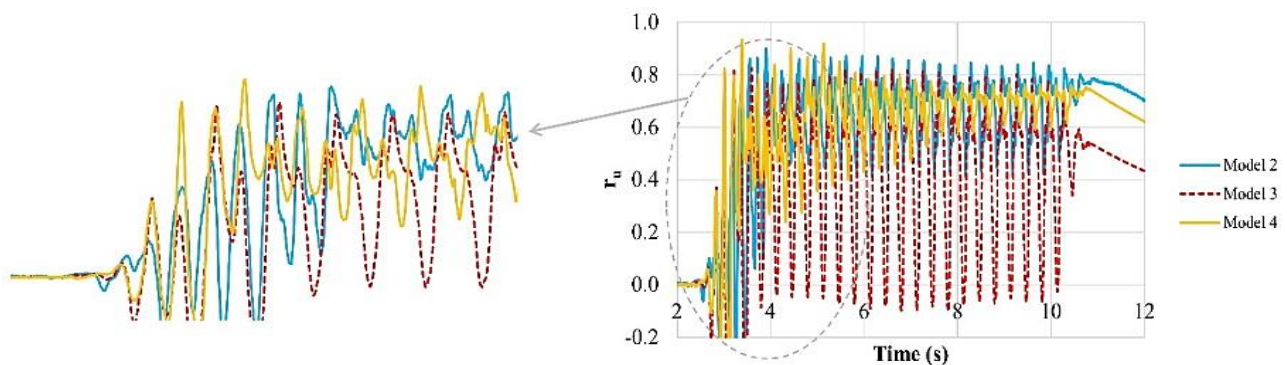
فشار آب منفذی را سرعت بخشیده‌اند. پس از پایان تحریک، اضافه فشار آب منفذی در محدوده‌ی بهسازی‌شده (P12 و P15) به سرعت کاهش یافته است؛ که نشانگر اثربخشی ستون‌های سنگی در موارد غیردینامیکی، به معنای کاهش مؤثر روانگرایی ثانویه در نتیجه‌ی جریان آب پس از زلزله است. در حالی که برای مدت طولانی پس از اتمام تحریک، P13 و P14 همچنان وجود اضافه فشار آب منفذی را نشان می‌دهند. حتی اگر ستون‌های سنگی از وقوع روانگرایی جلوگیری نکنند، زمانی که خاک در حالت روانگرایی باقی می‌ماند، را کاهش می‌دهند. وجود ستون‌های سنگی منجر به افزایش مقاومت در برابر روانگرایی می‌شود. در نتیجه، در مقایسه با میدان آزاد، تعداد سیکل بیشتری جهت دستیابی به مقدار ۰/۹۵ برای r_u نیاز است. به‌عنوان مثال، با توجه به نتایج P15 در شکل ۱۴، در حالی که روانگرایی پس از سه سیکل رخ داده است، فقط یک سیکل برای مدل ۱ در حسگر مرتبط کافی است. تسلیح ستون سنگی

فشار آب منفذی و σ'_{v0} تنش مؤثر عمودی اولیه در موقعیت قرارگیری حسگر است. مقدار بیش از ۰/۹۵ برای r_u نشانگر وقوع روانگرایی است. [۴۳] مطابق شکل ۱۳، P12 و P15 به ترتیب پس از ۲/۵ و ۱ سیکل از شروع تحریک، روانگرایی خاک را در میدان آزاد نشان داده‌اند.

با افزایش عمق، زمان لازم جهت دستیابی به ۰/۹۵ اضافه فشار آب منفذی افزایش یافته است؛ که نشان می‌دهد روانگرایی ابتدا در مجاورت سطح رخ داده و سپس به سمت عمق پیش رفته است. مطابق شکل ۱۴، در منطقه‌ی بهسازی‌شده، هر چه حسگر به سطح مدل نزدیک‌تر بوده است، با سرعت کمتری زهکشی انجام شده است. با این حال، P13 و P14 تا حدی نرخ زوال مشابهی را نشان می‌دهند. علاوه بر این، مقایسه‌ی رکوردهای P13 و P12 و همچنین رکوردهای P14 و P15 نشان می‌دهند که ستون‌های سنگی، نرخ زوال اضافه



شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۱۰ سانتی‌متری در مدل‌های ۱ الی ۴.



شکل ۱۸. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۲۵ سانتی‌متری در مدل‌های ۱ الی ۴.

۳ نشان می‌دهد که تسلیح ستون سنگی، ناحیه‌ی وسیع‌تری در اطراف گروه را تحت اثر افزایش سختی قرار داده است. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در شروع تحریک، تغییرات r_{II} در عمق ۱۰ سانتی‌متری در مدل‌های ۱ و ۳ به ترتیب بیشترین و کمترین نرخ افزایش را در میان تمام مدل‌ها داشته‌اند. در حالی که نرخ تغییرات در مدل‌های ۲ و ۴، تقریباً مشابه بوده است. با توجه به شکل ۱۸، در عمق ۲۵ سانتی‌متری، مشابه عمق ۱۰ سانتی‌متری، نرخ تغییرات r_{II} در مدل‌های ۲ و ۴ همچنان برابر و بالاتر از نرخ تغییرات در مدل ۳ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت نرخ تغییرات r_{II} در مدل‌ها، در عمق ۲۵ سانتی‌متری بسیار کمتر از عمق ۱۰ سانتی‌متری بوده است.

۸. نتیجه‌گیری

یافته‌های اصلی مطالعه‌ی حاضر به این شرح هستند:

۱. وجود ستون‌های سنگی، مقاومت در برابر روانگرایی را افزایش می‌دهند، به گونه‌ای که نسبت به میدان آزاد (۱ سیکل)، تعداد سیکل‌های بیشتری (۳ سیکل) برای دستیابی به مقدار بیش از ۰/۹۵ برای پارامتر r_{II} نیاز است.
۲. تسلیح ستون‌های سنگی، بیشترین تأثیر را در لایه‌های سطحی دارد. در ترازهایی که حتی وجود ستون سنگی سنتی از وقوع روانگرایی جلوگیری نکرده است.
۳. ساخت ستون‌های سنگی به‌طور قابل‌توجهی مقاومت رسوب‌های ماسه‌ای سست را در برابر روانگرایی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، محصور کردن ستون‌های سنگی با ژئوتکستایل نیز این مقاومت را بیش از پیش افزایش می‌دهد. در مطالعه‌ی حاضر، در یک عمق مشخص، با اجرای گروه ستون‌های سنگی،

توسط ژئوتکستایل می‌تواند از روانگرایی در P15 جلوگیری کند. در مدل ۳، نسبت به مدل ۲، محدوده‌ی وسیع‌تری تحت اثر بهسازی و افزایش سختی قرار گرفته است، که این موضوع با مقایسه‌ی روند تغییرات P13 در دو مدل اخیر مشهود است.

مطابق شکل‌های ۱۴ الی ۱۶، پس از اتمام تحریک، زوال اضافه فشار آب منفذی در ترازهای پایین‌تر در محدوده‌ی بهسازی‌شده با نرخ بیشتری رخ داده است. زیرا تخلیه از لایه‌های عمیق‌تر، زمان لازم برای شروع زهکشی لایه‌های سطحی - تر را طولانی‌تر می‌کند، لذا می‌توان استدلال کرد که حسگرهای عمیق‌تر از تمام ظرفیت زهکش استفاده می‌کنند و لایه‌های سطحی‌تر باید تا آزاد شدن مسیر زهکشی منتظر بمانند. در لایه‌های سطحی‌تر، آب در عوض حرکت به سمت زهکش، به حرکت خود از میان سطح ادامه می‌دهد. برخی مطالعات، [۳۳ و ۴۲] نیز روند مشابهی را گزارش کرده‌اند. در مدل ۴ در مقایسه با مدل ۳، لایه‌های سطحی محدوده‌ی بهسازی‌نشده (P14)، مدت زمان بیشتری در حالت روانگرایی باقی مانده‌اند. مقایسه‌ی شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که تسلیح تمام طول ستون‌های سنگی در مقایسه با تسلیح بخش فوقانی، سبب رفتار سخت‌تر مدل شده است. با تسلیح ستون سنگی توسط ژئوتکستایل، بیشینه‌ی مقدار r_{II} در اعماق ۱۰ و ۲۵ سانتی‌متری محدوده‌ی بهسازی‌شده، به ترتیب در حدود ۳۰ و ۸ درصد نسبت به ستون سنگی سنتی کاهش یافته است. بنابراین، اثر افزایش سختی مسلح‌کننده در اعماق سطحی‌تر بیشتر بوده است. مطابق شکل ۱۴، مقایسه‌ی رکوردهای P13 و P12 نشان می‌دهد که در مدل ۲، بیشینه‌ی مقدار r_{II} در محدوده‌ی داخل گروه ستون سنگی در حدود ۳۳٪ کمتر از مقدار متناظر در محدوده‌ی بهسازی‌نشده بوده است. در حالی که مطابق شکل ۱۵، با تسلیح ستون سنگی، مقدار کاهش صورت‌گرفته در حدود ۸٪ بوده است. این موضوع با توجه به عدم روانگرایی در عمق ۲۵ سانتی‌متری در مدل

۶. در صورت وجود ستون‌های سنگی سنتی/ مسلح، نرخ اتلاف اضافه‌فشار آب منفذی در اعماق پایین‌تر بیشتر بوده است. می‌توان گفت سیال در اعماق پایین‌تر از تمام ظرفیت ستون‌های زهکش استفاده می‌کند و آب در لایه‌های سطحی‌تر باید تا فراهم‌آمدن امکان زهکشی منتظر بماند.

۷. با تسلیح ستون سنگی توسط ژئوتکستایل، که منجر به افزایش سختی می‌شود، اعماق سطحی‌تر که تنش همه‌جانبه‌ی بسیار کمی دارند، در برابر روانگرایی مقاومت می‌کنند. اثر این افزایش سختی حتی در خارج محدوده‌ی بهسازی‌شده هم مشاهده می‌شود. به گونه‌ای که با وجود عدم وقوع روانگرایی در عمق ۲۵ سانتی‌متری، همچنان بیشینه‌ی مقدار r_u در محدوده‌ی بهسازی‌شده توسط گروه ستون‌های سنگی مسلح، حدود ۸٪ کمتر از خارج محدوده‌ی بهسازی بوده است.

تعداد سیکل لازم برای شروع روانگرایی از ۱ سیکل به ۳ سیکل نسبت به میدان آزاد افزایش یافته است. در حالی استفاده از روکش ژئوتکستایل برای تمام ستون‌های سنگی، از روانگرایی در همان عمق جلوگیری کرده است.

۴. عملکرد ستون‌های سنگی روکش‌شده توسط ژئوتکستایل، به دلیل جلوگیری از آلودگی ستون ناشی از گرفتگی و همچنین تأمین محصورکنندگی کافی، بسیار مؤثرتر از ستون‌های سنگی سنتی بوده است.

۵. تسلیح تمام طول ستون‌های سنگی توسط ژئوتکستایل، از نقطه‌نظر کاهش نرخ و مقدار اضافه‌فشار آب منفذی، بهترین عملکرد را جهت جلوگیری از روانگرایی داشته است. به گونه‌ای که با تسلیح ستون سنگی، بیشینه‌ی مقدار r_u تا ۳۰٪ در سطح و تا ۸٪ در عمق نسبت به ستون سنگی سنتی کاهش داشته است.

References- منابع

- Pakbaz, H. and Pirmoradian, M., 2012. Investigation on the quality of rainfall-induced runoffs in watersheds. Proceedings of the First Conference on Iran's Reservoirs [In Persian]. https://ircsa.ir/files/site1/maghalate_hamayesh/50.pdf
- Ardeshtir, A., 2016. Management of surface water collection system and urban flood control. AmirKabir University of Technology Publications, First Edition, page 230 [In Persian]. <http://publication.aut.ac.ir/fa/book/show/5192>
- Wang, Y., 2015. A diagnostic decision support system for selecting best management practices in urban/suburban watersheds. Ph.D. thesis, University of Maryland, 301 P.
- Helmrich, A., Markolf, S., Li, R., Carvalhaes, T., Kim, Y., Bondank, E., Natarajan, M., Ahmad, N. and Chester, M., 2021. Centralization and decentralization for resilient infrastructure and complexity. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 1(2), p. 021001. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac0a4f>
- Taylor, A. and Wong, T., 2002. Non-structural stormwater quality best management practices – an Overview of their use, value, cost and evaluation. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Technical Report 02/11.
- NZWERF, 2004. On-site stormwater management guideline. *New Zealand Water Environment Research Foundation*.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S. and Viklander, M. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), pp. 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Seo, M., Jaber, F., Srinivasan, R. and Jeong, J., 2017. Evaluating the Impact of Low Impact Development (LID) Practices on Water Quantity and Quality under Different Development Designs Using SWAT. *Water*, 9(3), p. 193. <https://doi.org/10.3390/w9030193>
- Michael, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S.B. and Djordjevic, S., 2004. Potential and limitations of LID modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), pp. 284-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014>
- Chen, J., Liu, Y., Gitau, M. W., Engel, B. A., Flanagan, D.C. and Harbor, J. M., 2019. Evaluation of the effectiveness of green infrastructure on hydrology and water quality in a combined sewer overflow community. *Science of the Total Environment*, 665, pp. 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.416>
- Reid, M., 1982. Lessons of history in the design and acceptance of rainwater cistern systems. In: Proceedings of the International Conference on Rainwater Catchment Systems, F.N. Fujimura (Editor). International Rainwater Catchment Systems Association, Honolulu, Hawaii, pp. 1-8.
- Glendenning, C.J. and Vervoort, R.W., 2010. Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 1: Field-Scale Impacts. *Agricultural Water Management* 98(2), pp. 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003>
- Herrmann T. and Schmida, U., 1999. Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*

- I(4), pp. 307-316. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8)
14. Nolde, E., 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, 215(1-3), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.033>
15. Furumai, H., 2008. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), pp. 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.029>
16. <https://santacruzpermaculture.com/2019/06/rainwater-harvesting-tanks-cisterns/>
17. Hosseini, S. H., 2015. Utilizing low-impact development (LID) method in urban runoff management to reduce urban costs with an emphasis on tehran. International Conference on Advances in Civil Engineering, Architecture, Environmental Engineering, and Urban Management, Tehran, <https://civilica.com/doc/389566> CAECONF01_033 [In Persian].
18. Barrett, M., 2015. *International low impact development conference 2015*. American Society of Civil Engineers/ASCE. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479025>
19. Steffen J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., Burian, S. J., 2013. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities. *Journal of the American Water Resources Association*, 49 (4), pp. 810-824. <http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12038>
20. Lye, D.J., 1992. Microbiology of rainwater cistern systems: A review: (Cistern, Rainwater, Microorganisms). *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 27(8), pp.2123-2166. <https://doi.org/10.1080/10934529209375845>
21. <https://www.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2000758566/>
22. Alyaseri, I., Zhou, J., 2016. Stormwater volume reduction in combined sewer using permeable pavement: city of St. Louis. *Journal of Environmental Engineering*, 142 (4), p.04016002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001056)
23. Selbig, W.R., Buer, N. and Danz, M.E., 2019. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. *Journal of Environmental Management*. 1(251), p. 109510. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510>
24. Cheng, Y. Y., Lo, S. L., Ho, C. C., Lin, J. Y. and Yu, S. L., 2019. Field testing of porous pavement performance on runoff and temperature control in Taipei city. *Water*, 11 (12), p. 2635, <https://doi.org/10.3390/w11122635>
25. Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E. and Kim, H., 2012. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Research*, 46(20), pp. 6731-6742. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.037>
26. Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J. and Viklander, M., 2019. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment*, 669, 431-447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.072>
27. MDE, Maryland Department of the Environment, 2009. 2000 Maryland stormwater design manual Volumes I & II.
28. NHDES (New Hampshire Department of Environmental Services), 2011. Pollutant removal efficiencies for best management practices for use in pollutant loading analysis.
29. Birch, G. F., Fazeli, M. S. and Matthai, C. 2005. Efficiency of an infiltration basin in removing contaminants from urban stormwater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 101, pp. 23-38. <https://doi.org/10.1080/15730620600855894>
30. Lee, J. G., Borst, M., Brown, R. A., Rossman, L. and Simon, M. A., 2014. Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20 (5), p. 04014070. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001088)
31. [https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Infiltration Trench: Life Cycle Costs](https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Infiltration_Trench:_Life_Cycle_Costs)
32. Kratky, H., Li, Z., Chen, Y., Wang, C., Li, X. and Yu, T., 2017. A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11, pp.1-15. <http://dx.doi.org/10.1007/s11783-017-0982-y>
33. <https://www.deeproot.com/blog/blog-entries/3-questions-about-bioretention-soils-and-infiltration/>
34. Damodaram, Chandana, Marcio H. Giacomoni, C. Prakash Khedun, Hillary Holmes, Andrea Ryan, William Saour, and Emily M. Zechman, 2010. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management 1, *Journal of the American Water Resources Association*, 46(5), pp. 907-918. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x>
35. Mahab Qhods Consulting Engineering Company (2011). Comprehensive plan for surface water Management in Tehran, Volume Eight, Modern Approach (LID/BMP Techniques). Technical and Engineering Consultancy Organization of Tehran Municipality, Technical and Civil Deputy [In Persian].

36. Tang, S., Jia, Z., Xu, Q., Luo, W. and Shan, Z., 2020. Examining the first flush effect based on the relationship between concentrations and discharge rates in a rain garden inflow. *Desalination and Water Treatment*, 180, pp.174-184. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25080>
37. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, 292, p. 112766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>
38. Hsieh, C. h., Davis and A. P., 2005. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 131 (11), pp. 1521–1531. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:11\(1521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1521))
39. Fassman-Beck, E., Wang, S., Simcock, R. and Liu, R., 2015. Assessing the effects of bioretention's engineered media composition and compaction on hydraulic conductivity and water holding capacity. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 1 (4), p. 04015003. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000799>
40. Hunt, W. F., Hathaway, J. M., Winston, R. J. and Jadlocki, S. J., 2010. Runoff volume reduction by a level spreader-vegetated filter strip system in suburban Charlotte, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15 (6), pp. 499–503. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000160)
41. Roy-Poirier, A., Champagne, P. and Filion, Y., 2010. Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering* 136 (9), 878–889. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227)
42. Goh, H. W., Lem, K. S., Azizan, N. A., Chang, C. K., Talei, A., Leow, C. S., Zakaria, N. A., 2019. A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics. *Environmental Science and Pollution Research*. 26 (15), pp. 14904–14919. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05041-0>
43. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, 292, p.112766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>
44. Wang, J., Chua, L. H. C. and Shanahan, P., 2017a. Evaluation of pollutant removal efficiency of a bioretention basin and implications for stormwater management in tropical cities. *Water Research and Technology*, 3(1), 78–91. <https://doi.org/10.1039/C6EW00285D>
45. <https://www.wake.gov/departments-government/water-quality-programs/watershed-management-erosion-sedimentation-control-floodplain-and-stormwater-management/stormwater-plan-review-and-permitting/stormwater-control-measures>
46. Livingston, E. H., Shaver, E., Skupien, J. J., Horner, R. R., 1997. Operation, maintenance, and management of stormwater management systems. Watershed Management Institute, Inc; August 1997. <https://stormwater.ucf.edu/wp-content/uploads/2014/09/stormwaterOMM.pdf>
47. Fortunato , C., McDonough, O. and Chambers, R., 2012. The effectiveness of dry and wet stormwater detention basins as sediment and nutrient processors. In: *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges*. pp. 1-12. [https://doi.org/10.1061/40763\(178\)98](https://doi.org/10.1061/40763(178)98)
48. Ivanovsky, A., Belles, A., Criquet, J., Dumoulin, D., Noble, P., Alary, C. and Billon, G., 2018. Assessment of the treatment efficiency of an urban stormwater pond and its impact on the natural downstream watercourse. *Journal of Environmental Management*, 226 (1), pp. 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.015>
49. Nayeb Yazdi, Scott, D., Sample, D. J. and Wang, X., 2021. Efficacy of a retention pond in treating stormwater nutrients and sediment. *Journal of Cleaner Production*, 290, p. 125787. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125787>
50. Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, Ch., Bray, R. and Shaffer, P., 2007. The SUDS manual (C697). <http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf>
51. Vishwakarma, S. and Dharmendra, D., 2024. Evaluating domestic wastewater treatment efficiency of field scale hybrid flow constructed wetland in series. *Pollution*, 10 (1), pp. 392-403. <https://doi.org/10.22059/POLL.2023.364339.2041>
52. https://waterprojectsonline/custom_case_study/clifton-icw-2022/
53. Shafique, M., Kim, R. and Lee, D., 2016. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15, pp. 715– <https://doi.org/719.10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>
54. Morgan, S., Celik, S. and Retzlaff, W., 2012. Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of*

- Environmental Engineering*, 139, pp. 471–478.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589)
55. Getter, K.L., Rowe, D.B. and Andresen, J.A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31, pp. 225–231.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>
56. Vijayaraghavan K., 2016. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp. 740–52.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
57. Shafique, M., Kim, R. and Kyung-Ho, K., 2018. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. *Sustainability*, 10, p. 584;
<https://doi.org/10.3390/su10030584>
58. Stovin, V., Vesuviano, G. and Kasmin, H., 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414, pp. 148–161.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
59. Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Wong, T. and Binning, P. J., 2015. Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches. *Journal of Hydrology*, 529, pp. 1360 –1372.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.047>
60. Copeland, C., 2016. Green Infrastructure and Issues in Managing Urban Stormwater. Congressional Research Service 7-5700 R43131. www.crs.gov
61. EPA, 2017. Clean Water Act Methods Update Rule for the Analysis of Effluent. U.S. Environmental Protection Agency (EPA-HQ-OW-2014-0797, FRL-9957-24-OW).
62. Marks, A. A. C., 2014. Stormwater management in Boston: to what extent are demonstration projects likely to enable citywide use of green infrastructure? (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
63. Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., 2005. Mass loading of first flush pollutants with treatment strategy simulations. *Transportation Research Record*, 1904, pp. 133–143. <https://doi.org/10.3141/1904-14>
64. Pati, A. and Sahoo, B., 2022. Effect of Low-Impact Development Scenarios on Pluvial Flood Susceptibility in a Scantily Gauged Urban-Peri-Urban Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(1), p. 05021034.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002147](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002147)
65. Ontario Ministry of Environment, 2003. Stormwater Management Planning and Design Manual.
66. Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Houle, J. J., Avellaneda, P., Briggs, J., Fowler, G. and Wildey, R., 2009. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions. *Journal of Environmental Engineering*, 135(3), pp. 128-137.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(128\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(128))
67. EU, 2016. The EU floods directive. http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/impl_em.html
68. Maigne, J., 2006. Sustainable management of 'alternative techniques' in stormwater purification. École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF - National School of Rural Water and Forestry Engineering). Centre de Montpellier, France. https://www.agroparistech.fr/IMG/doc/Version_finale_anglais_Maigne.doc
69. OIEau, 2014. Centre National de Formation aux Métiers de l'Eau (CNFME) e De nouvelles plates-formes pédagogiques dédiées à la gestion intégrée des eaux pluviales (in French). <http://www.oieau.fr/oieau/notre-actualite-et-avancement-de/article/cnfme-de-nouvelles-plates-formes?lang/4fr>
70. Schuetze, T. and Chelleri, L., 2013. Integrating decentralized rainwater management in urban planning and design: flood resilient and sustainable water management using the example of coastal cities in The Netherlands and Taiwan. *Water*, 5, pp. 593-616.
<https://doi.org/10.3390/w5020593>
71. Jeong, H., Kim, H., Teodosio, B., Ramirez, R. and Ahn, J., 2015. A review of test beds and performance criteria for permeable pavements. In: Chang, et al. (Eds.), *Advances in Civil Engineering and Building Materials IV*. Taylor and Francis, London.
<https://doi.org/10.1201/b18415-58>
72. ARSI, 2016. Association for rainwater storage and infiltration technology, Japan, Membership. http://arsit.or.jp/membership_list
73. Imbe, M., 2013. Stormwater treatment from the road in Japan. In: Regional Workshop on Eco-Efficient Water Infrastructure towards Sustainable Urban Development and Green Economy in Asia and the Pacific, 12-13 December 2013, Bangkok, Thailand.
http://www.unescap.org/sites/default/files/3.2%20Japan_Imbe.pdf
74. Lee, J. G., Selvakumar, A., Alvi, Kh., Riverson, J., Zhen, J.X., Shoemaker, L. and Lai, F., 2012. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling and Software*, 37, pp. 6-18.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.04.011>

75. Mosleh, L. and Negahban-Azar, M., 2021. Role of models in the decision-making process in integrated urban water management: a review. *Water*, 13(9), p.1252. <https://doi.org/10.3390/w13091252>
76. Jia, H. F., Lu, Y. W., Zhen, X. and Yu, S. L., 2012. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of Beijing Olympic village. *Separation and Purification Technology*, 84, pp. 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.026>
77. Shoemaker, L., Riverson, J., Khalid, A., Zhen, J., Sabu, P. and Rafi, T., 2009. SUSTAIN, a framework for placement of best management practices in urban watersheds to protect water quality. Report EPA/600/R-09/095, USEPA, Washington, DC, USA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/sustain_complex_tools.pdf
78. Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S.L., Zhen, J.X. and Lu, Y., 2013. Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, pp. 7915–793. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3144-0>
79. Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, 16(3), pp. 195–231. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)
80. Holt, E., Koivusalo, H., Korkealaakso, J., Sillanpää, N. and Wendling, L., 2018. Filtration systems for stormwater quantity and quality management, Guideline for Finnish implementation. *VTT technical Research Centre of Finland Ltd*, p. 95.
81. Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H. and Koivusalo, H. 2014. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 512, pp. 482–497. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.013>
82. ForutanDanesh, 2021. Quantity and quality evaluation of urban runoff based on best management practices low-impact development (BMPs/LID) in gorgan. Ph.D thesis of watershed management. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University Faculty of Natural Resources, [in Persian].
83. Choi, Sumin, Seongsim Yoon, Byongju Lee, and Youngjean Choi, 2015. Evaluation of high-resolution QPE data for urban runoff analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, 48(9), pp. 719-728. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.9.719>
84. Kim, J., Lee, J., Song, Y., Han, H. and Joo, J., 2018. Modeling the runoff reduction effect of low impact development installations in an industrial area, South Korea. *Water*, 10 (8), p. 967. <https://doi.org/10.3390/w10080967>
85. Kamali, M., Tajrishi, M. and Nazari Alavi, A., 2012. Investigation of surface runoff characteristics in Tehran. <https://civilica.com/doc/166096>. ICCE09 1029 [In Persian].
86. Taghizadeh, S., 2017. Performance evaluation and optimization of innovative management methods (LID-BMP) in improving the quality and quantity of surface runoff in Tehran: case study of region 22. Master's Thesis, University of Qom [In Persian]. <https://sid.ir/paper/381460/fa>
87. Rajabnezhad, M., 2017. Utilizing innovative methods (LID-BMPs) in urban runoff management with a focus on pollution reduction. Master's Thesis, University of Qom [In Persian]. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9208bd2d9dda5875cde861d60a7a627>
88. Binesh, 2015. Investigating the effect of applying the best management practices on the quantity and quality of urban stormwater. [Third National Conference on Flood Management and Engineering with Urban Floods Approach](#) [in Persian].
89. Movahedinyia, M., Vali Samani, J. M. and Barakhshi, F., 2017. Investigating the effect of low-impact development (LID) rain barrel method on reducing urban flooding. *Water and Irrigation Management*, 7(1), pp. 1-16. [InPersian] <https://doi.org/10.22059/jwim.2017.63736>
90. Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H. and Mahabadi, N. A., 2021. Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), pp. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00870-2>
91. Nazari, A., Roozbahani, A. and Hashemy Shahdanu, S.M., 2023. Integrated SUSTAIN-SWMM-MCDM approach for optimal selection of LID practices in urban stormwater systems. *Water Resource Management*, 37, pp. 3769-3793. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03526-9>
92. Naeimi, G., 1394. Integrated storm water and groundwater management, a case study: Isfahan metropolis. Master thesis, Isfahn Industrial University, Civil Engineering Faculty, [in Persian].
93. Valipour, J., 2018. Designing Permeable Pavement and Urban Runoff Management (case study: Khorramabad City). Master thesis of Urban Design, Payam Noor University, East Tehran Branch [in Persian].
94. Ahmadi, H., 2023. Optimization of runoff management using metaheuristic algorithm. Master thesis of Business Managemen, Mashhad University [in Persian]



Research Article

An Integrated Approach for Simulation of Two-Phase Flows in Naturally Fractured Reservoirs Using Embedded Discrete Fracture Model and Aerial Image Processing

Ali Heshmati and Mehrdad T. Manzari *

Department of Mechanical Engineering of Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author:(mtmanzari@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 14 May 2024

Revised: 22 June 2024

Accepted: 14 July 2024

Keywords:

Natural fractured reservoirs, embedded discrete fracture model (EDFM), image processing, two-phase flow, aerial imaging, outcrop.

Abstract

This paper introduces an integrated approach for simulating two-phase flows in naturally fractured reservoirs. The proposed computational process comprises two key steps: 1) generating a representation of the fracture network from aerial images using image processing techniques, 2) conducting two-phase flow simulations using the Embedded Discrete Fracture Method (EDFM). The reservoir contains only oil and water as immiscible incompressible fluids, with the assumption that the fracture system matches surface outcrop observations. Python libraries are utilized for image processing to convert aerial images into a fracture system defined by line segments. The effect of various tuning parameters, such as image resolution and edge detection, on the final fracture model is investigated. Once a robust fracture system representation is achieved, the reservoir geometry is defined, and boundary conditions are set. The problem is solved using the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST), which includes an EDFM module for accurate analysis of naturally fractured reservoirs by incorporating detailed information, yielding precise fluid flow predictions. All types of fracture-matrix and fracture-fracture intersections and fluid exchanges between matrix and fractures are incorporated in the EDFM. Simulation results are verified against a benchmark problem, and the influence of rock and fracture physical properties on the flow field is examined. The study finds that rock permeability significantly affects fluid flow compared to fracture aperture or permeability. For instance, a 3 percent decrease in oil production is observed when increasing fracture aperture from 0.15 (mm) to 0.21 (mm), while increasing the matrix permeability from 1 to 20 millidarcy leads to a 22 percent increase.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

The author is an Editorial Board Member/Editor-in-Chief/Associate Editor/Guest Editor for Sharif Journal and was not involved in the editorial review or the decision to publish this article.

Authors contribution statement

Ali Heshmati: Conception and design, implementation, obtaining results, data interpretation, drafting and reviewing manuscript

Mehrdad Taghizadeh Manzari: Conception and design, data interpretation, drafting and reviewing the manuscript

To Cite this article:

Heshmati, A. and T.Manzari, M. 2025. An integrated approach for simulation of two-phase flows in naturally fractured reservoirs using embedded discrete fracture model and aerial image processing, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 58-69. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.63375.3270>



شبیه‌سازی یکپارچه‌ی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی با روش ترک مجزای افزوده و پردازش تصاویر هوایی

علی حشمتی و مهرداد تقی‌زاده منظری*

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mtmanzari@sharif.edu)

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵	در نوشتار حاضر، یک فرآیند یکپارچه برای شبیه‌سازی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی ارائه شده است؛ که شامل دو بخش اصلی است: (۱) تولید شبکه‌ی ترک‌ها از یک تصویر هوایی و اختصاص آن به سنگ مخزن، (۲) شبیه‌سازی جریان در مخزن با کمک روش ترک مجزای افزوده. جزئیات پردازش تصویر و نحوه‌ی تشخیص هر ترک تشریح و تأثیر پارامترهای مؤثر در کیفیت نتایج بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی با کمک یک مسئله‌ی نمونه، راستی‌آزمایی شده است. همچنین، تأثیر خواص فیزیکی سنگ و ترک‌ها در جریان گزارش شده است. نتایج نشان داده‌اند که در یک مخزن دو فازی حاوی آب و نفت، افزایش بازشدگی ترک‌ها از ۰/۱۵ به ۰/۲۱ میلی‌متر باعث کاهش ۳ درصدی تولید نفت و افزایش نفوذپذیری سنگ از ۱ به ۲۰ میلی‌داری، باعث افزایش ۲۲ درصدی آن شده است.
واژگان کلیدی: مخازن ترک‌دار طبیعی، روش ترک مجزای افزوده (EDFM)، پردازش تصویر، جریان دو فاز، تصویربرداری هوایی، رخنمون.	

۱. مقدمه

مخازن طبیعی ترک‌دار از پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی هستند و لذا مدل‌سازی آن‌ها همواره چالشی جدی برای مهندسان مخزن بوده است.^[۱] شبکه‌ی ترک‌ها در یک مخزن ترک‌دار طبیعی، به مجموعه‌ای از ترک‌ها در سنگ اشاره دارد، که در جریان سیال در مخزن تأثیر می‌گذارند. مدل‌سازی شبکه‌ی ترک‌ها، یک چالش بزرگ است؛ زیرا ایجاد مدلی کامل از شبکه‌ی ترک‌ها نیازمند اطلاعات گسترده از هندسه‌ی هر ترک، خواص فیزیکی ترک، و تلاقی آن با سایر ترک‌ها، و لایه‌های مختلف سنگی است، که دستیابی به چنین اطلاعاتی بسیار پرهزینه و دشوار و اغلب غیرممکن است. به همین دلیل اغلب در مطالعات مهندسی مخزن، شبکه‌ی ترک‌ها به صورت تصادفی و بر پایه‌ی مدل‌های آماری بنا می‌شود، که البته در بسیاری موارد با واقعیت، فاصله‌ی قابل ملاحظه‌ای دارد.^[۲]

معمولاً برای تعیین ویژگی‌های هندسی و فیزیکی ترک‌ها، از ترکیبی از

روش‌های مختلف نظیر داده‌برداری از: چاه‌ها،^۱ لرزه‌نگاری،^۲ مشاهدات میدانی، و ... استفاده می‌شود. یکی از روش‌های جدیدی که برای بازتولید شبکه‌ی ترک‌ها به کار می‌رود، مطالعه و تحلیل رخنمون‌ها از طریق تهیه‌ی تصاویر هوایی است. استفاده از رخنمون، روشی قدیمی در زمین‌شناسی است، اما با گسترش تصویربرداری با ماهواره یا پهپاد^۳ و همچنین دانش پردازش تصویر،^۴ این کار از یک فرآیند تجربی و زمان‌بر به یک فرآیند خودکار و هوشمند تبدیل شده است. باید تأکید کرد که تجربه و دانش یک زمین‌شناس مجرب همچنان می‌تواند نقش مهمی در تولید شبکه‌ی دقیق‌تری از ترک‌ها ایفا کند. ارتباط بین تصاویر رخنمون و شبکه‌ی ترک‌ها در اعماق زمین بر این منطق استوار است که چه در سنگ‌های لایه‌ای و چه در سنگ‌های غیرلایه‌ای، ترک‌ها بیشتر به صورت عمودی هستند و می‌توان الگوهای مشابهی را بین ترک‌های سطح زمین و زیر زمین مشاهده کرد (اودلینگ^۵ و همکارانش (۱۹۹۹).^[۳]). هر چند این تناظر یک به یک نیست، اما در نوشتار مذکور فرض شده است که آنچه در سطح به عنوان خطوط ناپیوستگی در سنگ مشاهده می‌شود، نماینده‌ی مناسبی از

^۴ Image processing

^۵ Odling

^۱ Well Log Analysis

^۲ Seismic Methods

^۳ Drone

وضعیت شبکه‌ی ترک‌ها در عمق باشد. به ویژه فرض می‌شود که ابعاد و وضعیت قرارگیری و تقاطع ناپیوستگی‌های مذکور، متناظر با ویژگی‌هایی نظیر طول ترک‌ها و نحوه‌ی تقاطع آن‌ها با یکدیگر باشد.^[۴]

در سال‌های اخیر، از تصاویر هوایی رخنمون‌ها برای مدل‌سازی ترک‌های زیر زمین استفاده شده است. برونا^[۵] و همکارانش (۲۰۱۹)، از داده‌های رخنمون برای ترسیم هندسه‌ی شبکه‌ی ترک‌های زیرسطحی استفاده کرده‌اند. شاه و همکارانش (۲۰۱۶)،^[۶] برای بررسی مدل‌شان از شبکه‌ی ترکی که از مطالعه‌ی بیسدم^[۷] و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۷] به دست آمده بود، استفاده کردند، که براساس عکس‌های رخنمون ساخته شده بود. گایگر^[۸] و همکارانش (۲۰۱۳)،^[۸] از تصویر یک رخنمون در مراکش برای ساخت شبکه‌ی ترک‌ها استفاده کرده‌اند تا دقت شبیه‌سازی خود را افزایش بدهند. بیسدم و همکارانش (۲۰۱۷)،^[۹] با استفاده از تصویربرداری از رخنمون‌ها توسط پهپاد، شبکه‌ی ترک مربوط به سازند جاندارا^[۱۰] را تولید کردند. اگیا^[۱۱] و همکارانش (۲۰۱۹)،^[۱۱] از همان شبکه‌ی ترک برای تحلیل جریان در مخزن استفاده کرده‌اند.

در بسیاری از مطالعات، روش‌های پردازش تصویر برای تجزیه و تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی استفاده شده‌اند؛ که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به دسته‌بندی تصاویر^[۱۱] و استخراج ویژگی^[۱۲] اشاره کرد. منظور از دسته‌بندی تصویر، در واقع دسته‌بندی پیکسل‌های یک تصویر به گروه‌های مختلف براساس ویژگی‌های پیکسل‌ها (از جمله رنگ و شدت روشنایی) است. در دسته‌بندی تصویر، به هر پیکسل برچسبی اختصاص داده می‌شود. پیکسل‌هایی که ویژگی‌های مشابه دارند، با برچسب یکسان نام‌گذاری و دسته‌بندی می‌شوند. به کمک دسته‌بندی کردن پیکسل‌ها در تصویر می‌توان ویژگی‌ها یا الگوهای خاص از یک تصویر را شناسایی یا استخراج کرد.^[۱۰] استخراج ویژگی در مطالعات زمین‌شناسی، کاربردهای گوناگونی، مانند: تشخیص اندازه، شکل، جهت‌گیری، و توزیع ساختارهای زمین‌شناسی (از جمله: گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، یا ترک‌ها) دارد. در استخراج ویژگی از روش‌هایی مانند لبه‌یابی استفاده می‌شود.^[۱۰] به عنوان مثال، واسوکی^[۱۳] و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۱۱] از روش‌های لبه‌یابی، برای نقشه‌برداری و شناسایی ویژگی ساختارهای زمین‌شناسی (از جمله گسل‌ها و ترک‌ها) استفاده کرده‌اند.

پس از تولید هندسه‌ی شبکه‌ی ترک، لازم است خواص فیزیکی هر ترک، شامل نفوذپذیری و بازشدگی^[۱۴] آن مشخص شود و به ترک موردنظر اختصاص یابد. این فرآیند نیز معمولاً با عدم قطعیت زیاد همراه است و در یک شبکه‌ی بزرگ از ترک‌ها نیاز به سعی و خطای زیادی دارد. معیار اصلی برای مناسب بودن انتخاب خواص ذکرشده، نزدیک بودن رفتار مدل ساخته‌شده از نظر جریان سیال به مقادیر ثبت‌شده در چاه‌های تولیدی یا تزریقی مخزن واقعی است، فرایندی که به تطبیق تاریخچه^[۱۵] مشهور است. چالش بعدی، شبیه‌سازی دینامیکی جریان در یک مخزن ترک‌دار طبیعی است. به دلیل پیچیدگی هندسه‌ی ترک‌ها، روش‌های سنتی، شبیه‌سازی مخزن جزئیات ترک‌ها را لحاظ نمی‌کردند و فقط

با کمک مدل‌های تقریبی دو-محیطی^[۱۶]، اندرکنش سنگ و ترک با یکدیگر را تقریب می‌زدند. در میان مدل‌های مذکور، مدل تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه^[۱۷] کامل‌ترین مدل کاربردی محسوب می‌شود. البته یک چنین مدلی دوباره نیاز به تنظیم‌های خاص دارد و معمولاً سعی می‌شود با کمک داده‌های چاه‌های تولیدی، تطبیق تاریخچه صورت گیرد و مدل به واقعیت مخزن نزدیک شود.

در کنار مدل دو محیطی، مدل ترک مجزا^[۱۸] تلاش می‌کند با محسوب کردن جزئیات هندسی و فیزیکی هر ترک، تأثیر آن را در جریان سیال لحاظ کند. این مدل در مقایسه با مدل قبلی، پُرهزینه است؛ و معمولاً برای مسائل کاربردی غیر قابل اجراست. لی و لی^[۱۹] (۲۰۰۸)،^[۱۲] مدل ترک مجزای افزوده (EDFM)^[۲۰] را به عنوان یک جایگزین مناسب برای دو مدل دیگر معرفی کرده‌اند؛ که در آن، هندسه‌ی همه‌ی ترک‌ها با جزئیات کامل در هندسه‌ی مخزن گنجانده می‌شود، ولی به دلیل روش عددی به کاررفته برای شبیه‌سازی جریان، هزینه‌ی محاسباتی به مراتب کمتری از مدل ترک مجزا دارد. البته مدل اخیر هنوز از مدل تقریبی دو محیطی پُرهزینه‌تر است.

برخلاف روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه، که در آن ترک به عنوان یک محیط پیوسته‌ی همپوشان با ماتریس در سرتاسر ناحیه‌ی حل پخش می‌شود؛ در روش EDFM، هندسه‌ی هر ترک دقیقاً و مجزا لحاظ می‌شود. بنابراین در روش EDFM، ترک‌ها با ماتریس و در صورت تلاقی با یکدیگر تبادل جریان می‌کنند، در حالی که در روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه، ترک‌ها دیگر هویت خود را از دست می‌دهند و هر سلول از محیط ترک فقط با سلول متناظر از ماتریس تبادل جریان دارد. در ضمن برخلاف روش EDFM، که خواص فیزیکی ترک (نظیر نفوذپذیری و بازشدگی) را لحاظ می‌کند، روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه از مقادیر متوسط‌گیری‌شده‌ی تخلخل و نفوذپذیری برای ترک استفاده می‌کند، که دقت روش را کاهش می‌دهد. بزرگ‌ترین مزیت روش EDFM، بی‌نیازی آن به تنظیم پارامترهایی نظیر ضریب شکل است، که نقش کلیدی در روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه ایفا می‌کند.

در سال‌های اخیر، اصلاحات متعددی بر روی مدل EDFM انجام شده است، تا قابلیت‌های آن را افزایش دهد. معین‌فر^[۱۳] و معین‌فر و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۱۴] توانایی مدل‌سازی ترک‌های شیب‌دار با زاویه‌ی دلخواه را به مدل افزوده‌اند. همچنین وانگ^[۲۱] و همکارانش (۲۰۱۹)،^[۱۵] برای در نظر گرفتن ترک‌های با شکل‌های دلخواه در هندسه‌ی سه‌بعدی، یک الگوریتم محاسباتی کارآمدتر (3D-EDFM) را ارائه کرده‌اند؛ که به‌طور کلی قادر به بررسی تعداد دلخواه ترک‌های سه‌بعدی با انواع شیب، شکل هندسی، انحناء، و نحوه‌ی اتصال ترک‌ها به یکدیگر است. مدل اولیه‌ی EDFM، سازگاری کمی با مخازن با شکل هندسی نامنظم دارد، هر چند تقریباً تمام مخازن دنیا از این نوع هستند.

¹⁴ Aperture

¹⁵ History matching

¹⁶ Dual continuum

¹⁷ Dual porosity-Dual permeability model

¹⁸ Discrete fracture model

¹⁹ Li & Lee

²⁰ Embedded Discrete Fracture Model

²¹ Wang

⁶ Bruna

⁷ Bisdom

⁸ Geiger

⁹ Jandaira formation

¹⁰ Egea

¹¹ Image classification

¹² Feature extraction

¹³ Vasuki

۲. مدل سازی مخزن

در بخش حاضر، ابتدا روش تولید هندسه‌ی شبکه‌ی ترک‌ها از تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از رخنمون‌ها تشریح و سپس با افزودن شرایط مرزی مناسب و قراردادن چاه‌های (تولید یا تزریق) به هندسه‌ی مذکور، مدل استاتیکی مخزن ساخته شده است. در ادامه، فرمول‌بندی و الگوریتم تحلیل دینامیکی مخزن با کمک روش EDFM توضیح داده شده است.

۱.۲. تولید هندسه‌ی ترک‌ها با پردازش تصویر

در بخش کنونی، فرآیند تولید شبکه‌ی ترک‌ها از تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از یک منطقه‌ی مشخص تشریح شده است. در تولید عکس‌های هوایی، عواملی نظیر: کیفیت تصویر، وجود موانع طبیعی مثل پوشش گیاهی،^[۴] و وجود سایه‌ها می‌توانند در نتیجه‌ی نهایی تأثیر زیادی بگذارند. لذا پس از تهیه‌ی عکس‌های هوایی، لازم است که فرآیند پردازش تصویر روی آن‌ها انجام پذیرد تا در حد امکان، تأثیر عوامل اخیر به میزان کمینه برسد. باید پذیرفت که علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در علم پردازش تصویر، هنوز در موارد زیادی کسب نظر یک کارشناس زمین‌شناسی و انجام اصلاحات دستی ضروری است.^{[۱۱] و [۱۲]} در ادامه، مراحل لازم برای آماده‌سازی شبکه‌ی ترک‌ها از تصاویر هوایی تشریح شده‌اند. در شکل ۱، الگوریتم پردازش تصویر به‌کاررفته در نوشتار حاضر مشاهده می‌شود. کد پردازش تصویر به زبان برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از کتابخانه‌های اوپن‌سی‌وی،^[۲۴] و سایکیت‌ایمیج،^[۲۵] توسعه داده شده است.

- حذف پوشش گیاهی

در ابتدا، پوشش گیاهی در تصویر به کمک یک ماسک رنگ فیلترکننده‌ی رنگ سبز، شناسایی و از تصویر حذف شده‌اند. در مرحله‌ی بعد لازم است تصویر مناطق خالی‌شده از پوشش گیاهی بازسازی شود. در پژوهش حاضر، از الگوریتم بازسازی تصویر^{۳۱} که توسط تلایا^{۳۳} (۲۰۰۴)،^[۲۶] معرفی شده است، برای بازسازی پوشش گیاهی حذف‌شده از تصاویر هوایی استفاده شده است. الگوریتم مذکور براساس یک معادله‌ی دیفرانسیل مشتقات جزئی است، که انتشار اطلاعات از مناطق شناخته‌شده به مناطق ناشناخته یا حذف‌شده را مدل می‌کند.

- شناسایی ترک‌ها و حذف لبه‌های مضاعف

در مطالعه‌ی حاضر، از الگوریتم تشخیص لبه برای شناسایی ترک‌ها استفاده شده است. یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تشخیص لبه، روش کنی^{۳۳} (۱۹۸۳)،^[۲۷] است، که با حفظ ویژگی‌های اصلی تصویر، زوائد و نویزها را حذف می‌کند. الگوریتم کنی از یک فیلتر گاوسی، همراه با دو آستانه‌ی بالا و آستانه‌ی پایین^{۳۴} (که این مقادیر باید با توجه به تصویر ورودی توسط کاربر انتخاب شوند) استفاده می‌کند. در نتیجه، با استفاده از الگوریتم مذکور، تصویر اولیه به یک تصویر باینری تبدیل می‌شود، که در آن لبه‌ها به مقداری مخالف با صفر و سایر تصویر (یا پس‌زمینه) به مقدار صفر تبدیل می‌شوند. هنگامی که یک ترک در تصویر دیجیتالی به کمک روش لبه‌یابی شناسایی می‌شود، به‌علت ضخامت ترک در تصویر، دو لبه خواهد داشت. به عبارت دیگر، الگوریتم تشخیص لبه ممکن

ژانگ و شنگ^{۲۲} (۲۰۲۱)،^[۱۶] توانسته‌اند مدل را بر روی شبکه‌ی بی‌سازمان با سلول‌های چهارگوش توسعه دهند و مدل خود را (UnQ-EDFM)^{۲۳} نامیده‌اند؛ که علاوه بر افزایش سازگاری رویکرد EDFM با مخازن با شکل هندسی نامنظم، دقت بالاتر و هزینه‌ی محاسباتی کمتری دارد.

استفاده از مدل EDFM نشان داده است در مواردی که نفوذپذیری ترک‌ها کمتر از سنگ باشد، مدل دقت پایینی دارد؛ که برای رفع آن، تنه^{۲۴} و همکارانش (۲۰۱۷)،^[۱۷] مدل ترک مجزای افزوده‌ی مبتنی بر تصویرسازی (pEDFM)^{۲۵} را توسعه داده‌اند. ایشان الگوریتمی را پیاده کرده‌اند که در آن قابلیت انتقال ماتریس (سنگ)، مطابق با نفوذپذیری شبکه‌های ترک‌های همسایه اصلاح شود. اولوروده^{۲۶} و همکارانش (۲۰۲۰)،^[۱۸] یک الگوریتم سه‌بعدی را برای pEDFM ارائه کرده‌اند، که قابلیت مدل‌سازی ترک‌ها را در هر راستای دلخواه در فضای سه‌بعدی فراهم می‌کند. یکی دیگر از ضعف‌های مدل اولیه‌ی EDFM این است که در شبیه‌سازی مخازن با نفوذپذیری بسیار پایین^{۲۷} دچار خطای زیادی می‌شود. اولوروده و رشید (۲۰۲۲)،^[۱۹] رویکرد tEDFM را برای غلبه بر این مشکل ارائه کرده‌اند. به هر حال، در سال‌های اخیر گرایش به رویکرد EDFM برای شبیه‌سازی جریان در مخازن ترک‌دار رو به افزایش بوده است. از جمله‌ی مطالعات انجام‌شده می‌توان به مطالعات: رن^{۲۸} و همکارانش (۲۰۱۸)،^[۲۰] شکبیا و همکارانش (۲۰۱۸)،^[۲۱] و جیانگ^{۲۹} و همکارانش (۲۰۲۲)،^[۲۲] اشاره کرد.

در نوشتار حاضر، از نسخه‌ی a-۲۰۲۳ نرم‌افزار منبع باز MRST^{۳۰}، که در محیط نرم‌افزار متلب توسعه یافته است، برای شبیه‌سازی جریان در مخزن استفاده شده است. نسخه‌ی مذکور قابلیت حل مسائل با مدل EDFM را دارد و به‌علاوه‌ی انواع مدل‌های جریان‌های تک‌فاز و چندفاز، مدل‌های ترکیبی و حرارتی را شامل می‌شود. نرم‌افزار MRST، به‌طورگسترده توسط پژوهشگران مختلف در دنیا استفاده شده و آزمایش‌های عددی زیادی را با موفقیت گذرانده است.

در پژوهش حاضر، از تصاویر هوایی از رخنمون‌ها برای مدل‌سازی هندسه‌ی مخزن ترک‌دار استفاده شده است؛ که سبب می‌شود تا ساختار ترک‌ها با دقت بهتری بازسازی شوند. این در حالی است که تاکنون از داده‌های حاصل از رخنمون‌ها و رویکرد EDFM به‌صورت همزمان استفاده نشده است. همچنین، یک الگوریتم و نرم‌افزار پردازش تصویر برای به‌دست‌آوردن شبکه‌ی ترک‌ها توسعه داده شده است، که با نرم‌افزار MRST نیز سازگار است. به کمک ابزار ذکرشده می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف پردازش تصویر را بر دقت بازسازی شبکه‌ی ترک‌ها و در نتیجه بر شبیه‌سازی جریان در مخزن بررسی کرد.

در ادامه، ابتدا الگوریتم پردازش تصویری توسعه‌یافته شده برای مدل‌سازی مخزن و سپس، شبیه‌سازی جریان در ترک و فرضیه‌ها و طرز کار روش عددی EDFM شرح داده شده است. در بخش نتایج، اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر و خواص فیزیکی سنگ و ترک در شبیه‌سازی جریان در مخزن بررسی شده است.

²⁸ Ren

²⁹ Jiang

³⁰ MATLAB Reservoir Simulation Toolbox

³¹ Image inpainting

³² Telea

³³ Canny

³⁴ Upper threshold and lower threshold

²² Zhang & Sheng

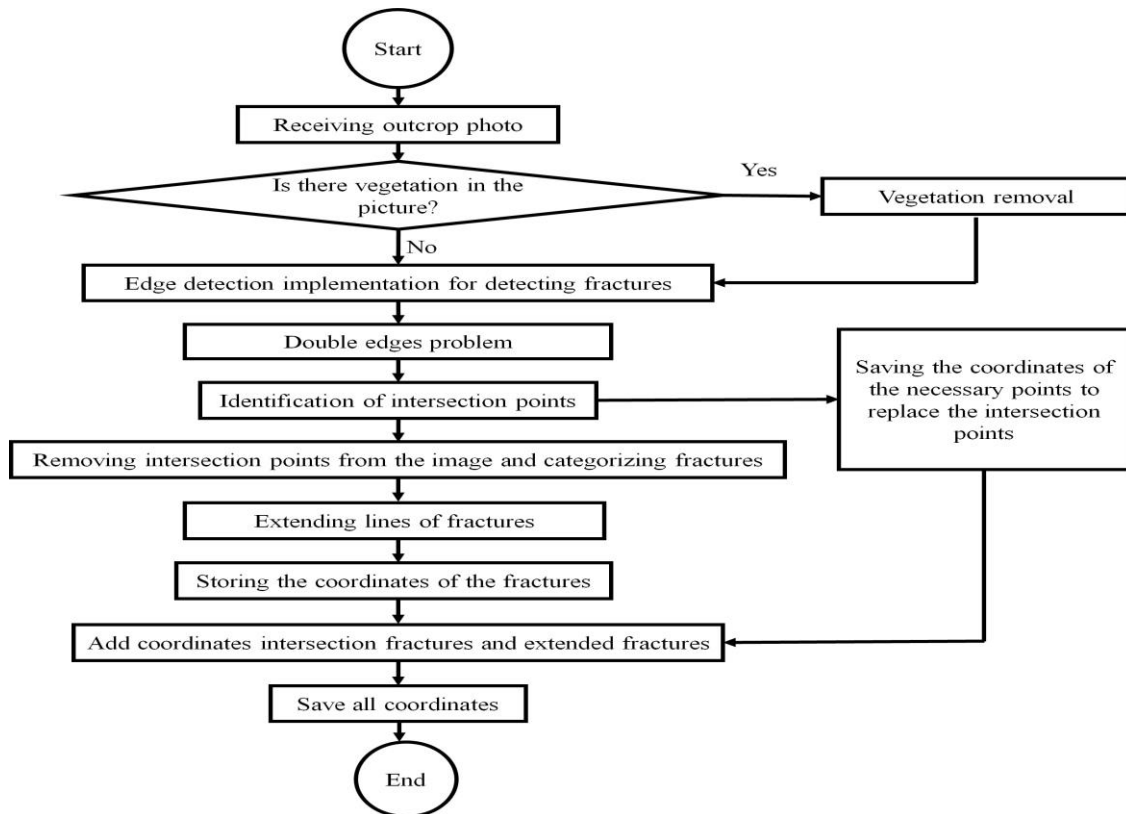
²³ Unstructured Quadrangular Grid-based Embedded Discrete Fracture Model

²⁴ Tene

²⁵ Projection-based EDFM

²⁶ Olorode

²⁷ Tight reservoirs



شکل ۱. الگوریتم پردازش تصویر برای شناسایی ترک‌ها.

به خاطر اتصال دو ترک با یکدیگر، به دو ترک متفاوت، یک برچسب اختصاص یابد. برای رفع این مشکل با حذف نقاط تقاطع دو خط می‌توان آن‌ها را به پاره‌خط‌های مجزا از یکدیگر تبدیل و سپس ترک‌ها را برچسب‌گذاری کرد. حذف نقاط تقاطع ترک‌ها به ساختار شبکه‌ی ترک‌ها آسیب می‌رساند و بنابراین لازم است آن‌ها را مجدداً به‌عنوان ترک به فهرست مختصات ترک‌ها اضافه کرد. در بخش بعد، نحوه‌ی تشخیص محل تلاقی ترک‌ها و مختصات جایگزین نقاط مذکور شرح داده شده است.

پس از برچسب‌گذاری تمام پاره‌خط‌ها (ترک‌ها) و حذف نقاط تلاقی ترک‌ها، مختصات پیکسل‌های تمامی پاره‌خط‌ها (ترک‌ها) ذخیره می‌شوند. مختصات پاره‌خط‌های اخیر باید ساده‌سازی شوند تا برای استفاده در شبیه‌سازی مخزن مناسب باشند. پیش از ساده‌سازی باید توجه داشت که در شبیه‌ساز MRST، ترک‌ها فقط به‌صورت صفحات مستوی (مسطح) منظور شوند. برای ساده‌سازی، با انتخاب یک طول معیار، خطوط منحنی حاصل از پردازش تصویر به پاره‌خط‌هایی شکسته می‌شوند. به‌عنوان مثال، به جز مختصات ابتدایی و انتهایی ترک‌ها، مختصات سایر پیکسل‌های ذخیره‌شده بین دو نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی، ۵ تا ۵ خوانده می‌شود. توجه شود که طول معیار، به مقیاس عکس و پیچیدگی شبکه‌ی ترک‌ها وابسته است. همچنین معیاری تعریف می‌شود (مثلاً ۳ پیکسل)، که اگر پاره‌خطی از حد مذکور کوچک‌تر باشد، کاملاً نادیده گرفته شود؛ چرا که چنین ترکی تأثیر ناچیزی در جریان سیال در مخزن خواهد گذاشت. در شبیه‌ساز MRST، ترک‌ها در صورتی متصل در نظر گرفته می‌شوند که صفحات ترک کاملاً با یکدیگر تلاقی کنند؛ که برای رفع مشکل مذکور، خطوط شکسته و برچسب‌گذاری‌شده به اندازه‌ی ۱ واحد از دو طرف

است آن را به‌صورت دو خط مجزای کنار هم تشخیص دهد، که این مشکل معمولاً به‌عنوان پیدایش لبه‌های مضاعف یا لبه‌های دوگانه شناخته می‌شود؛ که برای حل آن، از روش‌های مورفولوژی^{۳۵} استفاده می‌شود، تا بتوان دو لبه را به یک لبه تبدیل کرد. در این مرحله‌ی بخصوص، از یک عملیات مورفولوژی به نام بستن^{۳۶} (تابع morphologyEx در کتابخانه‌ی پایتون اوپن‌سی‌وی) برای بستن شکاف‌های بین دو لبه استفاده می‌شود. پس از اتصال مجدد دو لبه، لازم است که ضخامت هر ترک فقط به یک پیکسل محدود شود. برای این کار از یک عملیات مورفولوژی دیگر به نام اسکلت‌سازی^{۳۷} (تابع skeletonize در کتابخانه‌ی پایتون سایکیت‌ایمیج) استفاده شده است. این مرحله بسیار مهم است، چرا که اتصال ترک‌ها به یکدیگر نقش مهمی را در جریان سیال ایفا خواهد کرد.

- برچسب‌گذاری و ذخیره‌ی مختصات ترک‌ها

پس از مشخص‌شدن محل ترک‌ها لازم است آن‌ها را دسته‌بندی و ساده‌سازی کرد، تا بتوان از آن‌ها به عنوان داده‌ی ورودی برای مدل دینامیکی مخزن استفاده کرد. برای این منظور، از روش‌های شناسایی منطقه^{۳۸} در پردازش تصویر استفاده می‌شود. یکی از روش‌های متعدد برای شناسایی منطقه، برچسب‌گذاری هر منطقه (یا هر مرز) با یک عدد صحیح منحصر به فرد است. در برچسب‌گذاری به‌کاررفته در نوشتار حاضر از روش برچسب‌گذاری ۸ همسایه‌ای استفاده شده است؛^{۱۰۱} که در آن ممکن است دو برچسب متفاوت در کنار یکدیگر قرار بگیرند. این مسئله به‌دلیل وجود منحنی‌های U شکل ممکن است رخ دهد، که به‌دلیل ماهیت ردیف به ردیف بررسی‌شدن تصویر اتفاق می‌افتد. در این حالت، جفت برچسب‌ها به‌عنوان معادل یکدیگر ذخیره می‌شوند. از طرف دیگر، ممکن است

³⁷ Morphological skeleton

³⁸ Region identification

³⁵ Morphology

³⁶ Closing

که خطوط ترک‌ها مجدداً به یکدیگر متصل شده‌اند، اما پیکسل‌هایی به شکل اولیه‌ی ترک‌ها اضافه شده است، که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در جریان سیال نخواهند داشت.

۲.۲. شبیه‌سازی جریان در ترک

در بخش حاضر، کلیاتی در مورد روش EDFM همراه با فرضیه‌های اساسی آن و نحوه‌ی مدل‌سازی جریان در مخزن ترک‌دار تشریح شده است.

– معادله‌های حاکم بر جریان و گسسته‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار MRST
جریان تک‌فاز در یک محیط متخلخل معمولاً با کمک قانون دارسی (رابطه‌ی ۲) توصیف می‌شود. بسط قانون دارسی به جریان چندفازی اغلب به موسکات^{۳۹} (۱۹۳۸)،^[۲۸] نسبت داده می‌شود؛ که سرعت هر فاز (سرعت دارسی) را به گرادیان فشار آن فاز و خواص فیزیکی سنگ و سیال ربط می‌دهد.

$$\mathbf{v}_\alpha = -\frac{K k_{ra}}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha g \nabla z) \quad (2)$$

که در آن، K نفوذپذیری مطلق، k_{ra} نفوذپذیری نسبی، μ لزجت دینامیکی، p فشار سیال، g ثابت مثبت گرانش، ρ چگالی سیال، و z نماینده‌ی محور مختصات در راستای گرانش است. اندیس α در معادله‌ی ۲، فاز سیال را نشان می‌دهد. در نوشتار حاضر، سیال‌های مخزن به‌صورت دو فاز امتزاج‌ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند. برای توصیف نفوذپذیری نسبی در چنین سیستمی، رابطه‌ی توانی یا مدل کوری^{۴۰}، استفاده شده است.^[۲۹]

برای تحلیل جریان چند فاز امتزاج‌ناپذیر در محیط متخلخل لازم است به تعداد فازهای موردنظر، معادله‌ی بقای جرم نوشته شود. معادله‌ی بقای جرم برای جریان چندفازی سیال‌های امتزاج‌ناپذیر در یک محیط متخلخل بدون ترک به شکل رابطه‌ی ۳ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_\alpha S_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha) = \rho_\alpha q_\alpha \quad (3)$$

که در آن، ϕ ، S_α و ρ_α به ترتیب مقدار تخلخل سنگ، اشباع هر فاز، و چگالی سیال را نشان می‌دهند. همچنین q نشانگر چشمه یا چاه‌ها^{۴۱} (خروجی و ورودی سیال‌ها) است. در شبیه‌ساز مخزن MRST گسسته‌سازی سیستم حاصل از معادله‌ها کاملاً ضمنی و برای فاز α به‌صورت رابطه‌های ۴ و ۵ است:^[۲۹]

امتداد می‌یابند. بنابراین، دو پاره‌خطی (ترکی) که فقط در یک نقطه با یکدیگر برخورد داشته‌اند، از یکدیگر عبور می‌کنند و در نتیجه شبیه‌ساز، آن‌ها را متصل در نظر می‌گیرد.

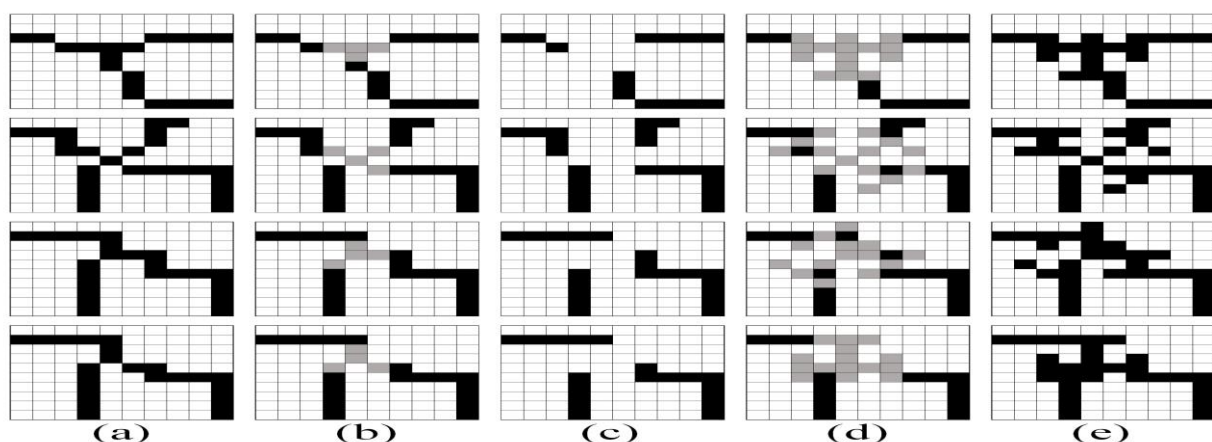
– تشخیص تلاقی ترک‌ها و مختصات جایگزین آن‌ها

برای رفع مشکل برچسب‌گذاری یکسان دو ترک متفاوت، در ابتدا باید محل تلاقی ترک‌ها (یا نقاط تداخل) را شناسایی کرد. در محل تلاقی ترک‌ها به‌دلیل باینری بودن تصویر و یک پیکسلی بودن ضخامت خطوط در لبه‌یابی، مقادیر پیکسل‌ها، آرایشی مشابه با یکی از ماتریس‌های رابطه‌ی ۱ (یا چرخش‌های آن‌ها) خواهند داشت:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

در ماتریس‌های مذکور، مقدار ۱ نماینده‌ی پیکسل‌هایی است که لبه (ترک) تشخیص داده می‌شود و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی پس‌زمینه (سنگ) است. در اینجا، ابعاد ماتریس (۳×۳) انتخاب شده است، زیرا در نظر گرفتن ابعاد بزرگ‌تر برای ماتریس، فقط تعداد آرایش‌های مختلف ماتریس موردنیاز برای شناسایی نقاط تداخل را افزایش می‌دهد.

با توجه به اختلاف بالای نفوذپذیری سنگ و ترک باید از اتصال مجدد ترک‌ها به یکدیگر اطمینان حاصل شود؛ چرا که عدم اتصال ترک‌های مرتبط به هم باعث ایجاد خطای زیادی می‌شود. از آنجایی که تأثیر ترک‌های کوچک به شبکه ناچیز است، برای جایگزینی نقاط تداخل با اضافه کردن چند ترک کوچک از اتصال مجدد ترک‌ها اطمینان حاصل می‌شود. در شکل ۲، مراحل جایگزینی نقاط تقاطع دو ترک در الگوریتم مشاهده می‌شود. در شکل ۲-۱، انواع برخورد دو ترک در تصویر باینری و در شکل ۲-۲، نحوه‌ی تشخیص پیکسل‌های متصل به محل تقاطع که به کمک ماتریس‌های رابطه‌ی ۱ شناسایی شده‌اند، مشاهده می‌شوند. در شکل ۲-۳، پیکسل‌های شناسایی شده در شکل ۲-۲ برای دسته‌بندی صحیح خطوط حذف شده‌اند. در این مرحله خطوط باقی‌مانده برچسب‌گذاری می‌شوند. در شکل ۲-۴، پیکسل‌های جایگزین برای پیکسل‌هایی حذف شده نشان داده شده‌اند. در شکل ۲-۵ نیز مشاهده می‌شود



شکل ۲. (a) محل برخورد دو ترک؛ (b) شناسایی محل نقاط تقاطع؛ (c) حذف پیکسل‌های تقاطع برای دسته‌بندی صحیح خطوط؛ (d) افزودن پیکسل‌های جایگزین برای نقاط تقاطع جهت اتصال مجدد ترک‌ها؛ (e) نهایی کردن شکل تقاطع دو ترک پس از اتصال مجدد.

⁴¹ Source and sink

³⁹ Muskat

⁴⁰ Corey model

- تبادل جریان بین سلول‌ها

ساده‌ترین شکل تبادل سیال بین دو سلول همسایه از یک جنس (هر دو ماتریس یا هر دو ترک) اتفاق می‌افتد. در چنین مواردی، به‌طور سنتی و مشابه آنچه در مدل‌های دوماحیطی انجام می‌شود، از یک ضریب انتقال‌پذیری $T_{i+1/2}$ برای این کار استفاده می‌شود. برای دو سلول همسایه در ماتریس (با شماره‌های i و $i+1$)، ضریب انتقال‌پذیری $T_{i+1/2}$ به‌صورت رابطه‌ی ۸ تعیین می‌شود:

$$T_{i+1/2} = \frac{K_{i+1/2} A_{i+1/2}}{d} \quad (8)$$

که در آن، $K_{i+1/2} = (K_i^{-1} + K_{i+1}^{-1})^{-1}$ نفوذپذیری مطلق در مرز دو سلول، $A_{i+1/2}$ مساحت سطح مشترک دو سلول، و d فاصله‌ی مراکز دو سلول است. همچنین دبی انتقالی بین دو سلول همسایه مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

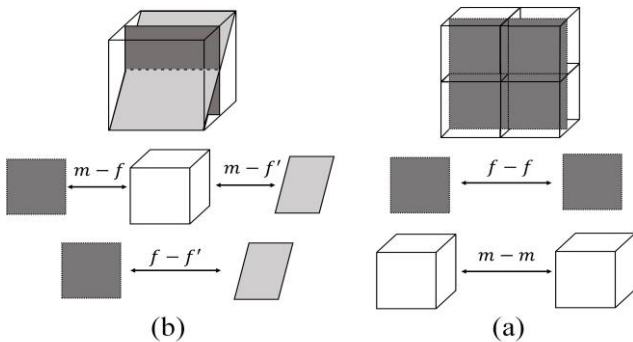
$$(q_\alpha)_{i+1/2} = T_{i+1/2} \frac{k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (p_{\alpha,i+1} - p_{\alpha,i}) \quad (9)$$

این محاسبات هنگامی که تبادل جریان بین دو سلول از جنس‌های متفاوت صورت گیرد، قدری پیچیده‌تر می‌شود. در اینجا سه حالت می‌تواند مطابق شکل ۳ اتفاق بیفتد: (۱) وقتی که تبادل جریان بین سلولی از ماتریس و سلولی از ترک رخ دهد؛ (۲) وقتی که تبادل جریان بین سلولی از یک ترک با سلولی از ترک دیگر که با ترک اول متقاطع است، برقرار شود؛ و (۳) وقتی که تبادل جریان بین دو سلول از یک ترک اتفاق بیفتد، اما این دو سلول در دو سلول ماتریس مختلف قرار بگیرند. در ادامه، روابط مربوط به هر یک از ۳ حالت مذکور ارائه شده‌اند.

لی و لی (۲۰۰۸)^[۱۲] با فرض آنکه جریان، همیشه عمود بر سطح ترک است، برای فاصله‌ی متوسط بین حجم کنترل‌های ماتریس و ترک (d_{m-f})، یک معادله‌ی انتگرالی به‌صورت رابطه‌ی ۱۰ پیشنهاد کرده‌اند:

$$d_{m-f} = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} dV \quad (10)$$

که در آن، $\mathbf{n}$ بردار یکه‌ی عمود بر صفحه‌ی ترک و dV المان حجم است. V حجم سلول شبکه‌ی ماتریس و $\mathbf{x}$ بردار تعیین‌کننده‌ی مکان المان حجم (dV)



شکل ۳. (الف) در روش ترک‌های مجزا، صفحات ترک بوسیله‌ی سلول‌های ماتریس جدا می‌شوند و تبادل جریان بین صفحات ترک جدا شده و سلول‌های ماتریس با یکدیگر وجود دارد. (ب) در صورت برخورد صفحات ترک با یکدیگر، تبادل جریان بین دو صفحه‌ی ترک و صفحات ترک با سلول ماتریس وجود دارد.

$$\frac{1}{(\Delta t)^n} [(\phi \rho_\alpha S_\alpha)^{n+1} - (\phi \rho_\alpha S_\alpha)^n] + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha)^{n+1} = (\rho_\alpha q_\alpha)^{n+1} \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_\alpha^{n+1} = -\frac{K k_{r\alpha}}{\mu_\alpha^{n+1}} (\nabla p_\alpha^{n+1} - \rho_\alpha^{n+1} g \nabla z) \quad (5)$$

بالانویس‌ها به گسسته‌سازی زمان اشاره دارد و $(\Delta t)^n$ نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی گام زمانی n ام است. چنانچه مخزن ترک‌دار باشد، لازم است برای هر ترک یک محیط متخلخل مجزا در نظر گرفته شود و برای آن ترک، معادله‌های بقای جرم فازها نوشته شود. به‌عبارت دیگر، تعداد کل معادله‌های بقای جرم برابر با تعداد فازها ضربدر تعداد ترک‌های مجزا به‌علاوه‌ی یک (برای سنگ مخزن) خواهد بود. همه‌ی معادله‌های بقای جرم برای جریان فاز α در یک سیستم سه‌بعدی با تعداد N_f ترک مجزا، در شکل فشرده مطابق رابطه‌ی ۶ خواهند بود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi^i \rho_\alpha S_\alpha^i) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha^i) = \frac{\rho_\alpha^i}{a_i} \left(q_\alpha^i - q_\alpha^{i,0} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_f} q_\alpha^{i,j} \right) \quad (6)$$

که در آن، هر ترک با شاخص i نشان داده می‌شود. ماتریس با استفاده از شاخص $i=0$ نشان داده می‌شود. بازشدگی ترک‌ها نیز با a_i نمایش داده می‌شود. تابع انتقال $q_\alpha^{i,0}$ با واحد $((m^3/s)/m^2)$ ، جریان سیال از ترک i به ماتریس را تعیین می‌کند. به‌طور مشابه، $q_\alpha^{i,j}$ با واحد $((m^3/s)/m^2)$ تابع انتقال جریان از ترک i به ترک j است. معادله‌های ترک از طریق $q_\alpha^{i,j}$ با یکدیگر جفت می‌شوند. با این حال، از آنجا که ترک‌ها همیشه یکدیگر را قطع نمی‌کنند، برای برخی از جفت‌های ترک، $q_\alpha^{i,j}=0$ می‌شود. جریان در ماتریس نیز به صورت رابطه‌ی ۷ نوشته می‌شود:

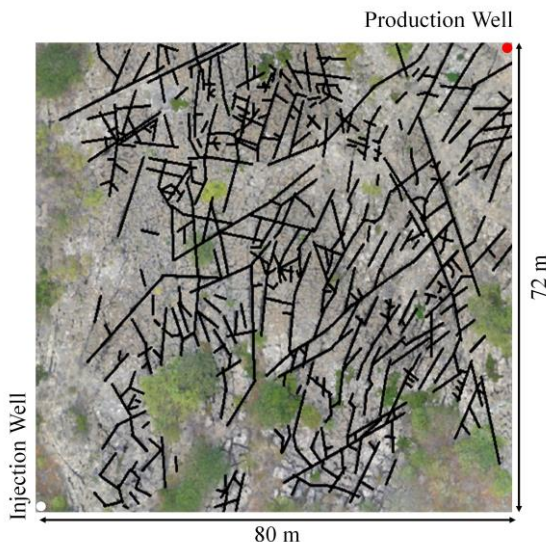
$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi^0 \rho_\alpha S_\alpha^0) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha^0) = \frac{\rho_\alpha^0}{a_i} \left(q_\alpha^0 - \sum_{j=1, j \neq 0}^{N_f} q_\alpha^{0,j} \right) \quad (7)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تمام معادله‌های ترک‌ها از طریق $q_\alpha^{0,i}$ به معادله‌ی ماتریس جفت می‌شوند.

در ادامه، فرضیه‌ها و طرز کار روش عددی EDFM تشریح شده‌اند. نخست، نحوه‌ی مدل‌سازی یک ترک مستقل و سپس چگونگی ایجاد ارتباط بین ماتریس و ترک و ترک‌ها با یکدیگر توضیح داده شده است.

- مدل‌سازی یک ترک

همان‌طور که گفته شد، در نوشتار حاضر، هر ترک به‌صورت یک سطح مستوی با مرزهای مشخص توصیف می‌شود. به‌طور طبیعی هر ترک توسط ماتریس احاطه می‌شود و در ضمن ممکن است با ترک یا ترک‌های دیگری در تلاقی باشد. در رویکرد EDFM، ابتدا ماتریس به‌صورت باسازمان شبکه‌بندی می‌شود. سپس هر ترک به‌عنوان یک فضای سه‌بعدی با سطحی بزرگ و ضخامتی کم، مستقلاً شبکه‌بندی می‌شود. معمولاً اندازه‌ی سلول‌های محاسباتی در ترک به‌مراتب از اندازه‌ی سلول‌های ماتریس کوچک‌تر هستند. هر سلول ترک توسط گروهی از سلول‌های ماتریس همسایه و گروهی از سلول‌های همسایه در همان ترک احاطه شده است و به‌طور طبیعی با سلول‌های همسایه، سیال تبادل می‌کند. بنابراین تعیین سلول‌های همسایه (از جنس ماتریس یا ترک) با هر سلول ترک، اهمیت زیادی دارد و در مرحله‌ی پیش‌پردازش انجام می‌شود.



شکل ۴. تخمینی از شبکه‌ی ترک‌ها در مطالعه‌ی بیس‌دوم.^[۴]

دانش زمین‌شناسی، مطالعات میدانی، و پردازش تصویر هوایی از مکان‌های مختلف ساخته شده است، در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که شبکه‌ی مذکور، یک شبکه‌ی ترک واقعی است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تعداد ترک‌ها در مخزن بررسی‌شده بسیار زیاد است. لذا، رویکرد EDFM بر مدل ترک مجزا (شبکه‌ی بدون سازمان) برتری دارد؛ زیرا قادر است تا با هزینه‌ی محاسباتی بسیار کمتر، ترک‌ها را به‌طور صریح در نظر بگیرد. در پژوهش حاضر، به‌دلیل وجود شبکه‌ی پیچیده‌ای از ترک‌ها، که از پردازش تصویر به‌دست آمده است، کاهش هزینه‌ی محاسبات انجام‌شده، اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند.

مسئله به‌صورت ۲/۵ بُعدی (مخزن در راستای Z گسسته نشده است) در نظر گرفته شده است. ابعاد سلول‌های مخزن ۵×۱×۱ در نظر گرفته شده است. بنابراین، شبکه‌بندی مخزن به‌صورت ۱×۷۲×۸۰ است. در مدل‌سازی کنونی فرض شده است که صفحه‌های ترک، عمودی هستند و صفحه‌های مایل ترک هم در مدل‌سازی وارد نمی‌شوند.

جریان دوفاز به صورت امتزاج‌ناپذیر و تراکم‌ناپذیر و مقادیر نفوذپذیری نسبی از مدل کوری و با مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱ تنظیم شده است. مخزن به‌صورت عایق (بدون جریان ورودی و خروجی در مرزها) در نظر گرفته شده است. چاه‌های تزریق و تولید براساس مدل چاه پیسمن در هندسه‌ی مسئله گنجانده شده‌اند. مدل چاه پیسمن، روشی کم‌هزینه برای مدل‌سازی رفتار چاه ارائه می‌کند؛ که در آن، یک رابطه‌ی خطی بین دبی جریان چاه و اختلاف فشار بین سلول محاسباتی از ماتریس، که چاه در آن واقع شده است و فشار ته چاه در نظر گرفته شده است. ضریب تناسب رابطه‌ی اخیر (اندیس چاه)، بسته به شرایط مختلف از طریق حل تحلیلی جریان تعیین می‌شود.^[۳۰]

فشار اولیه‌ی مخزن و فشار ته چاه^{۴۴} برای چاه تولیدکننده، ثابت و برابر ۳۰۰ بار در نظر گرفته شده است. میزان تزریق آب، ۱۴۰ بشکه در روز بوده است. داده‌های ذکرشده، مشابه مقادیری که در شبیه‌سازی مخزنی که توسط آگیا و همکارانش (۲۰۱۹)،^[۱] در همین منطقه انجام شده بود، هستند.

هستند. انتگرال با استفاده از روش‌های عددی محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی میانگین فاصله‌ی نرمال، قابلیت انتقال معادل برای اتصال بین یک قطعه‌ی ترک و یک سلول شبکه‌ی ماتریس به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$T_{m-f} = \frac{K_{m-f} A_{m-f}}{d_{m-f}} \quad (11)$$

که در آن، نفوذپذیری متوسط (k_{m-f}) میانگین هارمونیک نفوذپذیری‌های ماتریس و ترک است. زیرنویس m-f به اتصال ماتریس-ترک اشاره دارد. A_{m-f} مساحت سطح بخشی از ترک است، که در داخل سلول شبکه محصور شده است.

برای هر دو سلول ترک f_1 و f_2 که با یکدیگر تلاقی می‌کنند، قابلیت انتقال $T_{f_1-f_2}$ تعریف می‌شود، که برای تعیین آن، نصف قابلیت انتقال^{۴۳} هر سلول ترک مطابق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$(T_{1/2})_{f_i} = \frac{K_{f_i} a_{f_i} (L_{\cap})_{f_1, f_2}}{(d_{\cap})_{f_i}}, \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

که در آن، K و a به ترتیب نفوذپذیری و بازشدگی سلول ترک‌ها هستند. $(L_{\cap})_{f_1, f_2}$ طول خط تقاطع بین دو سلول و $(d_{\cap})_{f_1, f_2}$ میانگین فاصله‌ی عمودی بین مراکز هر قطعه‌ی ترک تا خط تقاطع است. قابلیت انتقال $T_{f_1-f_2}$ با استفاده از میانگین هارمونیک نصف قابلیت انتقال‌های دو ترک مطابق رابطه‌ی ۱۳ تعیین می‌شود:

$$T_{f_1-f_2} = \frac{(T_{1/2})_{f_1} (T_{1/2})_{f_2}}{(T_{1/2})_{f_1} + (T_{1/2})_{f_2}} \quad (13)$$

قابلیت انتقال برای جریان بین سلول‌های یک ترک مشخص به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$T_{f-f} = \frac{k_f A_f}{d_f} \quad (14)$$

که در آن، k_f نفوذپذیری ترک و d_f فاصله‌ی بین مراکز دو سلول ترک است. A_f مساحت سطح مشترک دو سلول ترک است و به‌صورت ضرب بازشدگی ترک در طول لبه‌ی مشترک محاسبه می‌شود.

۳. نتایج

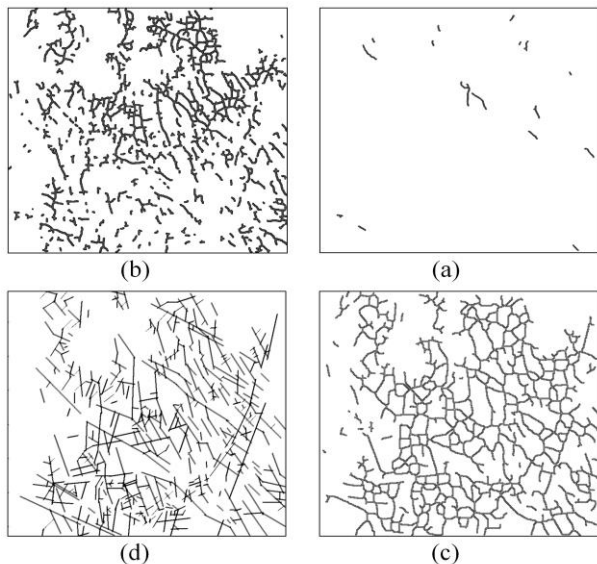
در بخش کنونی، ابتدا به تعریف مسئله و شرایط مخزن شبیه‌سازی‌شده‌ی پژوهش حاضر پرداخته شده است. سپس اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر، شامل کیفیت تصویر هوایی و پارامترهای لبه‌یابی بررسی شده‌اند. همچنین تأثیر پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی جریان در مخزن، شامل بازشدگی و نفوذپذیری ماتریس در رفتار دینامیکی مخزن بررسی شده است.

۱.۳. تعریف مسئله و شرایط مخزن

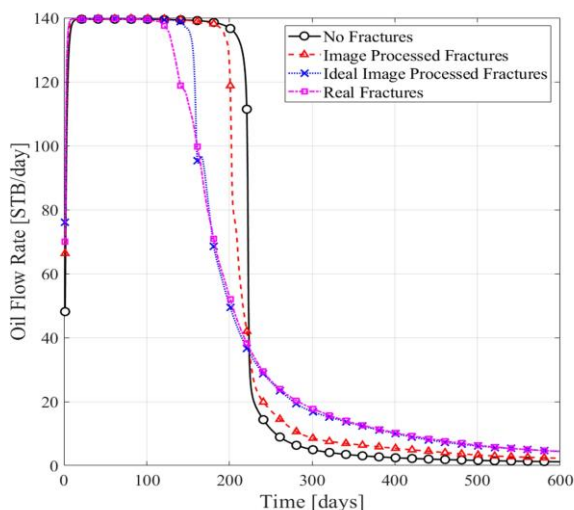
شبکه‌ی ترک‌ها و تصویر مخزن از منطقه‌ای در برزیل از مطالعه‌ی بیس‌دوم (۲۰۱۶)،^[۴] برای بررسی برخی از پارامترهای با اهمیت در مطالعه‌ی حاضر انتخاب شده است. ابعاد مخزن مذکور ۵×۷۲×۸۰ متر بنا بر مقیاس داده‌شده در مطالعه‌ی حاضر انتخاب شده است. در شکل ۴، شبکه‌ی ترک‌های ترسیم‌شده در مطالعه‌ی بیس‌دوم،^[۴] مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بر روی تصویر هوایی از سطح زمین بازسازی شده است. از آنجایی که شبکه‌ی ترک اخیر با کمک

⁴⁴ Bottom hole pressure

⁴³ Half-transmissibility



شکل ۶. (الف) شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر عکس بی‌کیفیت؛ (ب) شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر عکس باکیفیت موجود؛ (ج) شبکه‌ی ترک پردازش تصویر ایده‌آل؛ و (د) شبکه‌ی ترک‌های واقعی از مطالعه‌ی بیسندوم، [۴].



شکل ۷. بررسی اثر کیفیت تصویر هوایی در نرخ تولید نفت روزانه.

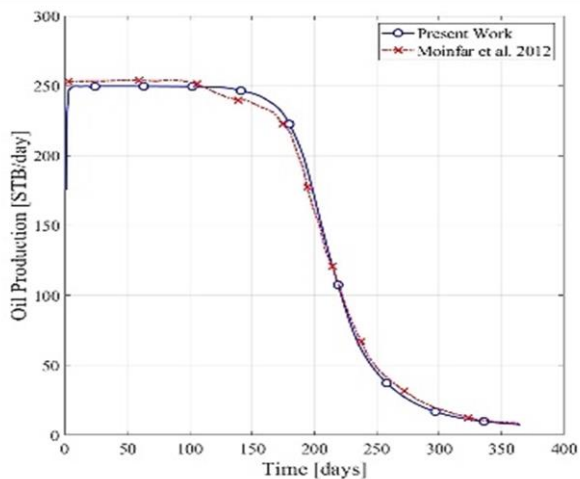
۱.۲.۳. اثر کیفیت تصویر هوایی

برای بیان اهمیت کیفیت تصاویر، چهار شبکه‌ی ترک با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ که همه‌ی آن‌ها، شامل مخزن تقریباً بدون ترک (نماینده‌ی تصویر بدون کیفیت)، شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر (نماینده‌ی تصویر با کیفیت خوب و موجود)، شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر ایده‌آل، و شبکه‌ی ترک واقعی بوده‌اند (شکل ۶). برای به‌دست‌آوردن شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر ایده‌آل، عملیات پردازش تصویر بر روی تصویری انجام شده است، که ترک‌ها به صورت کاملاً واضح بر روی آن نشان داده شده باشند (شکل ۴). شایان ذکر است هر سه شبکه‌ی حاصل از پردازش تصویر با مجموعه‌ی اولیه‌ی پارامترهای لبه‌یابی یکسان (فیلتر گاوسی ۲، آستانه‌ی بالای ۱۵۰، و آستانه‌ی پایین ۷۵) به‌دست آمده‌اند و فقط کیفیت تصاویر تغییر کرده است.

در شکل ۷، تأثیر کیفیت تصویر هوایی در نرخ تولید روزانه‌ی نفت برای چهار شبکه‌ی ترک ذکر شده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، رفتار شبکه‌ی ترک

جدول ۱. اسامی مقاطع اعضاء تخصیص‌یافته‌ی سازه‌ی بررسی‌شده.

Variable	Value	Units
Matrix porosity	0.3	fraction
Matrix permeability	10	md
Fracture aperture	0.19	centimeter
Fracture permeability	3×10^6	md
Initial water saturation	0.2	fraction
Oil density	700	kg/m ³
Water density	1000	kg/m ³
Residual water saturation	0.2	fraction
Residual oil saturation	0.2	fraction
Water rel. permeability endpoint	0.8	-----
Oil rel. permeability endpoint	0.7	----
Water rel. permeability exponent	4	----
Oil rel. permeability exponent	2	----
Oil (C10H22) viscosity	0.19	centipoise
Water viscosity	0.8	centipoise

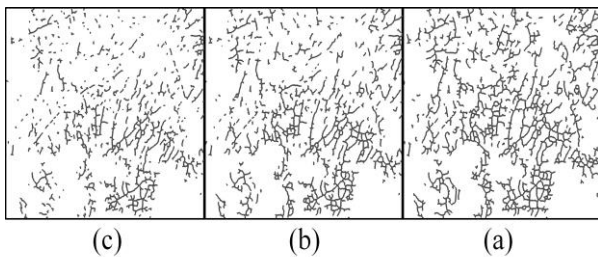


شکل ۵. شبیه‌سازی با MRST از مسئله‌ی مطالعه‌شده توسط معین‌فر و همکارانش (۲۰۱۲). [۳۱]

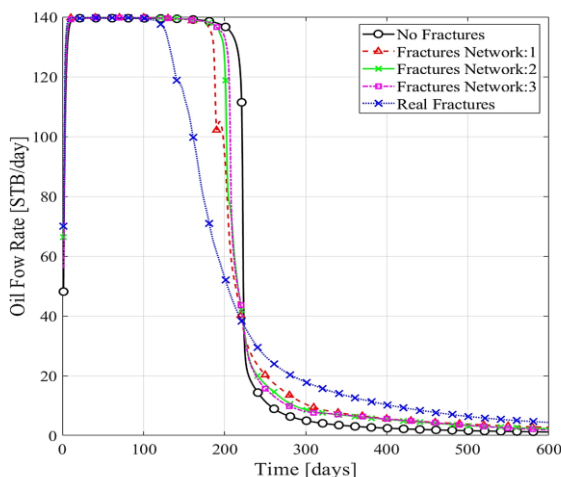
برای بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی با MRST از مسئله‌ی مطالعه‌شده‌ی معین‌فر و همکارانش (۲۰۱۲)، [۳۱] استفاده شده است و نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در آن با نتایج پژوهش حاضر تطابق خوبی داشته‌اند (شکل ۵).

۲.۳. بررسی اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر

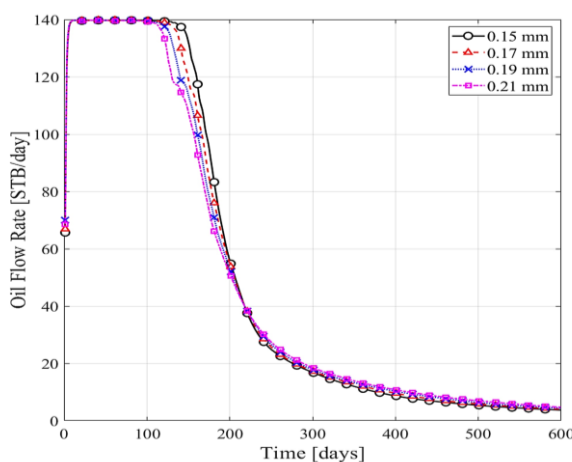
در بخش حاضر، اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر، شامل اثر کیفیت تصویر هوایی و اثر متغیرهای لبه‌یابی بررسی شده‌اند.



شکل ۸. بررسی اثر آستانه‌ی پایین در مقادیر تنظیم‌شده در: (a) ۴۵، (b) ۷۵، و (c) ۱۰۵.



شکل ۹. بررسی اثر متغیرهای لبه‌یابی در نرخ تولید نفت روزانه.



شکل ۱۰. بررسی اثر بازشدگی ترک‌ها در نرخ تولید نفت روزانه.

جریان آب قرار نگیرند؛ و در نتیجه، میزان نرخ تولید نفت کاهش می‌یابد. هر چه میزان نفوذپذیری ترک‌ها بیشتر باشد، بازسازی دقیق‌تر شبکه‌ی ترک‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت برای مخازنی که ترک‌ها نفوذپذیری بسیار بالایی دارند، لازم است که پردازش تصویر با دقت بالاتری انجام شود. در چنین مخازنی می‌توان شبکه‌ی ترک‌های حاصل از پردازش را مجدداً بررسی کرد، تا از اتصال ترک‌ها به یکدیگر اطمینان حاصل شود. همچنین، در چنین مخازنی اهمیت کیفیت تصاویر (به دلیل بازسازی بهتر ترک‌ها) دو چندان می‌شود.

۲.۳.۳. بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس

برای بررسی تأثیر نفوذپذیری ماتریس در شبیه‌سازی، یک مطالعه‌ی پارامتری با تغییر مقدار نفوذپذیری ماتریس (۱، ۵، ۱۰، ۲۰ میلی داریس) انجام شده است.

حاصل از پردازش تصویر ایده‌آل، اختلاف اندکی با شبکه‌ی ترک واقعی دارد. شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر، رفتاری میان شبکه‌ی ترک واقعی و مخزن بدون ترک را نشان می‌دهد. بنابراین با پردازش تصویر، می‌توان دقت نتایج شبیه‌سازی مخزن را بهبود بخشید و نتایج را به نتایج شبکه‌ی ترک‌های واقعی نزدیک‌تر کرد.

۲.۳.۳. بررسی اثر متغیرهای لبه‌یابی

به منظور کسب شناخت بهتر از کارایی روش کنی، پارامترهای کلیدی روش تغییر داده شده‌اند، تا تأثیر آن‌ها در فرآیند تشخیص لبه و در نتیجه، کیفیت شبکه‌ی ترک تولیدی مشخص شود. مجموعه‌ی اولیه‌ی پارامترهای پایه برای مقایسه با فیلتر گاوسی ۲، آستانه‌ی بالای ۱۵۰، و آستانه‌ی پایین ۷۵ استفاده شده انتخاب شده‌اند. به طور کلی، انتخاب پارامترهای لبه‌یابی وابسته به تصویر هوایی موجود است. فیلتر گاوسی کوچک‌تر به طور بالقوه جزئیات ریزتری را ثبت می‌کند، اما تأثیر نویز در تصویر افزایش پیدا می‌کند. افزایش مقدار آستانه‌ی بالا، معیار سخت‌تری را برای در نظر گرفتن پیکسل به عنوان بخشی از یک لبه اعمال می‌کند و در نتیجه ممکن است ترک‌های ریزتر در نظر گرفته نشوند. از طرفی، انتخاب مقدار کم برای آستانه‌ی بالا موجب انتخاب ترک‌هایی می‌شود که در واقعیت وجود ندارند. کاهش آستانه‌ی پایین باعث لحاظ شدن لبه‌های بیشتری در لبه‌یابی می‌شود و در نتیجه پیوستگی ترک‌ها می‌تواند بهتر شکل بگیرد. از طرفی، انتخاب مقدار کم برای آستانه‌ی پایین می‌تواند موجب شود که ترک‌های مجزا از یکدیگر، متصل در نظر گرفته شوند.

در شکل ۸، سه شبکه‌ی ترک به دست آمده به ازاء مقادیر مختلف آستانه‌ی پایین (۴۵، ۷۵، و ۱۰۵) مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، شبکه‌ی ترک اول (آستانه‌ی پایین با مقدار ۴۵) نتایج شبیه‌تری به شبکه‌ی ترک واقعی دارد. زیرا در شبکه‌ی مذکور، پیوستگی ترک‌ها بهتر شکل گرفته است و جریان سیال، رفتاری مشابه با حالت شبکه‌ی ترک واقعی از خود نشان می‌دهد (شکل ۹). باید توجه داشت که هر چند بهبود نتایج تا حدی وابسته به پارامترهای مذکور است، اما معمولاً از یک جایی به بعد نمی‌توان با کمک آن‌ها نتایج را بهبود بخشید، زیرا کیفیت تصویر این فرآیند را محدود کند.

۳.۳. بررسی اثر پارامترهای فیزیکی مخزن

در بخش کنونی، تأثیر پارامترهای فیزیکی مخزن، شامل میزان بازشدگی ترک‌ها و نفوذپذیری ماتریس (سنگ) بررسی شده‌اند؛ که هر یک از آن‌ها در جریان سیال تأثیر می‌گذارند و نتایج شبیه‌سازی را تغییر می‌دهند. مخزن مطالعه‌شده، همان مخزن در بخش تعریف مسئله در نظر گرفته شده است. در ادامه، تأثیر هر یک از پارامترهای فیزیکی مخزن در نتایج بررسی شده است.

۱.۳.۳. بررسی اثر بازشدگی ترک‌ها

در ابتدا، یک مطالعه‌ی پارامتری بر روی بازشدگی ترک‌ها در شبیه‌سازی مخزن انجام شده است. در شبکه‌ی ترک‌های مطالعه‌ی بیسودوم و همکارانش (۲۰۱۶)^[۴۱] بازشدگی ترک‌ها، ۰/۱۵ تا ۰/۲۱ میلی متر فرض شده است؛ که ارتباط مستقیمی با نفوذپذیری ترک دارد (قانون مکعب^[۴۲]). در شکل ۱۰، تغییرات نرخ تولید نفت به ازاء مقادیر مختلف بازشدگی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش بازشدگی ترک‌ها، نرخ تولید نفت کاهش یافته است. در حضور ترک‌ها، به دلیل نفوذپذیری بسیار بالاتر آن‌ها نسبت به سنگ، جریان آب تزریق شده بیشتر در مسیر ترک‌ها حرکت می‌کند، زیرا با مقاومت کمتری روبرو می‌شود. این امر باعث می‌شود که بخشی از نفت موجود در مخزن، تحت تأثیر

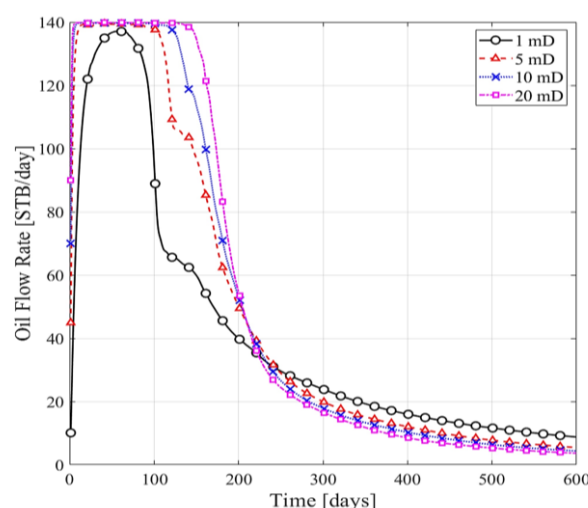
(۱) بازتولید شبکه‌ی ترک به‌طوری که تا حد خوبی به واقعیت نزدیک باشد، بسیار دشوار است.

(۲) شبیه‌سازی یک مخزن با صدها یا هزاران ترک، مستلزم داشتن ابزار محاسباتی کارآمد و البته هزینه‌ی محاسباتی زیاد است.

در نوشتار حاضر، یک رویکرد یکپارچه بر مبنای پردازش تصویر برای بازسازی شبکه‌ی ترک از روی تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از رخنمون ارائه شده است. به‌منظور شبیه‌سازی جریان دو فاز آب و نفت در مخزن از روش ترک مجزای افزوده (EDFM) استفاده شده است، که قادر است تعداد زیادی ترک را به‌طور همزمان در مدل‌سازی لحاظ کند و اندرکنش بین سنگ و ترک‌ها با یکدیگر را با دقت بسیار خوبی منظور کند. همچنین پارامترهای مؤثر در عملکرد پردازش تصویر و روش EDFM بررسی شده‌اند.

نتایج حاصل از پردازش تصویر نشان داده است که انتخاب نامناسب پارامترهای لبه‌یابی (فیلتر گاوسی، آستانه‌ی بالا، و آستانه‌ی پایین) در فرآیند لبه‌یابی منجر به ایجاد شبکه‌ی ترک غیرواقعی می‌شود. انتخاب نامناسب آستانه‌ی بالا منجر به عدم شناسایی ترک‌های ریز یا شناسایی ترک‌های غیرواقعی می‌شود. انتخاب نامناسب آستانه‌ی پایین، بازسازی اتصال ترک‌ها به یکدیگر را به‌طور منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، کیفیت تصویر هوایی، تأثیر بسیار زیادی در دقت نتایج دارد؛ به طوری که در صورت استفاده از تصاویر هوایی با کیفیت پایین، شناسایی ترک‌ها تقریباً غیرممکن می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی جریان توسط EDFM نشان داده‌اند که در مخازن حاوی ترک‌های با نفوذپذیری بالا، انتخاب مقدار نفوذپذیری ماتریس اهمیت بیشتری نسبت به نفوذپذیری ترک‌ها دارد. همچنین، زمانی که نفوذپذیری ماتریس بسیار پایین باشد، کیفیت تصاویر و انتخاب متغیرهای پردازش تصویر، حائز اهمیت بیشتری هستند.



شکل ۱۱. بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس در نرخ تولید نفت روزانه.

در حالتی که نفوذپذیری ماتریس بالا باشد، سیال به راحتی از داخل سنگ مخزن به سمت چاه تولیدی جریان می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش نفوذپذیری ماتریس، میزان نرخ تولید نفت در چاه افزایش یافته است. با کاهش نفوذپذیری ماتریس، شبکه‌ی ترک‌ها مسیر جریان را کنترل می‌کند و اتصال ترک‌ها به یکدیگر نقش مؤثری در نتایج می‌گذارد. در مخازن با نفوذپذیری بسیار پایین، اهمیت کیفیت تصاویر و متغیرهای پردازش تصویر دو چندان می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی مخازن ترک‌دار طبیعی به دو دلیل اصلی، یک چالش جدی برای مهندسان محسوب می‌شود:

References- منابع

1. Egya, D.O., Geiger, S., Corbett, P.W.M., March, R., Bisdom, K., Bertotti, G. and Bezerra, F.H., 2019. Analysing the limitations of the dual-porosity response during well tests in naturally fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 25(1), pp.30-49. doi: <https://doi.org/10.1144/petgeo2017-053>.
2. Moinefar, A., Narr, W., Hui, M.H., Mallison, B. and Lee, S.H., 2011, February. Comparison of discrete-fracture and dual-permeability models for multiphase flow in naturally fractured reservoirs. In *SPE Reservoir Simulation Conference*, pp. SPE-142295. SPE. doi: <https://doi.org/10.2118/142295-MS>.
3. Odling, N.E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, J.P., Christensen, N.P., Fillion, E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L. and Trice, R., 1999. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 5(4), pp.373-384. doi: <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.4.373>.
4. Bisdom, K., 2016. Burial-related fracturing in sub-horizontal and folded reservoirs: Geometry, geomechanics and impact on permeability. [Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology]. doi: <https://doi.org/10.4233/uuid:f1b6f6e0-1542-4744-943e-04c7c551213b>
5. Bruna, P.O., Straubhaar, J., Prabhakaran, R., Bertotti, G., Bisdom, K., Mariethoz, G. and Meda, M., 2019. A new methodology to train fracture network simulation using multiple-point statistics. *Solid Earth*, 10(2), pp.537-559. doi: <https://doi.org/10.5194/se-10-537-2019>.
6. Shah, S., Møyner, O., Tene, M., Lie, K.A. and Hajibeygi, H., 2016. The multiscale restriction smoothed basis method for fractured porous media (F-MsRSB). *Journal of Computational Physics*, 318, pp.36-57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.05.001>.
7. Bisdom, K., Gauthier, B.D.M., Bertotti, G. and Hardebol, N.J., 2014. Calibrating discrete fracture-network models with a carbonate three-dimensional outcrop fracture network: Implications for naturally fractured reservoir modeling. *AAPG bulletin*, 98(7), pp.1351-1376. doi: <https://doi.org/10.1306/02031413060>.

8. Geiger, S., Dentz, M. and Neuweiler, I., 2013. A novel multirate dual-porosity model for improved simulation of fractured and multiporosity reservoirs. *SPE journal*, 18(04), pp.670-684. doi: <https://doi.org/10.2118/148130-PA>.
9. Bisdom, K., Bertotti, G. and Bezerra, F.H., 2017. Interwell scale natural fracture geometry and permeability variations in low-deformation carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, 97, pp.23-36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.02.011>.
10. Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle, R., 2013. Image processing, analysis and machine vision. *Springer*.
11. Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P. and Micklethwaite, S., 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, pp.22-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>.
12. Li, L. and Lee, S.H., 2008. Efficient field-scale simulation of black oil in a naturally fractured reservoir through discrete fracture networks and homogenized media. *SPE Reservoir evaluation & engineering*, 11(04), pp.750-758. doi: <https://doi.org/10.2118/103901-PA>.
13. Moinfar A., 2013. Development of an Efficient Embedded Discrete Fracture Model for 3D Compositional Reservoir Simulation in Fractured Reservoirs. Ph. D. Thesis., The University of Texas at Austin. URI: <http://hdl.handle.net/2152/21393>
14. Moinfar, A., Varavei, A., Sepehrnoori, K. and Johns, R.T., 2014. Development of an efficient embedded discrete fracture model for 3D compositional reservoir simulation in fractured reservoirs. *SPE Journal*, 19(02), pp.289-303. doi: <https://doi.org/10.2118/154246-PA>.
15. Wang, C., Ran, Q. and Wu, Y.S., 2019. Robust implementations of the 3D-EDFM algorithm for reservoir simulation with complicated hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, p.106229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106229>.
16. Zhang, H. and Sheng, J.J., 2021. An efficient embedded discrete fracture model based on the unstructured quadrangular grid. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 85, p.103710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103710>.
17. Tene, M., Bosma, S.B., Al Kobaisi, M.S. and Hajibeygi, H., 2017. Projection-based embedded discrete fracture model (pEDFM). *Advances in Water Resources*, 105, pp.205-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.05.009>.
18. Olorode, O., Wang, B. and Rashid, H.U., 2020. Three-dimensional projection-based embedded discrete-fracture model for compositional simulation of fractured reservoirs. *SPE Journal*, 25(04), pp.2143-2161. doi: <https://doi.org/10.2118/201243-PA>.
19. Olorode, O. and Rashid, H., 2022. Analytical modification of EDFM for transient flow in tight rocks. *Scientific Reports*, 12(1), p.22018. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26536-w>.
20. Ren, G., Jiang, J. and Younis, R.M., 2018. A Model for coupled geomechanics and multiphase flow in fractured porous media using embedded meshes. *Advances in Water Resources*, 122, pp.113-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.09.017>.
21. Shakiba, M., de Araujo Cavalcante Filho, J.S. and Sepehrnoori, K., 2018. Using embedded discrete fracture model (EDFM) in numerical simulation of complex hydraulic fracture networks calibrated by microseismic monitoring data. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 55, pp.495-507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.04.019>.
22. Jiang, Y., Killough, J.E. and Cui, Y., 2022. A Numerical Simulation Approach for Shale Fracture Network Characterization Using Hybrid EDFM Method. *Lithosphere*, 2021(Special 1), p.4254028. doi: <https://doi.org/10.2113/2022/4254028>.
23. Lin, Y., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, L. and Lin, J., 2015. Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments. *Urban forestry & urban greening*, 14(2), pp.404-412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.03.003>.
24. Bradski, G., 2000. The opencv library. Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer, 25(11), pp.120-123.
25. Van der Walt, S., Schönberger, J.L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J.D., Yager, N., Gouillart, E. and Yu, T., 2014. scikit-image: image processing in Python. *PeerJ*, 2, p.e453. doi: <https://doi.org/10.7717/peerj.453>.
26. Telea, A., 2004. An image inpainting technique based on the fast marching method. *Journal of graphics tools*, 9(1), pp.23-34. doi: <https://doi.org/10.1080/10867651.2004.10487596>.
27. Canny, J.F., 1983. Finding edges and lines in images. URI: <http://hdl.handle.net/1721.1/6939>.
28. Muskat, M., 1938. The flow of homogeneous fluids through porous media. *Soil Science*, 46(2), p.169.
29. Lie, K.A., 2019. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). Cambridge University Press.
30. Peaceman, D.W., 1978. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation (includes associated paper 6988). *Society of Petroleum Engineers Journal*, 18(03), pp.183-194. doi: <https://doi.org/10.2118/6893-PA>.
31. Moinfar, A., Varavei, A., Sepehrnoori, K. and Johns, R.T., 2012, April. Development of a novel and computationally-efficient discrete-fracture model to study IOR processes in naturally fractured reservoirs. In *SPE Improved Oil Recovery Conference*, (pp. SPE-154246). SPE. doi: <https://doi.org/10.2118/154246-MS>.
32. Witherspoon, P.A., Wang, J.S., Iwai, K. and Gale, J.E., 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water resources research*, 16(6), pp.1016-1024. doi: <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01016>.



Review Article

Decentralized Urban Runoff Management with Emphasis Upon On-Site Runoff Pollution Reduction: A Systematic Review

Farkhondeh Khorashadi Zadeh ^{1*}, Mohadeseh Shafiei ², Ali Asadi ³, Leila Mosleh ⁴, Mohammad Reza Jabedari ⁵ and Alireza Moghaddam Nia ⁶

¹. Water and Environmental Engineering Group, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

². Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

³. Department of Water Engineering Sciences, Faculty of Agriculture, University of Sciences and Research, Tehran, Iran.

⁴. Department of Urban Management and Urban Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

⁵. Systems Engineering, Morgan State University, United States.

⁶. Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, Faculty of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

* corresponding author:(khorashadi@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 12 March 2024

Revised: 26 May 2024

Accepted: 24 June 2024

Keywords:

Decentralized management, urban runoff, low-impact development methods, on-site control of polluted runoff.

Abstract

Urban development has resulted in an increase in impermeable surfaces, and consequently, volume and peak discharge of surface runoff. In Addition, it perturbs the natural water cycle, including reduced pervious surfaces and increased surface runoff volume. Urban development engenders multifaceted issues, encompassing urban flood, degradation of surface water and groundwater quality, and a drop in groundwater levels. Conventional urban runoff management has usually adhered to a centralized approach, relying upon the construction of structural elements such as concrete channels to divert runoff. In recent decades, in order to diminish the deleterious impacts of urbanization, modern and decentralized methodologies have been introduced to mitigate the peak flow, volume, and pollution load of urban runoff by restoring the natural hydrological conditions before urban development. In different countries around the world, these strategies have been introduced and implemented by different terminologies, such as low-impact development, green infrastructure, sustainable urban drainage systems, water-sensitive urban design, and sponge cities. This research seeks to study the pioneering decentralized approaches of urban runoff management, introducing their benefits and comparing their efficacy in controlling contaminated runoff. Moreover, the challenges and limitations of each approach are discussed. By investigating the experiences of pioneering countries and successful projects, the feasibility of deploying these strategies and also the optimal conditions for the implementation of each approach in the metropolises of Iran are precisely assessed. Decision-makers and urban planners can benefit from this research in order to apply these approaches in Iranian cities, notably the expansive metropolis of Tehran. Reviewing the existing global and national experiences in this field shows that, in general, none of the Best Management Practices (BMPs) and Low Impact Developments (LIDs) techniques can alone meet all the goals of runoff management. Examining different scenarios of combining low-impact development methods using modeling is necessary to choose the most effective and economic scenario according to the characteristics of the study area. SWMM and SUSTAIN are among the widely used modeling tools in this field. Finally, the use of various decentralized techniques in each region should be based on observing all the technical principles and criteria related to their design, implementation, maintenance, and exploitation. In this context, reviewing the guidelines of different regions of the world can be helpful, but local studies should be done to evaluate the effectiveness of the discussed approaches, especially in terms of reducing the types of pollutants present in the runoff entering the facility.

To Cite this article:

Khorashadi Zadeh, F., Shafiei, M., Asadi, A., Mosleh, L., Jabedari, M. and MoghaddamNia, A. 2025. Decentralized urban runoff management with emphasis upon on-site runoff pollution reduction: a systematic review, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 70-89. <https://doi.org/10.24200/sjce.2024.64134.3307>

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

First name and Last name of Frist Author: Farkhondeh Khorashadi Zadeh

First name and Last name of Second Author: Mohadeseh Shafiei

First name and Last name of Third Author: Ali Asadi

First name and Last name of **Forth** Author: Leila Mosleh

First name and Last name of Fifth Author: Mohammad Reza Jabedari

First name and Last name of Sixth Author: Alireza Moghaddam Nia



مروری بر مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری با تأکید بر کاهش میزان بار آلودگی رواناب شهری در محل

فرخنده خراشادی‌زاده^{۱*}، محدثه شفیعی^۲، علی اسدی^۳، لیلا مصلح^۴، محمدرضا جبه داری^۵ و علیرضا مقدم نیا^۶

^۱ گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^۲ دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^۳ گروه علوم مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۴ گروه مدیریت شهری - مهندسی شهرسازی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۵ مهندسی سیستم، دانشگاه ایالتی مورگان، ایالت متحده‌ی آمریکا.

^۶ گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده‌ی مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌ی علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (khorashadi@sharif.edu)

چکیده	اطلاعات مقاله
پیامد توسعه‌ی شهری، افزایش سطوح غیرقابل نفوذ و در نتیجه افزایش حجم رواناب سطحی است. علاوه بر این، توسعه‌ی شهری، چرخه‌ی طبیعی آب را مختل می‌کند و مشکلاتی، نظیر: سیلاب، تنزل کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، و افت سطح آب زیرزمینی را به دنبال دارد. معمولاً، مدیریت رواناب شهری به صورت متمرکز و بر مبنای ایجاد تمهیدات سازه‌ای است. به منظور کاهش آثار منفی شهرنشینی، رویکردهای نوین و غیرمتمرکز معرفی شده‌اند، تا با بازسازی شرایط هیدرولوژیک قبل از توسعه، حجم و بار آلودگی رواناب شهری را کاهش دهند. این رویکردها با عناوین مختلف، نظیر: توسعه‌ی کم اثر، زیرساخت سبز، و طراحی شهری حساس به آب در مناطق مختلف دنیا اجرا شده‌اند. هدف پژوهش حاضر، بررسی رویکردهای نوین مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری و مقایسه‌ی کارآمدی آن‌ها در کنترل رواناب آلوده در محل است. با مرور تجربیات کشورهای پیشرو، شرایط بهینه‌ی اجرای هر کدام از رویکردها بررسی شده است. برنامه‌ریزان مدیریت شهری می‌توانند از نتایج پژوهش حاضر در جهت به کارگیری رویکردهای ذکر شده بهره‌برداری کنند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲ تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴
	واژگان کلیدی: مدیریت غیرمتمرکز، رواناب شهری، روش‌های توسعه‌ی کم اثر، کنترل رواناب آلوده در محل.

۱. مقدمه

دیدگاه، تمام قسمت‌های چرخه‌ی آب، شامل: آب‌های سطحی، زیرزمینی، محیط‌های طبیعی، و انسان‌ساخت، همگی با عنوان یک سیستم یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند. مدیریت یکپارچه‌ی رواناب سطحی از سه جهت اهمیت دارد: کنترل سیلاب، کنترل آلودگی منابع آبی، و جلوگیری از هدررفت آب، و امکان استفاده‌ی مجدد از آن.

پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه بر ایجاد سیلاب‌های مخرب، موجب هدررفت آب‌های سطحی می‌شود. لذا، مهار رواناب‌های سطحی و بهره‌برداری مناسب از آن‌ها می‌تواند راهکار مناسبی برای جلوگیری از هدررفت آب و تبدیل تهدید به فرصت باشد. با مدیریت یکپارچه‌ی رواناب سطحی شهری می‌توان علاوه بر کنترل سیلاب، آلودگی منابع آبی را کاهش داد و همچنین، امکان استفاده‌ی مجدد از رواناب برای مصارف دیگر را نیز فراهم کرد.

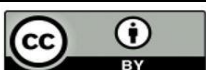
روش‌های متعددی برای کاهش میزان آلودگی رواناب شهری وجود دارد. اقدام‌های مدیریتی برای پیشگیری و یا کاهش آلودگی رواناب شهری می‌توانند

پیامد افزایش تراکم جمعیت در شهرها و توسعه‌ی شهری، افزایش اجتناب‌ناپذیر سطوح غیرقابل نفوذ است؛ که منجر به تغییر چرخه‌ی طبیعی هیدرولوژیکی، از جمله: کاهش نفوذ طبیعی و افزایش رواناب سطحی می‌شود. رواناب شهری، آلاینده‌های حاصل از سطوح شهری را به حوضه‌های آبخیز مجاور حمل می‌کند، که باعث تنزل کیفیت آب می‌شود و آثار نامطلوبی در پیکره‌های آبی دریافت‌کننده می‌گذارد. رواناب شهری در ورود و جابجایی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های موجود در آبراهه‌ها نقش دارد. از جمله‌ی آلاینده‌های مذکور می‌توان به رسوب‌ها، آفت‌کش‌ها، و مواد مغذی محوطه‌های چمنی پارک‌ها و باغ‌ها، ویروس‌ها، باکتری‌ها، فلزات سنگین، و مواد مغذی ناشی از فضولات حیوانات خانگی، و سیستم‌های فاضلاب معیوب اشاره کرد.^[۱]

به منظور دستیابی به توسعه‌ی شهری پایدار و ایجاد تعادل در نیازهای محیط‌زیستی، اجتماعی، و اقتصادی، در کوتاه‌مدت، میان‌مدت، و بلندمدت، روی آوردن به دیدگاه مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب شهری ضروری است. در این

استناد به این مقاله:

خراشادی‌زاده، فرخنده، شفیعی، محدثه، اسدی، علی، مصلح، لیلا، جبه داری، محمدرضا و مقدم نیا، علیرضا، ۱۴۰۴. مروری بر مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری با تأکید بر کاهش میزان بار آلودگی رواناب شهری در محل. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص. ۷۰-۸۹. <https://doi.org/10.24200/30.2024.64134.3307>



۲) آموزش/ توسعه (شامل: تشویق جلوگیری از آلودگی، ترویج مشارکت در فعالیت‌های کنترل رواناب شهری؛

۳) کنترل منشأ (شامل نظافت منطقه).^[۶]

روش‌های غیرسازه‌ای ساده می‌توانند نیاز به ساخت کنترل‌کننده‌های رواناب بزرگ، مانند حوضچه‌های نگهداشت دائمی و سیستم‌های انتقال رواناب را کاهش دهند، تا بدین‌وسیله از هزینه‌های زیرساخت کل پروژه کاسته شود.

در مقابل، روش‌های سازه‌ای به جداسازی آلودگی از رواناب می‌پردازند، که طیف وسیعی از روش‌های توسعه‌ی کم اثر^۲، به‌کارگیری پکیج‌های تصفیه، و احداث تصفیه‌خانه‌های محلی را در برمی‌گیرند. سرمایه‌گذاری برای محافظت از کیفیت آب، که در جوامع مختلف در سراسر دنیا در حال انجام است، از طریق روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر بیشترین سود را در بر دارد؛ زیرا با حفظ و احیای مناطق طبیعی، مدیریت آب باران و کاهش رواناب حاصل می‌شود. از طرفی، زیرساخت‌های سبز (GI)^۳، زیرمجموعه‌ای از روش‌های توسعه‌ی کم اثر (LID)^۴، نه فقط می‌توانند با مدیریت بهتر رواناب به بهبود کیفیت آب کمک کنند، بلکه گاهی اوقات با هزینه‌ی کمتری نسبت به روش‌های رایج می‌توانند باعث ایجاد فرصت‌هایی، نظیر: توسعه‌ی مجدد، فراهم کردن فرصت‌های تفریحی، و کمک به دستیابی به سایر اهداف اجتماعی، اقتصادی، بهداشتی، و محیط زیستی شوند.

در پژوهش حاضر، ابتدا روش‌های غیرمتمرکز سازه‌ای مدیریت رواناب شهری و مزایای آن‌ها معرفی شده‌اند. سپس، تجارب جهانی و ملی در زمینه استفاده از روش‌های مذکور در مدیریت رواناب شهری ارائه شده است. در انتها، روش‌های مختلف ارزیابی رویکردهای توسعه‌ی کم اثر، از جمله شبیه‌سازی‌های کمی و کیفی رواناب شهری مرور شده‌اند.

۲. معرفی رویکردهای غیرمتمرکز مدیریت رواناب شهری

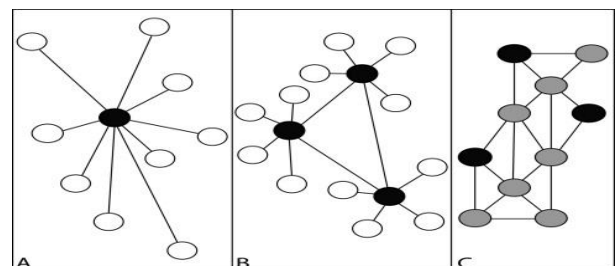
سامانه‌های متعارف مدیریت رواناب شهری، که به‌عنوان سامانه‌های متمرکز شناخته شده هستند، مبتنی بر فلسفه‌ای برای ایجاد تمهیداتی هستند که رواناب‌ها را با سرعت، در حد امکان از مناطق شهری دور کنند و در نقطه‌ای پایین‌دست، حجم بالای رواناب جمع‌آوری شده را مدیریت و به آب‌های پذیرنده تخلیه کنند. راهکارهای اخیر، اغلب با استفاده از سازه‌های انتقال بتنی غیرقابل نفوذ صورت می‌گیرد و منجر به افزایش آلودگی و مواد جامد معلق می‌شود، که می‌تواند از آستانه‌ی تحمل آب‌های سطحی پذیرنده فراتر رود.

در دهه‌های اخیر، اجرای راه‌حل‌های طبیعی‌تر از نظر محیط‌زیستی و حساس‌تر به آب، شتاب قابل‌توجهی پیدا کرده است. رویکردهای جدیدی، در قالب راهکارهای غیرمتمرکز، برای کاهش آثار منفی شهرنشینی در کیفیت و کمیت رواناب معرفی شده‌اند. با کاهش حجم رواناب و سیلاب، رویکردهای غیرمتمرکز می‌توانند نقش اساسی در کاهش آثار منفی شهرنشینی در هیدرولوژی و کیفیت آب داشته باشند. در کشورهای مختلف، راهکارهای غیرمتمرکز عناوین مختلفی دارند: مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب شهری^۵ (IUWM)، سامانه‌ی زهکشی پایدار شهر (SUDS)^۶، کنترل در منشأ^۷، بهترین شیوه‌های مدیریت (BMP)^۸، توسعه‌ی کم اثر (LID)، طراحی شهری حساس به آب (WSUD)^۹، و مدیریت نوآورانه‌ی رواناب شهری^{۱۰}.^[۷] رویکردهای ذکر شده به سبب نگرانی‌های

به‌سادگی تعیین مقدار مناسب کود برای باغچه‌ی یک خانه و یا به‌پیچیدگی احداث یک سازه‌ی مهندسی، همچون تالاب سیلاب‌گیر^۱ باشند. به‌کارگیری روش‌هایی که توسعه‌ی شهری را با کمترین خسارت‌های محیطی به پیش ببرند، از مهم‌ترین مسئولیت‌های مدیران شهری است؛ که مزایای استفاده از آن‌ها، عبارت‌اند از: ۱) عدم نیاز به وجود فضای خالی برای ساختن مخازن بزرگ در محیط متراکم شهری، ۲) کاهش بار آلودگی و بهبود کیفیت رواناب قبل از رسیدن به منابع آب، ۳) جلوگیری از تخریب محیط‌زیستی در مناطق مسکونی و تجاری، ۴) بازگردانی حوضه‌ی آبخیز به رژیم هیدرولوژیکی قبل از توسعه به واسطه‌ی نفوذ، تصفیه، ذخیره، تبخیر، و نگهداشت رواناب در نزدیک‌ترین محل به منبع تولید آن، ۵) کاهش حجم جریان و دبی اوج.^[۲]

الگوی جمع‌آوری رواناب سطحی می‌تواند به‌صورت متمرکز یا غیرمتمرکز باشد (شکل ۱). در الگوی متمرکز (شکل ۱- A)، فاضلاب از چند منطقه‌ی پراکنده و مختلف به یک تصفیه‌خانه‌ی مرکزی منتقل می‌شود. در الگوی غیرمتمرکز (شکل ۱- B)، فاضلاب در نزدیک‌ترین مکان به محل تولید یا به محل بالقوه‌ی مصرف، تصفیه و استفاده‌ی مجدد می‌شود. لذا، در این نوع الگو برای تصفیه‌ی فاضلاب کل شهر ممکن است چند تصفیه‌خانه‌ی محلی موردنیاز باشد. در الگوی ترکیبی (شکل ۱- C)، فاضلاب در همان مکان تولید، تصفیه و استفاده‌ی مجدد می‌شود و در شرایط حجم مازاد بر ظرفیت تصفیه‌ی محلی (مانند سیلاب)، به شبکه‌ی اصلی برگردانده می‌شود.^[۴]

از طرفی، روش‌های غیرمتمرکز مدیریت آلودگی رواناب‌های سطحی را می‌توان به دو دسته‌ی روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم کرد. رویکردهای غیرسازه‌ای، رویکردهای سازمانی و پیشگیری از آلودگی هستند، که برای جلوگیری یا کاهش آلاینده‌های ورودی به رواناب و یا کاهش حجم رواناب طراحی شده‌اند؛ که شامل تسهیلات ثابت دائم نمی‌شوند و معمولاً با تغییر رفتار از طریق مقررات دولتی (برای مثال قوانین برنامه‌ریزی و محیط‌زیستی)، متقاعدسازی و یا ابزارهای اقتصادی کار می‌کنند. تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای اقدام‌های غیرسازه‌ای (در واقع بازدارنده) انجام شده است.^[۵] بنیاد تحقیقات آب و محیط‌زیست نیوزلند این اقدامات را در سه دسته‌ی کلی قرار داده است: ۱) برنامه‌ریزی/ مقررات (شامل: کنترل‌های تخلیه، کنترل‌های مواد خطرناک، کنترل‌های طراحی شهری (WSUD، LID)، عوارض/ مشوق‌ها)؛



شکل ۱. انواع الگوهای جمع‌آوری رواناب سطحی، شامل: (A) متمرکز، (B) غیرمتمرکز، و (C) ترکیبی. دایره‌های سیاه: تولیدکننده‌ی منفرد، دایره‌های سفید: مصرف‌کننده‌ها، دایره‌های خاکستری: مصرف‌کننده‌های مشارکتی.^[۴]

⁶ Sustainable Drainage System

⁷ Source Control

⁸ Best Management Practices

⁹ Water Sensitive Design

¹⁰ Innovative Stormwater Management

¹ Storm Water Wetland

² Low Impact Development

³ Green Infrastructure

⁴ Low Impact Development

⁵ Integrated Urban Water Management

ارتباط سطوح نفوذناپذیر^{۱۳}، مخازن ذخیره‌ی موقت و یا دائمی رواناب،^(۱۰) ترانشه‌های نفوذ^[۱۲] هدف اصلی رویکردهای غیرمتمرکز ذکرشده، کاهش حجم رواناب از سطوح غیرقابل نفوذ^{۱۳} و همچنین، کاهش میزان آلودگی وارده بر آب‌های پذیرنده است.^[۱۰] در ادامه، برخی از روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر معرفی شده‌اند.

۱.۱.۳. سامانه‌های مهار و ذخیره‌ی آب باران

یکی از مؤثرترین راه‌های کنترل رواناب در منشأ، ذخیره‌سازی آب باران با استفاده از مخازن یا بشکه‌های کوچک آب (شکل ۲)، به‌منظور آبیاری فضای سبز خانگی است. سامانه‌های مهار و ذخیره‌ی آب باران قرن‌هاست که برای تأمین نیازهای ذخیره‌ی آب شهری،^[۱۱] استفاده می‌شوند و در حال حاضر، رویکرد معمول در هند، آفریقا، آمریکا، آسیا، استرالیا، و بسیاری از مناطق دیگر برای تأمین نیاز ذخیره‌ی آب است و مقبولیت اجتماعی قابل‌توجهی دارد (برای مثال، پروژه انجام‌شده در هند (۲۰۱۰)،^[۱۲] رویکرد ذکرشده، در شهرهای ژاپن و آلمان معمولاً برای کنترل سیل، مدیریت آلودگی رواناب، و دیگر نیازها استفاده می‌شود؛^[۱۵-۱۳] و به‌علاوه، اقدامی مؤثر برای سازگاری با آثار تغییرات آب و هوایی است.

از مزایای سامانه‌ی مهار و ذخیره‌ی آب باران می‌توان به این موارد اشاره کرد:

(۱) جمع‌آوری و ذخیره‌ی رواناب بام ساختمان‌ها،^(۲) استفاده از آب باران برای مصارفی همچون آبیاری فضای سبز و باغچه‌ها در محل بارش،^(۳) کاهش حجم رواناب ورودی به شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب از طریق انفعال هیدرولیکی پشت بام از شبکه‌ی آب‌های سطحی،^(۴) نصب و راه‌اندازی آسان،^(۵) قیمت ارزان.^[۱۷]

با وجود ویژگی‌های ذکرشده، سامانه‌ی مهار و ذخیره‌ی آب باران معایبی نیز دارد، از جمله: (۱) خطر بالاگرفتنی در گلوگاه،^(۲) بهبود ناچیز کیفیت آب،^(۳) عدم تضمین عملکرد صحیح آن به‌دلیل قرارگیری مالک دستگاه به‌عنوان اپراتور،^(۴) نیازمند به وجود فضای مناسب جهت استقرار منبع ذخیره،^(۵) کارایی مناسب برای مناطقی که بیش از ۴ ماه در سال بارندگی دارند.^{[۱۷] و [۱۸]}

مطالعات مختلفی در نقاط مختلف جهان در زمینه‌ی اثربخشی سیستم‌های مهار و ذخیره‌ی آب انجام شده است. برای مثال، بررسی مزایای سیستم‌های ذخیره‌ی آب باران در شهرهای ایالات متحده، توسط استیفن^{۱۴} و همکاران^(۲۰۱۳)،^[۱۹] نشان داد عملکرد مخازن باران، تابعی از اندازه‌ی مخزن و الگوی آب و هواست.



شکل ۲. سامانه‌ی مهار و ذخیره‌ی آب باران.^[۱۶]

حاصل از پایداری در مناطق شهری به‌وجود آمده‌اند، که شامل کاهش سطوح غیرقابل نفوذ، نگهداشت رواناب در محل، افزایش نفوذ، و تبخیر- تعرق سیلاب، و بازسازی شرایط هیدرولوژیک قبل از توسعه می‌شوند. اقدام‌های اخیر می‌توانند شرایط رواناب را به قبل از توسعه‌ی شهری، یا حتی بهتر تبدیل کنند.^[۸]

عملیات زیرساخت سبز، از جمله راه‌حل‌های توسعه‌ی پایدار شهری یا توسعه‌ی مجدد هستند، که مبتنی بر فلسفه‌ی مدیریت سیلاب در محل هستند و نفوذ و ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهند، زمان اوج رواناب را به تأخیر می‌انداختند، حجم رواناب را کاهش می‌دهند، و حرکت آلاینده‌ها را کنترل می‌کنند. عنوان بهترین شیوه‌های مدیریت (BMP) را معمولاً برای اقدام‌های رویکردهای غیرمتمرکز در مقیاس بزرگ به‌کار می‌برند، در حالی که در مقیاس کوچک، از عنوان توسعه‌ی کم‌اثر (LID) استفاده می‌شود.

۳. اقدام‌های توسعه‌ی کم‌اثر (LID)

توسعه‌ی کم‌اثر، یک روش برنامه‌ریزی و طراحی مهندسی برای مدیریت رواناب شهری، با هدف تقلید رژیم هیدرولوژیکی پیش از توسعه است. اگرچه بهترین شیوه‌های مدیریت رواناب، با مقیاس بزرگ در ذخیره‌ی حجم بالایی از رواناب و بهبود کیفیت کلی حوضه‌های آبخیز شهری مؤثر هستند، اما معمولاً یافتن فضای خالی برای ساختن آن‌ها در محیط متراکم شهری دشوار است. به‌علاوه، این چنین عملیاتی بیش از کنترل، نقش بهبود کیفیت رواناب را قبل از رسیدن به منابع آب پذیرنده انجام می‌دهند. بنابراین، ایده‌ی اقدام‌های توسعه‌ی کم‌اثر اغلب رویکرد مناسب‌تری برای مدیریت رواناب و کنترل آلودگی در حوضه‌های آبخیز شهری است.^[۲۱] توسعه‌ی کم‌اثر بر حفاظت از ویژگی‌های طبیعی و استفاده از کنترل‌کننده‌های هیدرولوژیکی مهندسی‌شده‌ی کوچک‌مقیاس برای نفوذ، فیلتر، ذخیره، تبخیر، و نگهداشت رواناب در نزدیکی منشأ آن تأکید می‌کند. راهبرد اساسی به‌کارگیری روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر، کاهش تخریب- های محیط‌زیستی در مناطق مسکونی و تجاری است. به‌عبارت دیگر، هدف کلی استفاده از اقدام‌های توسعه‌ی کم‌اثر، تقلیدکردن یا تلاش برای بازسازی مصنوعی هیدرولوژی منطقه به شرایطی است که هنوز توسعه نیافته و حجم رواناب متأثر از توسعه‌ی شهری نشده باشد. اقدام‌های توسعه‌ی کم‌اثر، روش نسبتاً جدیدی در مدیریت سیلاب شهری است و عمدتاً، در مناطق تازه‌تأسیس شهری استفاده می‌شوند و می‌توانند باعث میرایی آلودگی، کاهش حجم جریان، و کاهش دبی اوج شوند.^{[۲۱] و [۲۳]}

به‌منظور استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر، شرایط مختلفی، از جمله: (۱) شرایط اقلیمی،^(۲) سامانه‌ی شهری و شهرسازی، تراکم جمعیت و تراکم ساخت و سازها،^(۳) میزان پذیرش اجتماعی و فرهنگی طرح‌ها از سوی مردم، دولت، و دستگاه قانونگذار،^(۴) هزینه‌ها و پارامترهای اقتصادی،^(۵) قوانین و استانداردهای موجود در زمینه‌ی تأمین و مصرف آب، و^(۶) امکان ترکیب روش‌های منتخب پیشنهادی باید در نظر گرفته شوند.^[۹]

۱.۳. انواع روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر

از جمله روش‌هایی که در راهبرد توسعه‌ی کم‌اثر گنجانده می‌شوند، عبارت‌اند از: (۱) باغچه‌های باران‌زاد (حوضچه‌های زیستی)،^(۲) سقف‌های با پوشش گیاهی (بام سبز)،^(۳) ذخیره‌سازی در کنار پیاده‌روها،^(۴) گودال‌ها، حائل‌ها، و نوارهای با پوشش گیاهی،^(۵) قطع ارتباط هدایت‌کننده‌های رواناب پشت‌بام^(۱۱)،^(۸) قطع

¹³ Impervious surface

¹⁴ Steffen

¹¹ Roof Leader Disconnection

¹² Impervious Surface Reduction and Disconnection



شکل ۴. روکش‌های نفوذپذیر.^[۱۸]



شکل ۳. چاهک‌های نفوذ آب باران.^[۱۳]

آلاینده‌های موجود در رواناب را پالایش می‌کنند. این روش، قابلیت پیاده‌سازی برای روکش سطوح پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، و خیابان‌ها را دارد.^[۱۷]

با توجه به اینکه روسازی‌های نفوذپذیر در معرض نفوذ رواناب به هنگام وقوع بارش قرار می‌گیرند، لازم است تمهیداتی مطابق این شرایط رعایت شوند:^[۱۷]

۱. در معابری که بار ترافیکی نسبتاً پایینی دارند، استفاده شوند (برای مثال، پیاده‌روها، کوچه‌های با ترافیک پایین، و حیاط منازل).

۲. کمینه‌ی نفوذپذیری خاک باید $0/8$ سانتی‌متر در ساعت باشد و همچنین، در حوضه‌ی موردنظر نسبت سطوح نفوذناپذیر به نفوذپذیر ۳ به ۱ باشد.

۳. روسازی نفوذپذیر در مناطق آلوده و سمی توصیه نمی‌شود.

۴. در جانمایی سطوح مذکور، عمق یخبندان بررسی شود.

از مزایای روش اخیر می‌توان به موارد: (۱) ذخیره‌ی موقت آب، (۲) تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی، (۳) تصفیه‌ی رواناب شهری و بهبود کیفیت آن با استفاده از مکانیزم‌های صاف‌کردن، جذب سطحی خاک، و تجزیه‌ی بیولوژیکی به‌دلیل عبور رواناب از لایه‌های خاک، (۴) استفاده برای سطوح نفوذناپذیر شهری، مانند روکش پیاده‌روها و پارکینگ‌ها، صحن ساختمان‌های اداری و عمومی، و حیاط منازل و املاک خصوصی، (۵) کاهش حجم رواناب در صورت استفاده‌ی یکپارچه و پوشش ۳۰ درصدی سطح حوضه، (۶) جلوگیری از انباشت آب در سطح خیابان، (۷) افزایش نرخ نفوذ آب، و (۸) جلوگیری از خیس شدن عابران پیاده به هنگام عبور وسائط نقلیه و گِل‌آلود شدن آن اشاره کرد.^{[۱۷] و [۱۸]}

با وجود ویژگی‌های ذکرشده، روش روکش‌های نفوذپذیر معایبی نیز دارد، که به این شرح است:^{[۱۷] و [۱۸]}

۱. باتوجه به اینکه گرفتگی، کارایی سیستم‌های مذکور را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد، استفاده از روکش‌های نفوذپذیر نیز باید در مناطقی استفاده شود که رواناب، حاوی موادی از قبیل رس و لای نباشد و موجب پُر شدن فضای خالی بین دانه‌های آن نشود.

۲. با توجه به زمان ماند هیدرولیکی در روکش‌های نفوذپذیر، ممکن است نگهداشت رواناب در روکش‌های ذکرشده پس از دو بارش همزمان پاسخگو نباشد و کارایی خود را از دست بدهد.

یک بشکه‌ی باران منفرد (۵۰ گالن) نصب‌شده در یک قطعه‌ی مسکونی قادر به ایجاد تقریباً ۵۰٪ اثربخشی ذخیره‌ی آب برای نیاز آب غیرآشامیدنی در شهرهای ساحل شرقی، جنوب‌شرقی، غربی مرکزی، و شمال غربی اقیانوس آرام است. نتایج آن‌ها همچنین نشان می‌دهد که برداشت آب باران می‌تواند حجم رواناب رگبار را تا ۲۰٪ در نواحی نیمه‌خشک کاهش دهد. لیو^{۱۵} (۱۹۹۲)،^[۲۰] نیز اثربخشی بشکه‌های باران را در کاهش دبی اوج در یک حوضه‌ی آبخیز نیمه‌شهری بررسی کرده و دریافته است که برای یک طوفان با دوره‌ی بازگشت کمتر از ۳ سال، با جمع‌کردن همه‌ی حجم بارش دریافتی سقف‌ها، بشکه‌های باران برای کنترل سیل کافی هستند.

۲.۱.۳. چاهک‌های جذبی

چاهک‌های جذبی یا چاهک‌های نفوذ آب باران (شکل ۳)، مخازن کوچک مکعبی یا استوانه‌ای هستند، که پس از حفاری، درون آن‌ها به وسیله‌ی سنگ لاشه پر می‌شود و دیواره‌ی آن‌ها با یک تیغه یا غلاف از جنس آجر، بلوک‌های پیش‌ساخته‌ی بتنی، و یا حلقه‌های پلی‌اتیلن مشبک پوشانده و اطراف و درون آن با مواد درشت‌دانه پُر می‌شود.^[۱۷]

از مزایای سامانه‌ی چاهک‌های جذبی می‌توان به این موارد اشاره کرد:

(۱) تسهیل نفوذ آب به داخل خاک، (۲) کاهش حجم و ایجاد تأخیر در حرکت رواناب، (۳) کمک به تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی و تأمین بخشی از نیاز طبیعی آبخوان، (۴) تصفیه‌ی طبیعی رواناب، (۵) کاهش شوری آب زیرزمینی و پس‌زدن اولیه‌ی آب شور در مناطق نزدیک به دریا، (۶) کمک به بهبود محیط‌زیست با کاهش میزان رواناب سطحی آلوده، (۸) هزینه‌ی نسبتاً کم اجرایی، و (۹) سهولت اجرا (البته بسته به شرایط منطقه و جنس خاک) اشاره کرد.^{[۱۷] و [۱۸]}

با وجود ویژگی‌های ذکرشده، سامانه‌ی چاهک‌های جذبی در خاک‌های با قابلیت زهکش پایین، پایداری پی سازه‌های اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، در صورتی که رواناب آلودگی‌های شیمیایی و صنعتی داشته باشد، به‌علت آلوده‌شدن آبخوان، مناسب نیست و توصیه نمی‌شود. همچنین، به منظور جلوگیری از گرفتگی، این سامانه نیاز به پایش و نگهداری دارد و کارایی آن در کاهش آلاینده‌ی ذرات معلق و فلزات سنگین، متوسط ارزیابی شده است.^{[۱۷] و [۱۸]}

۳.۱.۳. روکش‌های نفوذپذیر

روکش‌های نفوذپذیر یا متخلخل (شکل ۴) انواع خاصی از سطوح هستند، که با تشکیل یک سامانه‌ی نفوذ، به رواناب اجازه‌ی عبور می‌دهند و برخی از

۳. در مناطق با بار ترافیکی بالا و دارای رواناب آلوده توصیه نمی‌شود.

۴. هزینه راه‌اندازی بالاتر نسبت به روسازی‌های معمولی.

مطالعات مختلفی در مورد عملکرد و اثربخشی روسازی‌های نفوذپذیر در نقاط مختلف جهان انجام شده است. آل‌یاسری و ژو^[۱۶] (۲۰۱۶)، رواناب قبل از ساخت و بعد از ساخت روسازی نفوذپذیر در سنت لویس ایالات متحده را مقایسه کرده و دریافته‌اند که کاهش رواناب از ۱۳٪ برای آسفالت متخلخل تا ۴۶٪ برای سنگفرش‌های بتنی به هم پیوسته‌ی نفوذپذیر متغیر بوده است. بیشتر قابلیت‌های کاهش حجم سنگفرش‌های نفوذپذیر به اندازه‌ی مساحت زهکشی مشارکت‌کننده نسبت داده می‌شود. ارزیابی قابلیت سه نوع روسازی نفوذپذیر در بهبود کیفیت رواناب، در دوره‌ی زمانی ۲۲ ماهه، در مَدیسون ایالت ویسکانسین ایالات متحده نشان داد که: (۱) روسازی نفوذپذیر جامدات معلق را تا تقریباً ۶۰٪ کاهش می‌دهد، (۲) غلظت کلراید در زمستان کاهش یافته است، اما دوباره در بهار آزاد شده است، (۳) آلاینده‌های محلول را به‌طور مؤثر تصفیه نمی‌کنند، و (۴) pH بالا رفته در بتن نفوذپذیر ممکن است فسفات را کاهش دهد.^[۲۳] همچنین، نتایج آزمایش‌های میدانی ۱۵ ماهه، به‌طور واضح، مزایای زیست‌محیطی سنگفرش‌های متخلخل در زمینه‌های: (۱) کاهش حجم و دبی اوج رواناب سطحی، (۲) مهار آب باران، (۳) تغذیه‌ی آب زیرزمینی، (۴) کاهش حرارت سطح سنگفرش (کاهش اثر پدیده‌ی جزیره‌ی حرارتی شهری)، و (۵) تبخیر رواناب نفوذی به داخل مواد سنگفرش را نشان داده است.^[۲۴]

۴.۱.۳. جوی‌باغچه‌ها

جوی‌باغچه یا آبراهی علفکاری‌شده (شکل ۵)، کانال خاکی عریض و کم‌عمقی است که برای جلوگیری از فرسایش و تسهیل نفوذ آب به درون خاک علفکاری‌شده است. شیب کم جوی‌باغچه با استفاده از موانع در طول مسیر، نفوذ رواناب در خاک را افزایش می‌دهد و در این راستا، بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آلودگی‌های آب نیز زودوده می‌شود.^[۱۱]

بهبود کیفیت رواناب به‌دلیل نفوذ بخشی از رواناب در خاک، کمک به تغذیه‌ی زیرزمینی و ایجاد چشم‌انداز و منظر زیباتر در شهر آب از مزایای روش جوی‌باغچه است.^[۱۱، ۱۸ و ۱۹] مکانیزم نفوذ در جوی‌باغچه‌ها باعث تغذیه‌ی آب زیرزمینی می‌شود. البته، جوی‌باغچه‌ی مرطوب در تغذیه‌ی آب زیرزمینی مشارکت خیلی کمی دارد. مطالعه‌ای در ارتباط با ارزیابی عملکرد جوی‌باغچه‌ها



شکل ۵. جوی‌باغچه‌ها.^[۲۶]

در تصفیه‌ی رواناب بزرگراه،^[۲۵] نشان داده است که: (۱) جوی‌باغچه‌ها به‌طور قابل‌توجهی جامدات معلق کل و فلزات سرب، مس، روی، و کادمیم را حذف کرده‌اند، (۲) آلاینده‌های متصل به ذرات، بیشترین میزان حذف را داشته‌اند، و (۳) مکانیزم تصفیه‌ی غالب، ته‌نشینی و صاف کردن درون لایه‌ی علف بوده است. همچنین، مرور فرآیندهای بهبود کیفیت رواناب در جوی‌باغچه‌ها توسط گاوریک^[۱۷] و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۶] نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات تجربی کیفیت جریان جوی‌باغچه بر حذف آلاینده‌های همراه با رواناب جاده و به ویژه جامدات معلق تمرکز کرده و مطالعات نسبتاً کمی هم در مورد مواد مغذی، باکتری‌های همراه با هیدروکربن‌ها، مواد نیازمند اکسیژن، کلراید، و باکتری نشانگر مدفوع انجام شده است.

با وجود مزایای جوی‌باغچه‌ها، سامانه‌ی اخیر معایبی نیز دارد که موجب می‌شود تا در مناطق توسعه‌یافته، کارایی کمتری داشته باشد. در مناطق مذکور، به‌دلیل تراکم جمعیت و رشد صنعتی، بار رسوب بالا و تخریب پوشش گیاهی مشاهده می‌شود و این اتفاق باعث ایجاد مانداب و ایجاد تجمع پشه در منطقه خواهد شد. همچنین، روش جوی‌باغچه نیازمند شیب مناسب (کمتر از ۵٪) است و مساحتی معادل حدود ۴ هکتار را می‌تواند تحت سرویس قرار دهد. وجود خاک خشک با نفوذپذیری زیاد، از قبیل: ماسه، لوم ماسه، ماسه‌ی لومی، لوم، و سیلت لومی، نیز یکی دیگر از شرایطی است که استفاده از روش جوی‌باغچه را محدود می‌کند.^[۱۸ و ۱۹]

۵.۱.۳. ترانشه‌های نفوذ

ترانشه‌ی نفوذ (شکل ۶)، یک ترانشه‌ی طولی و کم‌عرض است، که درون آن با ذرات درشت‌دانه و قطعات سنگ پر می‌شود و معمولاً مجرای خروجی ندارد. رواناب ورودی به تأسیسات ذکرشده در فضای خالی مابین ذرات درشت‌دانه موقتاً ذخیره می‌شود و به‌تدریج از کف و دیواره‌ها به درون خاک اطراف ترانشه نفوذ می‌کند.^[۱۷]

از مزایای سامانه‌ی ترانشه‌های نفوذ، می‌توان به موارد: (۱) کاهش حجم رواناب، (۲) تغذیه‌ی آبخوان، (۳) نیاز به فضای کم و عدم آشفتنگی محیطی به‌علت زیرسطحی‌بودن آن، (۳) بهبود کیفیت رواناب، و (۴) قابلیت استفاده در بین جاده‌ها اشاره کرد.^[۱۸ و ۱۹] الزامی‌بودن بررسی و کنترل گرفتگی در آن‌ها، توصیه به استفاده از سیستم پیش‌تصفیه برای آن، نیاز به فاصله‌ی کمینه‌ی ۱/۲ متری



شکل ۶. ترانشه‌های نفوذ.^[۲۱]

از آب زیرزمینی (توصیه می‌شود سطح آب زیرزمینی پایین باشد)، و نامناسب بودن در مناطق صنعتی و تجاری، از معایب ترانسه‌های نفوذ به حساب می‌آید.^[۱۷ و ۱۸]

مهندسان طراحی به‌طور کلی از ترانسه‌های نفوذ برای نواحی زهکشی کوچک‌تر از ۵ هکتار، با نفوذپذیری نسبتاً بالا استفاده می‌کنند.^[۱۲۷] ترانسه‌های نفوذ اغلب برای نواحی خشک خیلی مناسب هستند، زیرا آب زیرزمینی را تغذیه می‌کنند. در بیشتر آب و هواهای سرد می‌توانند قابل اجرا باشند، اما چالش‌هایی برای استفاده‌ی آن‌ها نیز وجود دارد.

داده‌های عملکرد برای کنترل‌کننده‌های بر پایه‌ی نفوذ رواناب، به‌طور کلی، به حجم رواناب دریافت‌شده، رواناب نفوذیافته، و همچنین، سطح پیش‌فرض نفوذ خاک مرتبط هستند.^[۱۲۸] بررسی اثربخشی حوضه‌ی نفوذ رواناب^{۱۸} در حذف آلاینده‌ها از رواناب شهری در شرق سیدنی توسط بریج^{۱۹} و همکاران (۲۰۰۵)،^[۲۹] نیز نشان داده است که حوضه‌های نفوذ رواناب به‌طور متوسط تا زیاد در حذف مواد معلق و فلزات کمیاب مس، سرب، و روی مؤثر بوده‌اند. مطالعات کمی برای ارزیابی عملکرد ترانسه‌های نفوذ با در نظر گرفتن نفوذ هم از سمت دیواره‌ی کناری و هم کف انجام شده است (برای مثال، نوشتار لی^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۴)،^[۳۰]).

۳.۱.۶. مخازن نگهداشت زیستی (باغچه‌های باران‌زاد)

سیستم‌های نگهداشت زیستی یا باغچه‌های باران‌زاد به‌طور گسترده در سراسر جهان، از جمله ایالات متحده‌ی آمریکا، استرالیا، چین، بریتانیا، کانادا، سنگاپور، و نیوزلند نصب می‌شوند.^[۳۲] مخازن نگهداشت زیستی (شکل ۷)، از یک محدوده‌ی مخزن‌مانند سطحی و یک لایه‌ی خاکی زیرین تشکیل می‌شوند. آبی که در لایه‌ی بالائی سیستم جمع می‌شود، از لایه‌های علف‌کاری‌شده‌ی سطحی، لایه‌ی کود گیاهی، و لایه‌ی خاک تراوا عبور می‌کند و در نهایت، در سنگدانه‌های بستر به‌طور موقت ذخیره می‌شود. آب ورودی به سامانه، یا به لایه‌های پائین‌تر خاک نفوذ می‌کند و یا از طریق یک لوله‌ی زهکشی مشبک به سمت تخلیه‌گاه یا یک کانال خروجی هدایت می‌شود. در مناطق شهری با تراکم زیاد، نواحی مانند نوارهای میانی خیابان، پارکینگ‌ها، جزایر ترافیکی، پیاده‌روها، و سایر مناطق غیرقابل نفوذ، برای در نظر گرفتن سامانه‌های نگهداشت زیستی مناسب هستند.^[۱۰]



شکل ۷. مخازن نگهداشت دائمی زیستی و باغچه‌های باران‌زاد.^[۳۲]

باغچه‌ی باران‌زاد، شرایط نفوذ و تصفیه‌ی رواناب جمع‌آوری شده را فراهم می‌کند و منجر به کاهش دبی اوج و حجم رواناب می‌شود. البته مطالعاتی نشان داده است که تسهیلات برداشت آب، مانند باغچه‌های باران‌زاد، می‌توانند به‌طور مؤثر سیل‌گرفتگی با شدت بارش کم را کم کنند، اما قادر به کاهش سیلاب با بزرگی بالا را ندارند.^[۳۴] باغچه‌های باران‌زاد در ظاهر همانند باغچه‌های معمولی هستند؛ بنابراین، باغچه‌های باران‌زاد به راحتی می‌توانند جایگزین باغچه‌های موجود در منازل یا حاشیه‌ی خیابان‌ها شوند.

کاهش دبی اوج و حجم رواناب مناطق نفوذناپذیر، ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ آب به درون خاک، تصفیه‌ی رواناب (توانایی پاکسازی رسوب‌های ریزدانه، فلزات سنگین، مواد آلی و مغذی، باکتری‌ها، و مواد ارگانیک)، انعطاف فراوان برای تطابق و همخوانی با محل احداث طبق شرایط و ویژگی‌های محل مورد نظر و ایجاد منظره‌ی زیبا به‌واسطه‌ی کاشت انواع گیاهان از مزایای باغچه‌های باران‌زاد هستند. از محدودیت‌های باغچه‌های باران‌زاد می‌توان به عدم کارایی آن‌ها در شیب‌های زیاد (بیش از ۱۵٪) و ایجاد مشکل در عملکرد و از کار افتادن آن‌ها در صورت وجود بار زیاد رسوب‌ها اشاره کرد.^[۳۵]

تانگ^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۳۶] نشان داده‌اند که حتی اگر حوضچه‌های نگهداشت زیستی، بخش کوچکی از مساحت شهر را اشغال کنند، می‌توانند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای اثر هیدرولوژیکی نامطلوب حاصل از نفوذناپذیری را کاهش دهند.

طراحی حوضچه‌ی نگهداشت زیستی و انتخاب مؤلفه‌های آن به ویژگی‌های هیدرولوژیکی، بار آلودگی رواناب، نوع پوشش گیاهی، محیط خاک، و لایه‌های زیرین بستگی دارد.^[۳۷] انتخاب دقیق پوشش گیاهی در حین طراحی سیستم‌های فیلتراسیون زیستی برای دستیابی به نتایج عملی مورد نظر حیاتی است. دوام و رشد گیاه شدیداً وابسته به آب و هواست و این به‌وضوح نیاز برای پژوهش بر عملکرد حوضچه‌های نگهداشت زیستی در آب‌وهوای مختلف را نشان می‌دهد.^[۳۸ و ۳۹] بررسی نوع و ماهیت رواناب ورودی به نگهداشت زیستی نیز حیاتی است. اگر انتظار می‌رود که رواناب شامل رسوبات معلق بالا باشد، مطلوب است که نوارهای بافر گیاهی (علف)، به منظور پیش‌تصفیه نصب شود.^[۴۰]

راهنماهای طراحی ویژه‌ای برای نصب و اجرای سیستم‌های نگهداشت زیستی برای مناطق جغرافیایی منتخب توسعه یافته‌اند.^[۴۱ و ۴۲] ویژایارگاو^{۲۲} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۴۳] بیان کرده‌اند که سازگار کردن راهنماهای طراحی بدون در نظر گرفتن شرایط زیرساختی و آب‌وهوایی محلی اغلب به شکست اجرایی سیستم‌های نگهداشت زیستی منجر می‌شوند، که در حال حاضر بسیاری از شهرداری‌ها با آن مواجه هستند. برای مثال، وانگ^{۲۳} و همکاران (۲۰۱۷)،^[۴۴] اشاره کرده‌اند که اثربخشی ضعیف سیستم‌های نگهداشت زیستی نصب‌شده در کشورهای گرمسیری (استوایی، مانند سنگاپور) غالباً به دلیل اینکه سیستم‌های مذکور براساس راهنماهای مناطق معتدل طراحی شده‌اند، رخ می‌دهد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود بررسی‌های هدفمند محلی و میدانی بر سیستم‌های نگهداشت زیستی، برای دست کم ۸ ماه قبل و بعد از تصفیه انجام شود.^[۴۳]

۷.۱.۳. مخازن ذخیره‌ی موقت رواناب

استخرها یا حوضچه‌های نگهداشت موقت رواناب (شکل ۸)، مخازن و یا تأسیسات ذخیره‌ی سطحی هستند که با ذخیره‌ی موقت رواناب حاصل از بارندگی و کنترل جریان خروجی، موجب کاهش دبی اوج سیلاب می‌شوند. میزان جریان خروجی از مخازن مذکور به ظرفیت تأسیسات پایین‌دست مخزن بستگی دارد.^[۴۶]

از مزایای سامانه‌ی مخازن ذخیره‌ی موقت رواناب می‌توان به: (۱) کمک به ته‌نشینی مواد جامد معلق، و (۲) قابل استفاده‌بودن در مناطق توسعه‌یافته و پرتراکم شهری، و همچنین پارکینگ‌ها اشاره کرد.^[۴۶] تجمع پشه و حشرات در منطقه، در صورت طراحی و نگهداری ضعیف حوضچه‌های نگهداشت، و امکان ایجاد بو و مزاحمت برای ساکنان در صورت عدم زهکشی مناسب در محدوده‌ی شهری، از محدودیت‌های سامانه‌ی مخازن ذخیره موقت رواناب است.

۸.۱.۳. مخازن ذخیره‌ی دائمی

در اوقات خشک و بدون باران، که فقط جریان پایه برقرار است، مخزن ذخیره‌ی دائمی (شکل ۹) به صورت یک حوضچه‌ی دائمی عمل می‌کند و سطح آب حوضچه از سطح فوقانی بخش دائمی مخزن بالاتر نمی‌رود. در مواقع سیلابی، جریان ورودی به حجم موجود در بخش دائمی مخزن افزوده می‌شود و بخش دیگری از مخزن را اشغال می‌کند که در بالای مخزن دائمی قرار دارد، سپس به‌تدریج تخلیه می‌شود. این گونه مخازن در کنترل و ته‌نشینی رسوب‌های ورودی به حوضچه مؤثر هستند و کیفیت آب را نیز تا حد زیادی بهبود می‌بخشند.^[۴۷]



شکل ۸. مخازن ذخیره‌ی موقت رواناب.^[۴۵]



شکل ۸. مخازن ذخیره‌ی دائمی.^[۴۸]

حوضچه‌های دائمی یا مرطوب نسبت به حوضچه‌های نگهداشت موقت و خشک، غالباً منظره‌ی زیباتری را ایجاد می‌کنند و کارایی بیشتری در تصفیه‌ی رواناب‌های شهری دارند. اما، استفاده از آن‌ها در شرایطی مطرح می‌شود که یک جریان پایه‌ی دائمی در سراسر طول سال، یا در بیشتر اوقات، وارد حوضچه یا استخر شود.^[۴۷] مقایسه‌ی اثربخشی حوضه‌های نگهداشت موقت و دائمی (برای جلوگیری از آثار منفی افزایش رواناب) در شهرستان جیمزسیتی ویرجینیا نشان داد که در رخدادهای طوفانی، حوضه‌های خشک غلظت بالاتری از رسوب‌ها و مواد مغذی محلول را نسبت به حوضچه‌ی مرطوب تخلیه می‌کنند.^[۴۷]

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ^{۲۴} یک حوضچه‌ی نگهداشت دائمی، متغیر کلیدی تعیین‌کننده‌ی اثربخشی تصفیه‌ی آن است.^[۴۸] همچنین، یک پژوهش پایشی به مدت ۱ سال بر حوضچه‌ی ذخیره‌ی دائمی در ساحل ویرجینیای ایالات متحده‌ی آمریکا نشان داد که ویژگی‌های بارش، شامل: عمق بارش، بیشینه‌ی شدت بارش، و دوره‌ی خشک پیشین، نقش مهمی در اثربخشی حذف و تصفیه‌ی حوضچه‌های ذخیره‌ی دائمی داشته است.^[۴۹]

۹.۱.۳. تالاب مصنوعی

تالاب‌های مصنوعی (شکل ۱۰)، حوضچه‌های نگهداشت کم‌عمقی هستند که با دریافت جریان پایه‌ی دائم و پیوسته و استفاده از پوشش گیاهی متراکم از سرعت رواناب می‌کاهند و زمان لازم را برای رسوب‌گذاری، نفوذ آب، و جذب بیولوژیک آلاینده‌ها به‌وجود می‌آورند.^[۵۰] کارایی تالاب‌ها مصنوعی در کاهش دبی اوج سیلاب ورودی، قابل قبول است و همچنین، سازگاری خوبی با محیط اطراف و شرایط اکولوژیکی بالقوه‌ی منطقه دارد. اما، در کاهش حجم سیلاب، کارایی ضعیفی نشان می‌دهند.^[۵۰] نقطه‌ی ضعف عمده‌ی این تأسیسات نیاز به جریان پایه‌ی دائم و همیشگی برای حصول اطمینان از ادامه‌ی حیات تالاب است.

در زمینه‌ی حذف آلودگی، تالاب‌های مصنوعی از مؤثرترین کنترل‌کننده‌ها به‌حساب می‌آیند. تالاب‌های مصنوعی کمتر به تغییرات بار آلودگی حساس‌اند و قادر به تصفیه‌ی آب معدن‌کاری، فاضلاب صنعتی، فاضلاب خانگی، فاضلاب حیوانی، رواناب شهری، و رواناب مزرعه هستند.^[۵۱] نتایج مطالعه‌ی نشان داده است که وجود پوشش گیاهی (که به‌طور قابل‌توجهی اثربخشی فرایند تصفیه را افزایش می‌دهد) و زمان ماند بهینه، مقاومت سیستم در برابر غلظت متغیر آلاینده‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.^[۵۱]



شکل ۹. تالاب مصنوعی.^[۵۲]

گسترده‌ی بام سبز، نتایج امیدوارکننده‌ای برای مدیریت رواناب در نواحی متراکم شهری ستول ارائه می‌کند.

عملکرد مدیریت رواناب بام سبز تحت انواع مختلف بام سبز و شرایط آب‌وهوایی متفاوت است.^[۵۸] نتایج نگهداشت رواناب بام‌های سبز به سن بام سبز هم بستگی دارد.^[۵۵] مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بام‌های سبز قدیمی‌تر می‌توانند رواناب بارش بیشتری را در مقایسه با بام سبز جدید نگه دارند.^[۵۵] انتخاب عمق محیط خاک بام سبز، عامل بسیار مهمی در کاهش دبی اوج است.^[۵۷]

۲.۳. طراحی و اجرای اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر

یکی از مسائل مهم در بکارگیری روش‌های توسعه‌ی کم اثر، تعیین مکان‌های مناسب برای احداث آن‌ها با توجه به معیارهای مختلف است. محل اجرای روش‌های توسعه‌ی کم اثر در میزان دبی اوج و حجم جریان تأثیرگذار است و احداث آن‌ها در مکان‌های نامناسب می‌تواند منجر به بدتر شدن شرایط دفع سیلاب شود.^[۱۹] با توجه به وجود انواع اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر و مکان‌های بالقوه‌ی طراحی، فرآیند انتخاب انواع مناسب روش‌های توسعه‌ی کم اثر، در شرایط مکانی متفاوت پیچیده است. از طرف دیگر، بودجه‌ی محدود، تعیین یک راه‌حل توافقی برای هماهنگی بین توسعه و حفاظت از منابع را ایجاب می‌کند. بنابراین، فرآیند اخیر نیازمند اطلاعات ورودی زیاد و معیارهای متعدد برای تصمیم‌گیری است. زمانی که بیش از یک معیار تصمیم‌گیری دخیل باشد، تصمیم‌گیری ضرورتاً یک تصمیم‌گیری چندمعیار (MCDM)^{۲۶} خواهد شد. حتی، تعیین طرح ایده‌آل یا نزدیک به ایده‌آل در مورد یک نوع از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، نیازمند در نظر گرفتن بیش از ۱۲ پارامتر است.^[۵۹] لذا ضروری است به منظور ارائه‌ی برنامه‌ی مدیریت رواناب در حوضه‌های آبخیز شهری برای انتخاب مناسب‌ترین نوع، مکان، و ترکیبی از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، مجموعه‌ای از معیارهای دخیل مدنظر قرار گیرند.

۴. تجارب جهانی در استفاده از رویکردهای نوین مدیریت رواناب شهری

در سال‌های گذشته، پذیرش فناوری و شیوه‌های غیرمتمرکز مدیریت رواناب شهرها، به ویژه زیرساخت‌های سبز افزایش پیدا کرده است؛ که از جمله‌ی عوامل مؤثر در آن، مزایای تأمین منابع و حفاظت محیط‌زیست و از سوی دیگر، صرفه‌جویی در هزینه‌های کلان احداث زیرساخت‌های سنتی کنترل رواناب در شهرهاست. سایر عوامل مؤثر در افزایش اقبال به مدیریت غیرمتمرکز رواناب، شامل کاهش خسارت‌های ناشی از رواناب، بهبود کیفیت هوا، و بهبود زیبایی‌شناختی شهری است.^[۶۰]

حامیان محیط‌زیست، راهکارهایی را برای تشویق و حمایت از زیرساخت‌های سبز پیشنهاد کرده‌اند، که از آن جمله می‌توان به تصویب قوانینی برای کمک به اجرای پروژه‌ها و کمک به ایجاد پایگاه اطلاعاتی در مورد نحوه‌ی اجرا و صرفه‌ی اقتصادی اشاره کرد. با وجود این، برخی از مهندسان مشاور و مدیران شهری، انتقادهایی را در مورد ریسک و عدم اطمینان در مورد هزینه و امکان دستیابی به اهداف کیفیت آب مطرح کرده‌اند. در مقابل، مدافعان این استدلال را مطرح می‌کنند که بدون تأمین مالی برای اقدام‌های زیرساخت سبز، آسیب‌های اقتصادی و آثار کیفیت آب ناشی از رواناب پرهزینه‌تر از حمایت از چنین اقدام‌هایی خواهد بود.^[۶۰]

برنامه‌ریزان باید بین استفاده از یک تالاب مصنوعی برای مدیریت رواناب و انحراف رواناب به یک تالاب طبیعی تفاوت قائل باشند؛ آن‌ها باید از انحراف رواناب به تالاب طبیعی جلوگیری کنند، چون تغییر هیدرولوژی یک تالاب طبیعی می‌تواند به نوبه‌ی خود به اکوسیستم طبیعی آسیب وارد کند.

۳.۱.۱. بام سبز

بام سبز (شکل ۱۱)، سامانه‌ی چندلایه‌ای است که سقف و بالکن یک ساختمان را با پوشش گیاهی می‌پوشاند و با جذب و نگهداری بخشی از حجم باران و با استفاده از فرآیندهای تبخیر-عرق و تصفیه، حجم و دبی اوج رواناب را کاهش می‌دهد. بنابراین، می‌تواند خطر مشکلات سیل‌گرفتنی ناگهانی در نواحی شهری را کاهش دهد.^[۵۳] مطالعات پیشین، عملکرد بام‌های سبز در زمینه‌ی کاهش حجم رواناب و تأخیر دبی اوج را در مقایسه با بام‌های مرسوم گزارش کرده‌اند.^[۵۴] علاوه بر این، بام سبز موجب بهبود کیفیت آب‌وهوا، حفظ زیبایی شهر، و جلوگیری از اتلاف انرژی ساختمان می‌شود.^[۵۴] بام‌های سبز را می‌توان برای بسیاری از مناطق، از جمله خانه‌های مسکونی و آپارتمان‌ها، تأسیسات صنعتی، ساختمان‌های تجاری، و گاراژها طراحی کرد. با وجود این، عواملی نظیر ظرفیت باربری سقف، مقاومت غشاء سقف برای نفوذ رطوبت و ریشه، وزش باد، و شکل و شیب سقف باید قبل از آن در نظر گرفته شوند.

هزینه‌ی بالاتر نسبت به بام‌های سنتی، مناسب‌نبودن برای بام با شیب تند (بیش از ۲۵ تا ۳۰ درجه از قبیل سوله‌های صنعتی)، نیاز به مراقبت و نگهداری از پوشش گیاهی، تقویت سازه‌ی سقف، امکان نفوذ آب به داخل سقف در صورت آسیب و عدم اجرای مناسب و نیاز به آبیاری زیاد در زمان رشد و جوانه‌زدن گیاه از معایب سامانه‌ی بام سبز هستند.^{[۱۷] و [۱۸]}

اگرچه بام‌های سبز گران هستند، اما در طی ۳۰ سال گذشته، به دلیل مزایایشان، در بیشتر کشورهای توسعه‌یافته، مانند آلمان، استرالیا، سوئیس، اتریش، ایالات متحده‌ی آمریکا، ژاپن، سنگاپور، و کره‌ی جنوبی، محبوب‌تر شده‌اند.^{[۵۶] و [۵۷]} از آنجا که در نواحی شهری توسعه‌یافته، مساحت سطح بام ۴۰ تا ۵۰ درصد همه‌ی سطوح نفودناپذیر کل را تشکیل می‌دهد، بام سبز روش مؤثری در کاهش رواناب و دبی اوج در نواحی شهری در نظر گرفته می‌شود.^[۵۷] شفیق^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۵۷] بر روی عملکرد بام‌های سبز در ستول (کره‌ی جنوبی) بیان اظهار کرده‌اند که نگهداشت رواناب بر روی بام‌های سبز غالباً به شدت و مدت رخدادهای بارندگی بستگی دارد، که مقدار میانگین آن در شهر ستول بین ۱۰ تا ۶۰ درصد در رخدادهای بارش، متفاوت بوده است. ایشان دریافته‌اند که کاربرد



شکل ۱۱. بام سبز.^[۵۶]

افزایش می‌دهد. سایر مزایای طرح زیرساخت سبز: دمای خنک‌تر شهری، کیفیت هوای بهتر، فضای سبز بیشتر، صورت حساب‌های انرژی کمتر، ارزش ملک بالاتر، و کاهش سرریز فاضلاب ترکیبی هستند.^[۶۲]

علاوه بر تجربیات عملیاتی ایالات متحده، مطالعات پژوهشی زیادی نیز انجام شده است.^[۶۳] طبق نتایج مطالعات اخیر، تصفیه‌ی اولین رواناب، که غلظت بیشتری از آلاینده دارد، سیاست مدیریتی بهتری نسبت به تصفیه‌ی کل رواناب پس از پیوستن به آب‌های سطحی است. این موضوع به این دلیل بیان می‌شود که عامل اصلی هزینه‌ی تصفیه، حجم آب است (نه غلظت آلاینده) و همچنین، بازده حذف در غلظت‌های بالاتر بیشتر است.^[۶۳]

۲.۴. کانادا

کانادا در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ شروع به توسعه‌ی برنامه‌ریزی سیلاب، شامل حوضچه‌های نگهداشت بر روی آبروی کنار جاده و سیستم‌های لوله‌کشی کرده است.^[۶۴] در سال ۱۹۹۲، استان بریتیش کلمبیا کتاب راهنمای برنامه‌ریزی سیلاب را تهیه کرد، که تشخیص داد حوضچه‌های نگهداشت می‌توانند سیل را کاهش دهند؛ اما معمولاً از فرسایش مداوم کانال، که آثار نامطلوب در اموال و ماهیگیری ایجاد می‌کند، جلوگیری نمی‌کنند. راه‌حل‌های نگهداشت نیز اغلب اجازه نمی‌دهند جریان پایه‌ی پایدار، که از نظر اکولوژیکی در ماه‌های خشک حیاتی است، جریان داشته باشد.

در سال ۲۰۰۳، کتابچه‌ی راهنمای برنامه‌ریزی و طراحی مدیریت توسعه‌ی کم اثر رواناب و سیلاب منتشر شده است؛^[۶۵] که در آن، بر فرصت‌های نفوذ در مقیاس محلی تمرکز و تشخیص داده شده است که در راه‌حل‌های مدیریت سیلاب باید شرایط خاص محلی را در نظر بگیرند. هدف نهایی توسعه‌ی کم اثر، حفظ شرایط هیدرولوژیک طبیعی یا پیش از توسعه و کمینه‌ساختن حجم رواناب تولیدشده در منطقه (به‌عنوان مثال، محله، بخش فرعی، یا قطعه‌ی فردی) تعریف شده است. کاهش رواناب به‌صورت کاهش حجم کل رواناب از طریق نگهداری آب توسط تاج درختان، تبخیر، برداشت آب باران، و تبخیر-تعرق رواناب تعریف می‌شود. روش توسعه‌ی کم اثر در راهنمای مذکور، شامل مجموعه‌ای از راهبردهای طراحی سایت است، که رواناب را با روش‌های سازه‌ای توزیع‌شده در مقیاس کوچک، از طریق فرآیندهای نفوذ، تبخیر-تعرق، برداشت، فیلتراسیون، و نگهداشت رواناب به میزان کمینه می‌رساند. همچنین در آن، تعدادی سازه‌ی توسعه‌ی کم اثر پیشنهاد شده است، که در تعدادی از آن‌ها فضایی برای ذخیره‌ی برف نیز فراهم شده است. سازه‌ها برای مقاومت در برابر شرایط آب‌وهوای سرد در منطقه، مقاومت در برابر شرایط یخ‌زدگی و ذوب‌شدن، و در صورت امکان بهبود کیفیت رواناب ذوب برف سازگار شده‌اند. نگرانی‌هایی وجود دارد که در آب‌وهوای سرد، که زمین می‌تواند یخ‌زده باشد، با نفوذپذیری ضعیف بستر و نرخ رشد بیولوژیکی پایین، که همزمان با جریان‌های زیاد ناشی از ذوب برف‌های بعدی است، روش‌های توسعه‌ی کم اثر ممکن است کمتر مؤثر باشند. با وجود این، روسین^{۲۸} و همکاران (۲۰۰۹)،^[۶۶] نشان داده‌اند در حالی که آثار ناشی از آب‌وهوای سرد مشاهده شده است، اما آن‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای راندمان هیدرولیکی روش‌های توسعه‌ی کم اثر را تغییر ندادند.

۳.۴. فرانسه

به‌دلیل تنوع رویدادهای سیل در اروپا، انعطاف‌پذیری زیادی در اهداف و اقدامات به دولت‌های اروپایی واگذار می‌شود.^[۶۷] به‌عنوان مثال، در پاریس، روش ارسال

تحوالاتی که طی نیم قرن گذشته در دیدگاه‌های مرتبط با مدیریت آب‌های سطحی رخ داده است، تحقیقات و بررسی‌های بین‌المللی درباره‌ی این دیدگاه‌ها و جمع‌بندی اقدامات و تجارب کاربردی در مناطق مختلف جهان، در مجموع حاکی از آن است که شرایط و امکانات، محدودیت‌ها، و الزامات محلی می‌باید در جذب و بومی‌سازی دیدگاه‌های نوین در نظر گرفته شوند.^[۶۸] در ادامه، تجربه‌های چند کشور از قاره‌های مختلف، با ویژگی‌های مختلف محیطی به‌طور مختصر ارائه شده‌اند.

۱.۴. ایالات متحده‌ی آمریکا

به‌نظر می‌رسد اولین استفاده از رویکردهای توسعه‌ی کم اثر در ایالات متحده، با معرفی قانون آب پاک فدرال ایالات‌متحده در سال ۱۹۷۲ توسعه یافته است.^[۶۹] رویکردهای توسعه‌ی کم اثر، اولین بار در سال ۱۹۹۳ در ناحیه‌ی پرینس جورج ایالت مریلند آمریکا، به‌عنوان روشی برای کاهش آثار منفی شهرنشینی و نفوذناپذیری سطوح بیان شده است.^[۶۹] اصطلاح بهترین شیوه‌های مدیریت (BMPs)، سپس برای پرداختن به مسائل آلودگی استفاده شده است.

در ایالات متحده، رویکردهای توسعه‌ی کم اثر توسط هر ایالت با تنوع زیاد اجرا و مدیریت می‌شود. برای کمک به متخصصان برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده، وبسایت مخصوصی برای ابزارهای طراحی شهری رویکردهای توسعه‌ی کم اثر فراهم ساخته است.^[۶۹]

کوپلند^{۲۷} (۲۰۱۶)،^[۷۰] کارشناس منابع و سیاست‌های محیط‌زیستی، در گزارشی با عنوان زیرساخت سبز و مسائل مربوط به مدیریت رواناب شهری (متعلق به خدمات تحقیقات کنگره‌ی ایالات متحده)، مانع اصلی بر سر راه توسعه‌ی زیرساخت‌های ذکرشده را کمبود بودجه بیان کرده است. برای رفع این مشکل بسیاری از شهرداری‌ها در ایالات متحده سعی می‌کنند با ارائه‌ی مشوق‌ها، شهروندان و مالکان خانه‌ها را تشویق کنند تا از زیرساخت‌های سبز استفاده کنند؛ متداول‌ترین نوع مکانیسم‌های تشویقی محلی، عبارت‌اند از: تخفیف یا اعطای اعتبار در تأمین هزینه‌ها، تخفیف یا تأمین مالی در نصب روش‌های خاص، و اعطای جایزه و تقدیر. برنامه‌ی مجوز سبز شیکاگو، مجوزها را برای پروژه‌هایی که معیارهای طراحی خاصی، شامل شیوه‌های مدیریت بهتر رواناب را در نظر می‌گیرند، سریع‌تر بررسی می‌کند. طرح پاداش نسبت مساحت در پورتلند، مساحت مجاز احداث بنای ساختمان را در ازاء افزودن بام سبز افزایش می‌دهد. برخی از شهرداری‌ها برای هزینه‌ی بشکه‌های باران، کاشت گیاهان، و سایر موادی که می‌توانند برای کنترل رواناب استفاده شوند، یارانه می‌دهند.

شهر نیویورک، متراکم‌ترین شهر در ایالات‌متحده، از طریق وزارت حفاظت از محیط‌زیست، به تغییر رویکرد مدیریت رواناب تحت برنامه‌ی راهبردی حفاظتی ۱۴-۲۰۱۱ روی آورده است؛ که هدف آن، پیشینه‌سازی زیرساخت‌های سبز و کاهش رواناب از مناطق توسعه‌یافته‌ی موجود و جدید است. برای دستیابی به هدف مذکور، برنامه‌ریزی شده است که در طی ۲۰ سال آینده به‌تدریج تمهیداتی برای جمع‌آوری ۲۵ میلی‌متر اول بارندگی در ۱۰٪ از مناطق غیرقابل‌نفوذ ایجاد شود. طرح زیرساخت سبز سرمایه‌گذاری عمومی و خصوصی را در زمینه‌ی جوی‌باغچه‌ها، بام‌های سبز، و سایر تمهیدات کنترل در منشأ

نگهداری نیاز به همکاری بین سازمان‌های دولتی محلی، مالکان ساختمان‌ها، و مقام‌های راه‌ها را برجسته می‌کند.^[۷۳]

۶.۴. تایوان

کشور تایوان اهمیت یک رویکرد کاملاً خاص مبتنی بر "طراحی شهری حساس به آب" (WSUD) را مطرح کرده است.^[۷۴] توپوگرافی ساحل شرقی جزیره تایوان، تپه‌ای تا کوهستانی با رودخانه‌های کوتاه و جریان موسمی است، که به سمت ساحل غربی تخلیه می‌شوند. بیشتر شهرهای تایوان بر روی دشت‌ها و دلتاها ساخته شده‌اند. به‌عنوان مثال، هسینچو^{۲۹}، یک شهر به‌سرعت در حال رشد است، که هم از خشکسالی و هم از سیل رنج می‌برد.^[۷۴] مدیریت آب پایدار در شهر هسینچو، مستلزم ادغام شبکه‌ای از آب‌های زیرزمینی و سطحی روباز، برای حفظ و ذخیره‌ی آب باران در مناطق توسعه‌ی شهری جدید، مانند دشت‌های روانابی و زمین‌های کشاورزی موجود است. مناطقی که به‌عنوان دشت‌های روانابی در طول رویدادهای بارش شدید، که در گذشته رخ داده‌اند، شاید فقط یک‌بار در ۱۰۰ سال عمل کرده‌اند. اما، به احتمال زیاد، به‌دلیل آثار تغییرات آب‌وهوایی، برای اهداف کشاورزی محفوظ و مناسب‌تر خواهند شد. از دشت‌های روانابی برای توسعه‌ی شهری نمی‌توان استفاده کرد، اما، مکان‌های مناسبی برای نگهداشت و نفوذ رواناب در فصل مرطوب و در فصل خشک، نیز، برای اهداف کشاورزی مناسب هستند.^[۷۵]

۵. ارزیابی عملکرد رویکردهای غیرمتمرکز مدیریت رواناب

سطحی شهری

برای ارزیابی مزایای محلی در مقیاس کوچک و همچنین، آثار تجمعی اجرای صدها یا حتی هزاران رویکرد، بهترین شیوه‌ی مدیریتی (BMP) و توسعه‌ی کم اثر (LID)، در سطح یک حوضه‌ی آبریز وسیع، عوامل تأثیرگذار متنوعی نیاز به بررسی دارند. توجه به این نکته ضروری است که یک راه‌حل استاندارد منفرد در همه‌جا نمی‌تواند مؤثر باشد. عواملی مانند فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های طبیعی در مقیاس حوضه‌ی آبریز می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی از مکانی به مکان دیگر تغییر کنند. چالش اصلی پیش روی تصمیم‌گیرندگان این است که چگونه بهترین ترکیب رویکردها را برای اجرا از بین گزینه‌های زیاد موجود انتخاب کنند.^[۷۴]

مطالعات مختلف، روش‌های متنوعی برای انتخاب بهترین رویکردهای مدیریت غیرمتمرکز رواناب پیشنهاد کرده‌اند و در سال‌های اخیر، سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در مورد طراحی رویکردهای مذکور توسعه یافته است. ابزارهای مدل‌سازی به‌طور مشخص برای پشتیبانی از انتخاب و ارزیابی گزینه‌های مناسب LID/BMP لازم هستند.^[۷۴] در طول دو دهه‌ی گذشته، پیشرفت‌های عمده‌ای در ابزارهایی که مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیندهای محیطی شهری را تسهیل می‌کنند، وجود داشته است. اما نکته‌ی ضروری در مدل‌های مذکور، در نظر گرفتن چرخه‌ی آب در مدل‌سازی آب شهری است. مدل‌های آب شهری از نظر نحوه‌ی ساختار و قابلیت‌های آن‌ها برای بررسی جنبه‌های مختلف سیستم آب شهری بسیار متفاوت هستند. بنابراین، انطباق یک مدل مناسب با یک زمینه‌ی خاص برای دستیابی به اهداف مدیریت آب شهری ضروری است.^[۷۵] برای تسهیل استفاده از ابزارهای پشتیبان تصمیم توسط مدیران حوضه‌ی آبریز، ابزارهای مدل‌سازی ذکر شده باید شامل ادغام یکپارچه‌ی رابط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌های شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز، مدل‌های شبیه‌سازی

آب به خارج از شهر از طریق لوله به مدیریت آن در محل یا در سطح حوضه‌ی رودخانه، با استفاده از روش‌های جایگزین، از جمله بام‌های سبز، باغچه‌های باران‌زاد، و تالاب‌ها تغییر کرده و تشویق به صاف کردن و استفاده‌ی مجدد از آب در دستور کار قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۶، رویکردهای جایگزین چند شهر دیگر فرانسه تشریح شده‌اند.^[۶۸] در سال ۲۰۱۴، دفتر بین‌المللی آب، در لیموژ، مجموعه‌ای از «روش‌های جایگزین» ساختارهای کنترل رواناب را براساس نگهداشت و نفوذ ارائه کرده است.^[۶۹]

۴.۴. هلند

هلند مثالی است که در آن اهداف خاص اتخاذ توسعه‌ی کم اثر (LID) یا WSUD با شرایط جغرافیایی محلی تعریف می‌شود.^[۷۴] بخش اعظم هلند، شامل زمین‌های پست ساحلی است، که از دریا پس گرفته شده‌اند و سطوح آن‌ها پایین‌تر از سطح دریا قرار دارد و توسط دایک‌ها محافظت می‌شوند. با توجه به بارندگی‌هایی که مناطق شهری در حال گسترش را تهدید می‌کند، لازم است اقدام‌هایی برای مدیریت پایدارتر آب ایجاد شود. در سپتامبر ۱۹۹۸، بارندگی ۱۳۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت، باعث جاری شدن سیل شدید در بسیاری از مناطق پست هلند شد، زیرا ظرفیت زهکشی زمین‌های پست ساحلی هلند برای حذف ۱۴ میلی‌متر بارندگی در هر ۲۴ ساعت طراحی شده بود.^[۷۴] در نتیجه، نگهداری و جمع‌آوری غیرمتمرکز آب باران (به‌عنوان مثال، آب‌های نگهداری‌شده توسط بام‌های سبز یا جمع‌آوری‌شده از ساختمان‌ها و مناطق ترافیکی) و ذخیره‌ی محلی آب باران در نهرهای کنار جاده، حوضچه‌ها، دریاچه‌ها، و مخازن الزامی شده است.^[۷۰]

فقط آب اضافه بر ظرفیت نگهداشت، نفوذ و ذخیره در محل می‌تواند از پلدرها (Polders) به رودخانه‌ها یا کانال‌ها و از آنجا به دریا تخلیه شود.^[۷۴] توسعه‌های شهری جدید در دشت‌های هلند مستلزم ساخت‌وساز و ادغام اجباری رواناب روباز است، که شامل ۵ الی ۱۰ درصد از مساحت زمین‌های در حال توسعه است.^[۷۰]

۵.۴. ژاپن

ژاپن کشوری غالباً کوهستانی است. شهرهایی با تراکم بالا در مناطق کم‌ارتفاع ساخته شده‌اند و به‌طور فزاینده‌ای در معرض سیل هستند. نزدیک به ۳۰٪ از شهرهای ژاپن در گذشته، باران‌های سیل‌آسای محلی (بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت) را تجربه کرده‌اند.^[۷۴] ژاپن در سال ۱۹۷۳، استفاده از پیاده‌روهای قابل‌نفوذ را به‌عنوان رویکردی برای آنچه که به توسعه‌ی کم اثر تبدیل شده است، معرفی کرده است. در سال ۱۹۹۳، روش مذکور برای استفاده‌ی احتمالی در جاده‌های کم‌تردد گسترش یافته و از آن زمان در جاهای دیگر معرفی شده است.^[۷۴] کتابچه‌ی راهنمای تصفیه‌ی رواناب سطح جاده در سال ۲۰۰۵ منتشر شده است.^[۷۱] انجمنی صنعتی در ژاپن به منظور ارتقاء فناوری و تأسیسات ذخیره، نفوذ، و استفاده از آب باران در مقیاس حوضه‌ی رودخانه تأسیس شده است. هدف نهایی انجمن صنعتی ژاپن، دستیابی به تعادل بین کنترل سیل و استفاده از آب و حفظ محیط آبی بوده است. روش‌های تشویق‌شده شامل گودال‌هایی مرطوب با پوشش گیاهی کنار پیاده‌روهای نفوذپذیر، آسفالت‌های نفوذپذیر، جوی‌باغچه‌ها و ذخیره‌سازی و نفوذ آب باران در مجاورت جاده‌هاست.^[۷۲] هر سامانه‌ای باید حفظ و تمیز نگه داشته شود و همچنین، آلودگی حاصل از "شست‌وشوی اولیه" نیاز به توجه خاصی دارد. تعمیر و

بیشتر مدل‌های مدیریت رواناب، شامل زهکشی می‌شوند؛ اما آنچه در توسعه‌ی پایدار اهمیت دارد، استفاده از مدل‌هایی است که به رواناب به‌عنوان منبعی نگاه شود که می‌تواند جذب (تغذیه آبخوان) و یا به صورت مجدد استفاده شود.

پیچیدگی در مدل‌های رواناب از مدل‌های ساده‌ی یکپارچه تا مدل‌های توزیع‌یافته‌ی مکانی متغیر است. مدل‌های یکپارچه برای تخمین‌های اولیه‌ی رفتار حوضه‌ی آبریز مفید هستند، اما برای تحلیل هر LID کوچک‌مقیاس منفرد و آثار آن‌ها در دینامیک جریان خیلی مناسب نیستند.^[۸۰] توصیف سیستم‌های مدیریت رواناب توزیع‌یافته (برای مثال رویکردهای مختلف LID) نیاز به توصیف مکانی منطقه‌ی مورد مطالعه دارد، که به‌اندازه‌ی کافی برای رویکردهای LID منفرد دقیق باشد.^[۸۱] اگر توصیف رفتار واقعی جریان و بار آلودگی در یک LID منفرد لازم باشد، پیچیدگی بیشتر مدل نیاز خواهد بود.

مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رواناب وجود دارند.^[۸۰] از میان آن‌ها، HSPF، STORM، SUSTAIN، و SWMM از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها هستند. هلت^{۳۳} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۸۰] مقایسه‌ای بین این مدل‌ها، براساس نوع دسترسی، مقیاس زمانی مدل‌سازی، توصیف مکانی، و توصیف LID ها، انجام داده‌اند (جدول ۱۲ در نوشتار ذکر شده،^[۸۰]). براساس مقایسه‌ی انجام‌شده، دو مدل SWMM و SUSTAIN با داشتن دسترسی عمومی، توصیف مکانی توزیع‌یافته و قابلیت بررسی همه نوع LID، را می‌توان جامع‌تر از بقیه به حساب آورد.

مدل SUSTAIN، که با تلاش EPA (اژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده‌ی آمریکا) توسعه یافته است، ابزاری برای ارزیابی، انتخاب، و جایگذاری BMPها در حوضه‌ی آبخیز شهری است.^[۷۷] یکی از قابلیت‌های SUSTAIN ارزیابی رویکردهای مدیریتی در چندین مقیاس، از کاربردهای محلی تا حوضه‌ی آبخیز است.

مدل SWMM پیچیدگی کمتری نسبت به SUSTAIN دارد؛ که به‌منظور شبیه‌سازی مدیریتی و پیش‌بینی کمی و کیفی مرتبط با شبکه‌های مرکب تهیه شده است. در عین حال، از مدل SWMM، عملاً در کلیه‌ی زمینه‌های زهکشی، اعم از طراحی ساده‌ی سامانه‌ی جمع‌آوری تا تحلیل‌های پیچیده‌ی هیدرولیکی و مطالعات کیفی جریان استفاده شده است. مدل SWMM تحلیل اقتصادی نیز انجام می‌دهد و در ارزیابی و شبیه‌سازی سیستم‌های رواناب شهری عملکرد خوبی نشان داده است (برای مثال، به نوشتار فروتن‌دانش^{۳۴} (۲۰۲۱)،^[۸۲] مراجعه شود).

داده‌های موردنیاز برای مدل SWMM، بسیار گسترده و مشتمل بر داده‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها، مشخصات مربوط به سازه‌های سامانه، اطلاعات مربوط به نگهداری سامانه، شدت دبی در دوره‌های خشک، وضعیت نقاط تخلیه، آمار و اطلاعات مربوط به بارندگی، هیدروگراف‌های سیلاب‌ها، و وضعیت کیفی جریان در مسیل‌ها هستند.

در مطالعات بسیاری با استفاده از مدل SWMM به بررسی رواناب و روش‌های نوین مدیریت رواناب پرداخته شده است. برای مثال، با استفاده از مدل SWMM و تحلیل حساسیت نشان داده شده است که استفاده از سامانه‌های

بر پایه‌ی فرآیند LID/BMP، و مدل‌های بهینه‌سازی هزینه باشند.^[۷۴] از جمله روش‌های پشتیبان تصمیم‌گیری می‌توان به سیستم پشتیبان بهترین رویکرد مدیریتی بر پایه‌ی GIS (Best Management Practice Decision Support System³⁰،^[۷۶]) و همچنین، سامانه‌ی ادغام تصفیه و تجزیه و تحلیل رواناب شهری (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration³¹،^[۷۷]) اشاره کرد. هر دو روش BMPDSS و SUSTAIN، کاربردهای چندمقیاسی (سایت، منطقه، و حوضه‌ی آبخیز)، شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای BMP و شبیه‌سازی‌های بهینه‌سازی هزینه را انجام می‌دهند.

در کنار روش‌های جامع و پیچیده‌ی ذکر شده، گاهی نیاز به ابزارهای انتخاب ساده‌تری به‌عنوان ابزاری برای بررسی رویکردهای مختلف مدیریت غیرمتمرکز وجود دارد.^[۷۸] یک سامانه‌ی انتخاب چندمتغیره برای طراحی LID/BMP ایجاد کرده‌اند؛ که شاخص‌های آن شامل ۱۲ شاخص رده‌ی اول و ۲۶ شاخص رده‌ی دوم است، که بازتاب‌کننده‌ی ویژگی‌های منطقه‌ی موردنظر است. روش انتخاب به این صورت است که ابتدا به هر شاخص رده‌ی دوم، یک مقدار عددی الحاق می‌شود که براساس ویژگی‌های منطقه و اطلاعات در مورد LID/BMP است. ابتدا، شاخص‌ها، نرمال و سپس، برای تعیین رتبه‌ی هر شاخص رده‌ی اول، ادغام می‌شوند. درنهایت، LID/BMP های مناسب برای یک منطقه‌ی مشخص بر حسب رده‌ی امتیازهای نهایی انتخاب می‌شوند. آن‌ها، همچنین، برای تسهیل این سازوکار رده‌بندی، یک نرم‌افزار (به نام BMPSELEC)، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا طراحی کرده‌اند.

به‌طورکلی، برای ارزیابی رویکردهای نوین مدیریت غیرمتمرکز رواناب، در ابتدا باید هر کدام از رویکردها، دقیقاً از جهت‌های مختلف، از جمله مزایا و معایب، اصول طراحی و ساخت، و هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری بررسی شوند. سپس، پارامترهای اساسی نوع و میزان آلاینده‌ی ورودی و دبی رواناب و همچنین، ویژگی‌های منطقه‌ی موردنظر برای احداث آن‌ها، از جمله: میزان تراوایی زمین، نوع کاربری مجدد رواناب، مقدار زمین موجود برای احداث سازه، و شیوه‌ی نگهداری از تأسیسات تعیین شود. درنهایت، با تلفیق اطلاعات ذکر شده و با به‌کارگیری نرم‌افزارهای مدل‌سازی، تصمیم نهایی برای انتخاب بهترین رویکرد برای منطقه‌ی موردنظر گرفته شود.

۱.۵. شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب

همان‌طور که بیان شد، برای انتخاب بهترین رویکردهای مدیریت رواناب، ابزارهای مدل‌سازی به کمک سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری می‌آیند. در واقع، در ابتدا با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی، گزینه‌های موردنظر از بین بی‌شمار حالت مختلف چیدمان رویکردهای غیرمتمرکز انتخاب می‌شوند، که هدف‌شان ایمن‌ساختن رفتار هیدرولیکی سیستم رواناب است؛ در حالی که همزمان نیز به اهداف کیفیت آب و به‌راه‌حل‌های کم‌هزینه دست یابند. اگرچه تحلیل اقتصادی بندرت در مدل‌سازی رواناب شامل می‌شود، زوپو^{۳۲} (۲۰۰۱)،^[۷۹] به چگونگی گسترش ارزیابی مدیریت رواناب در اثر ترکیب گزینه‌های مختلف تحلیل‌های اقتصادی با مدل‌سازی رواناب اشاره کرده است. در نتیجه، از هزینه‌های مختلف، از جمله: هزینه‌های طراحی، ساخت، نگهداری، جایگزینی، دفع و تملک زمین، تشخیص و کمی‌سازی می‌شوند.^[۸۰] تقریباً،

³³ Holt

³⁴ ForutanDanesh

³⁰ BMPDSS

³¹ SUSTAIN

³² Zoppou

بررسی کرده و دریافته است که سناریوی ترکیبی، بهترین کارآمدی را در کاهش آلودگی و دبی اوج رواناب، و سناریوی بام سبز کمترین بازده را در کاهش آلودگی داشته‌اند.

برای بخشی از منطقه‌ی ۱۳ شهر تهران، تحلیل آب‌گرفتگی معابر شهری و کارایی وضع موجود شبکه، به کمک مدل SWMM انجام شده است.^[۸۹] با مقایسه‌ی نتایج حاصل از اجرای مدل در وضع موجود و با به کارگیری LID نشان داده شده است که به کارگیری رویکردهای نوین، می‌تواند آثار منفی سیلاب‌های با دوره‌ی بازگشت کوچک را تا حدود ۴۰٪ کاهش دهد.

با هدف کاهش آب‌گرفتگی و استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، به مدیریت سیلاب شهری در قسمتی از منطقه‌ی ۲ شهرداری تبریز با استفاده از نرم‌افزار SWMM پرداخته شده است.^[۸۵] در پژوهش حاضر، تأثیر ترانشه‌ی نفوذ و روسازی متخلخل در دبی اوج سیلاب ارزیابی شده و نتایج نشان داده است که استفاده از ترانشه‌ی نفوذ به عنوان بهترین راهکار مدیریتی، بیشترین اثر را در کاهش دبی اوج هیدروگراف سیل خروجی داشته است. آرژانکی^{۳۶} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۹۰] با استفاده از مدل SWMM و اعمال رویکردهای مدیریتی مختلف، بهترین راهکار را برای کاهش مقدار اوج رواناب در شهرکرد شناسایی کرده و دریافته‌اند که مدل‌سازی مذکور مزایای بهره‌گیری از مدیریت سبز را تأیید می‌کند. نظری و همکاران (۲۰۲۳)،^[۹۱] از چارچوب ترکیبی SWMM، SUSTAIN، و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای بهینه‌سازی ویژگی‌ها، هزینه‌ها، و مؤثر بودن LID ها استفاده کرده‌اند.

در بخش دانشگاهی نیز، پایان‌نامه‌های زیادی در زمینه‌ی مدیریت رواناب سطحی انجام شده است، که در ادامه به چند مورد از جدیدترین آن‌ها اشاره شده است.

نعیمی (۱۳۹۴)،^[۹۲] در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود با بررسی بهترین شیوه‌های مدیریتی رواناب سطحی در سطح شهر، مناسب‌ترین روش‌ها را با توجه به عملکرد آن‌ها در جهت حفظ و تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی و نیز سازگاری با کلان‌شهر اصفهان، انتخاب و پس از آن با جمع‌آوری داده‌های بلندمدت بارش و برخی مشخصات حوضه، اقدام به مدل‌سازی رواناب سطحی کرده و دریافته است که با تغذیه‌ی رواناب‌ها به آب زیرزمینی، در صورت استفاده از شیوه‌های مدیریتی نوین، علاوه بر کمک به چرخه‌ی طبیعی هیدرولوژیکی، به دلیل پراکندگی و مقیاس کوچک‌تر نسبت به شیوه‌های مرسوم، ابعاد تأسیسات هیدرولوژیکی جمع‌آوری آب‌های سطحی کوچک‌تر می‌شود و بدین ترتیب، بهره‌برداری از آن‌ها ساده‌تر و اقتصادی‌تر خواهد بود.

ولی‌پور (۲۰۱۸)،^[۹۳] در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود به طراحی روسازی نفوذپذیر و مدیریت رواناب شهری در شهر خرم‌آباد پرداخته و با مدل‌سازی حجم رواناب سطحی و ارزیابی خروجی‌ها، راهکارهای متفاوتی در زمینه‌ی روسازی نفوذپذیر و جذب رواناب‌ها ارائه کرده است.

فروتن‌دانش (۲۰۲۱)،^[۸۲] در پایان‌نامه‌ی دکترای خود به ارزیابی آثار اجرای روش‌های توسعه‌ی کم اثر و بهترین رویکردهای مدیریتی بر کمیت و کیفیت رواناب شهری در شهر گرگان پرداخته و بیان کرده است که نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM نشان می‌دهد که مدل مذکور، دقت موردنیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد.

رو باز برای کاهش مقدار دبی اوج رواناب و جلوگیری از سیلاب، تأثیر بیشتری نسبت به سامانه‌های بسته دارد.^[۸۳] در مطالعه‌ی کیم^{۳۵} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۸۴] روش‌های توسعه‌ی کم اثر در منطقه‌ی صنعتی Cheongju در کره‌ی جنوبی بررسی و انواع LID با استفاده از مدل بارش- رواناب SWMM ارزیابی شده‌اند. نتایج ایشان نشان داده است که همه‌ی روش‌های LID مطالعه‌شده، عملکرد مناسبی برای کاهش رواناب داشته‌اند، با این حال، روش بشکه‌های باران، کمترین اثر را داشته‌اند.

۶. تجارب ایران در به کارگیری مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری

با توجه به پذیرش جهانی رویکرد غیرمتمرکز مدیریت رواناب سطحی شهری و اهمیت آن در دستیابی به توسعه‌ی پایدار در کلان‌شهرها، رویکردهای مذکور و تجارب جهانی آن‌ها، در ایران نیز مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان کنترل رواناب سطحی شهری قرار گرفته‌اند. برای نمونه، به بررسی این موضوع در طرح جامع آب‌های سطحی شهرداری تهران و همچنین، در گزارش‌های تهیه‌شده در سطوح دانشگاهی می‌توان اشاره کرد. در همین راستا، مطالعاتی در زمینه‌ی مدل‌سازی رویکردهای غیرمتمرکز مدیریت رواناب سطحی شهری در فاز پژوهشی/ آزمایشگاهی در کشور انجام شده است (برای مثال، به نوشتارهای ۸۵ الی ۸۷ مراجعه شود.^[۸۷-۸۵] برای نمونه، کمالی و همکاران (۲۰۱۲)،^[۸۵] کارایی یک روسازی نفوذپذیر را تحت بارگذاری رسوب در شهر تهران، در طول عمر عملیات روسازی، آزمایش و ارزیابی کرده‌اند. علاوه بر این، عملکرد روسازی‌های نفوذپذیر را در حذف کل جامدات معلق (TSS) و آلاینده‌های انتخابی مواد مغذی (مانند: $N-NO_3^-$ ، $N-NH_4^+$ و $P-PO_4-3$) از رواناب سطحی بررسی کرده و دریافته‌اند که در هدایت هیدرولیکی روسازی نفوذپذیر، ۲۰٪ کاهش پس از سه سال هیدرولوژیکی رخ داده و روسازی‌های نفوذپذیر به ترتیب ۱۰۰، ۲۳، و ۵۹ درصد بازده در حذف رسوب (TSS)، حذف $P-PO_4-3$ و $N-NH_4^+$ در طول کل مطالعه داشته است.

همچنین، با استفاده از روش‌های نوین مدیریتی، شامل: ترانشه‌های نفوذ، باغچه‌ی باران‌زاد، و روسازی‌های نفوذپذیر و با استفاده از مدل‌سازی در SWMM، به مدیریت خطرپذیری سیلاب شهری در منطقه‌ی ۲۲ تهران پرداخته شده است.^[۸۶] براساس نتایج مدل‌سازی، باغچه‌ی باران‌زاد ۱۰٪ بیشتر از ترانشه‌های نفوذ و ۲۱٪ بیشتر از روسازی‌های نفوذپذیر در کاهش دبی اوج تأثیرگذار بوده و استفاده‌ی بهینه از ترکیب سه روش نوین ذکرشده، منجر به کاهش قابل‌ملاحظه و مؤثر دبی اوج شده است.

تأثیر به کارگیری رویکردهای جوی‌باغچه و روسازی نفوذپذیر در کاهش بار آلودگی رواناب در بخشی از منطقه‌ی ۱۰ تهران، توسط بینش و همکاران (۲۰۱۵)،^[۸۸] بررسی شده است. براساس نتایج آن‌ها، روسازی نفوذپذیر عملکرد بهتری در کاهش دبی اوج سیلاب و حذف آلودگی و جوی‌باغچه کارایی مناسب‌تری در کاهش زمان فروکش سیلاب داشته است؛ اما در کل، ترکیب دو راهکار مدیریتی اخیر، بهترین گزینه در بیشتر سناریوها تشخیص داده شده است. رجب‌زاد (۲۰۱۷)،^[۸۷] با مدل‌سازی در نرم‌افزار SWMM، رویکردهای نوین مدیریت رواناب شهری (LID/BMP) را، از نظر کارآمدی کیفی و کمی رواناب، با استفاده از سناریوهای بام سبز، ترانشه‌ی نفوذ، روکش نفوذپذیر، و سناریوی ترکیبی (روکش نفوذپذیر به همراه ترانشه‌ی نفوذ)، در پردیسان قم

از آن‌ها (مانند حوضچه‌های ذخیره و نگهداشت موقت یا دائمی سیلاب) در کاهش حجم یا دبی اوج رواناب و در نتیجه، کاهش بار هیدرولوژیک شبکه و کاهش ابعاد سامانه‌ی زهکشی مؤثر هستند.

بررسی تجربیات جهانی در این زمینه نشان می‌دهد که به‌طور کلی، هیچ‌یک از بهترین راهکارهای مدیریتی و یا رویکردهای توسعه‌ی کم اثر نمی‌توانند به‌تنهایی تمام اهداف مدیریت رواناب را برآورده کنند و اجرای ترکیبی آن‌ها به نتایج بهتری در مدیریت رواناب شهری منجر خواهد شد. بررسی سناریوهای مختلف ترکیب روش‌های توسعه‌ی کم اثر با استفاده از مدل‌سازی، برای انتخاب مؤثرترین و اقتصادی‌ترین سناریو با توجه به ویژگی‌های منطقه‌ی مطالعاتی ضروری است. روش‌های SWMM و SUSTAIN از جمله روش‌های مدل‌سازی پرکاربرد در این زمینه هستند.

با مطالعات بر روی تجارب مطالعاتی و عملی کشورهای پیشرو، امکان‌سنجی کاربست رویکردهای اخیر در کلان‌شهرهای کشور و شرایط بهینه‌ی اجرای هر کدام از آن‌ها تعیین می‌شود. تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان مدیریت شهری می‌توانند از نتایج پژوهش حاضر در جهت به‌کارگیری رویکردهای مذکور در شهرهای ایران، به خصوص کلان‌شهر تهران بهره‌برداری کنند.

درنهایت، استفاده از انواع روش‌های LID و BMP در هر منطقه باید مبتنی بر رعایت کلیه‌ی اصول و ضوابط فنی مرتبط با طراحی، اجرا، نگهداری، و بهره‌برداری از آن‌ها باشد. در این زمینه بررسی دستورالعمل‌های مناطق مختلف جهان می‌تواند کمک‌کننده باشد؛ اما، بررسی‌های بومی و محلی برای ارزیابی کارایی رویکردهای موردبحث، به ویژه از نظر کاهش انواع آلاینده‌های موجود در رواناب ورودی به تأسیسات باید انجام پذیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

پژوهش حاضر، نتیجه‌ی پروژه‌ی تحقیقاتی مصوب مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران با شماره‌ی ۱۳۷/۳۹۲۸۹۹ است. از مدیران و کارشناسان محترم این مرکز کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

احمدی (۲۰۲۳)،^[۹۴] در پایان‌نامه‌ی خود از الگوریتم فراابتکاری برای بهینه‌سازی مدیریت کمی و کیفی رواناب در غرب شهر مشهد استفاده کرده و دریافته است که با انتخاب نوع، اندازه، و موقعیت LID های بهینه، سیلاب ناشی از بارش‌های با دوره‌ی بازگشت ۵۰ ساله مهار خواهد شد و پس از تصفیه، جهت استفاده‌های آبی ذخیره می‌شود.

به غیر از مطالعات پژوهشی و آزمایشگاهی، تاکنون در ایران پروژه‌ی عملیات گسترده درخصوص پیاده‌سازی رویکردهای مدیریت غیر متمرکز رواناب سطحی شهری اجرا نشده است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

توسعه‌ی ساختاری برای مدیریت بهینه و غیرمتمرکز رواناب‌های شهری، علاوه بر درنظرگرفتن کاهش خسارت‌های وارد به سامانه در شرایط سیلابی، امکان بهینه‌سازی پتانسیل ذخیره‌ی منابع مذکور، از طریق نفوذ و تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی را نیز با درنظرگرفتن پارامترهای کیفی فراهم می‌کند. همچنین، با کاهش میزان رواناب خروجی از حوضه و افزایش میزان نگهداشت آن درون حوضه می‌توان از رواناب بازیافتی در مصارف غیرشرب استفاده کرد. این اقدام موجب می‌شود بخش زیادی از چاه‌های آب از چرخه‌ی تأمین آب فضای سبز و خدمات عمومی شهری منطقه حذف شوند. هدف اصلی استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر و زیرساخت‌های سبز مدیریت رواناب شهری، کاهش تخریب‌های محیط‌زیستی در مناطق شهری است. اقدام‌های ذکرشده، کنترل‌کننده‌های هیدرولوژیکی کوچک‌مقیاس را برای بازگردانی حوضه‌ی آبخیز به رژیم هیدرولوژیکی قبل از توسعه (به واسطه‌ی نفوذ، تصفیه، ذخیره، تبخیر، و نگهداشت رواناب در نزدیکی به منبع تولید آن) شامل می‌شوند. در واقع، اقدام‌های توسعه‌ی کم‌اثر می‌توانند باعث میرایی آلودگی، کاهش حجم جریان، و کاهش دبی اوج شوند.

در پژوهش حاضر، با معرفی هریک از روش‌های نوین مدیریت رواناب‌های سطحی، از جمله بام سبز، جوی‌باغچه‌ها، تالاب‌های مصنوعی، و روسازی نفوذپذیر، به مزایا و معایب هر یک از روش‌های مذکور اشاره و شرایط استفاده از آن‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

مروری بر روش‌های مختلف توسعه‌ی کم اثر در زمینه‌ی مدیریت رواناب شهری نشان می‌دهد که هر کدام از روش‌های اخیر، آثار متفاوتی در رواناب دارند. برخی

References- منابع

1. Pakbaz, H. and Pirmoradian, M., 2012. Investigation on the quality of rainfall-induced runoffs in watersheds. Proceedings of the First Conference on Iran's Reservoirs [In Persian]. https://ircsa.ir/files/site1/maghalate_hamayesh/50.pdf
2. Ardeshtir, A., 2016. Management of surface water collection system and urban flood control. AmirKabir University of Technology Publications, First Edition, page 230 [In Persian]. <http://publication.aut.ac.ir/fa/book/show/5192>
3. Wang, Y., 2015. A diagnostic decision support system for selecting best management practices in urban/suburban watersheds. Ph.D. thesis, University of Maryland, 301 P.
4. Helmrigh, A., Markolf, S., Li, R., Carvalhaes, T., Kim, Y., Bondank, E., Natarajan, M., Ahmad, N. and Chester, M., 2021. Centralization and decentralization for resilient infrastructure and complexity. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 1(2), p. 021001. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac0a4f>

5. Taylor, A. and Wong, T., 2002. Non-structural stormwater quality best management practices – an Overview of their use, value, cost and evaluation. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Technical Report 02/11.
6. NZWERF, 2004. On-site stormwater management guideline. *New Zealand Water Environment Research Foundation*.
7. Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S. and Viklander, M. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), pp. 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
8. Seo, M., Jaber, F., Srinivasan, R. and Jeong, J., 2017. Evaluating the Impact of Low Impact Development (LID) Practices on Water Quantity and Quality under Different Development Designs Using SWAT. *Water*, 9(3), p. 193. <https://doi.org/10.3390/w9030193>
9. Michael, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S.B. and Djordjevic, S., 2004. Potential and limitations of LID modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), pp. 284-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014>
10. Chen, J., Liu, Y., Gitau, M. W., Engel, B. A., Flanagan, D.C. and Harbor, J. M., 2019. Evaluation of the effectiveness of green infrastructure on hydrology and water quality in a combined sewer overflow community. *Science of the Total Environment*, 665, pp. 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.416>
11. Reid, M., 1982. Lessons of history in the design and acceptance of rainwater cistern systems. In: Proceedings of the International Conference on Rainwater Catchment Systems, F.N. Fujimura (Editor). International Rainwater Catchment Systems Association, Honolulu, Hawaii, pp. 1-8.
12. Glendenning, C.J. and Vervoort, R.W., 2010. Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 1: Field-Scale Impacts. *Agricultural Water Management* 98(2), pp. 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003>
13. Herrmann T. and Schmida, U., 1999. Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water* 1(4), pp. 307-316. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8)
14. Nolde, E., 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, 215(1-3), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.033>
15. Furumai, H., 2008. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), pp. 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.029>
16. <https://santacruzpermaculture.com/2019/06/rainwater-harvesting-tanks-cisterns/>
17. Hosseini, S. H., 2015. Utilizing low-impact development (LID) method in urban runoff management to reduce urban costs with an emphasis on tehran. International Conference on Advances in Civil Engineering, Architecture, Environmental Engineering, and Urban Management, Tehran, <https://civilica.com/doc/389566> CAECONF01_033 [In Persian].
18. Barrett, M., 2015. *International low impact development conference 2015*. American Society of Civil Engineers/ASCE. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479025>
19. Steffen J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., Burian, S. J., 2013. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities. *Journal of the American Water Resources Association*, 49 (4), pp. 810-824. <http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12038>
20. Lye, D.J., 1992. Microbiology of rainwater cistern systems: A review: (Cistern, Rainwater, Microorganisms). *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 27(8), pp.2123-2166. <https://doi.org/10.1080/10934529209375845>
21. <https://www.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2000758566/>
22. Alyaseri, I., Zhou, J., 2016. Stormwater volume reduction in combined sewer using permeable pavement: city of St. Louis. *Journal of Environmental Engineering*, 142 (4), p.04016002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001056)
23. Selbig, W.R., Buer, N. and Danz, M.E., 2019. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. *Journal of Environmental Management*. 1(251), p. 109510. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510>
24. Cheng, Y. Y., Lo, S. L., Ho, C. C., Lin, J. Y. and Yu, S. L., 2019. Field testing of porous pavement performance on runoff and temperature control in Taipei city. *Water*, 11 (12), p. 2635, <https://doi.org/10.3390/w11122635>
25. Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E. and Kim, H., 2012. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Research*, 46(20), pp. 6731-6742. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.037>
26. Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J. and Viklander, M., 2019. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment*, 669, 431-447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.072>

27. MDE, Maryland Department of the Environment, 2009. 2000 Maryland stormwater design manual Volumes I & II.
28. NHDES (New Hampshire Department of Environmental Services), 2011. Pollutant removal efficiencies for best management practices for use in pollutant loading analysis.
29. Birch, G. F., Fazeli, M. S. and Matthai, C. 2005. Efficiency of an infiltration basin in removing contaminants from urban stormwater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 101, pp. 23–38. <https://doi.org/10.1080/15730620600855894>
30. Lee, J. G., Borst, M., Brown, R. A., Rossman, L. and Simon, M. A., 2014. Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20 (5), p. 04014070. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001088)
31. [https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Infiltration Trench: Life Cycle Costs](https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Infiltration_Trench:_Life_Cycle_Costs)
32. Kratky, H., Li, Z., Chen, Y., Wang, C., Li, X. and Yu, T., 2017. A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11, pp.1-15. <http://dx.doi.org/10.1007/s11783-017-0982-y>
33. <https://www.deepproot.com/blog/blog-entries/3-questions-about-bioretention-soils-and-infiltration/>
34. Damodaram, Chandana, Marcio H. Giacomoni, C. Prakash Khedun, Hillary Holmes, Andrea Ryan, William Saour, and Emily M. Zechman, 2010. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management 1, *Journal of the American Water Resources Association*, 46(5), pp. 907-918. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x>
35. Mahab Qhods Consulting Engineering Company (2011). Comprehensive plan for surface water Management in Tehran, Volume Eight, Modern Approach (LID/BMP Techniques). Technical and Engineering Consultancy Organization of Tehran Municipality, Technical and Civil Deputy [In Persian].
36. Tang, S., Jia, Z., Xu, Q., Luo, W. and Shan, Z., 2020. Examining the first flush effect based on the relationship between concentrations and discharge rates in a rain garden inflow. *Desalination and Water Treatment*, 180, pp.174-184. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25080>
37. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, 292, p.112766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>
38. Hsieh, C. h., Davis and A. P., 2005. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 131 (11), pp. 1521–1531. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:11\(1521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1521))
39. Fassman-Beck, E., Wang, S., Simcock, R. and Liu, R., 2015. Assessing the effects of bioretention's engineered media composition and compaction on hydraulic conductivity and water holding capacity. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 1 (4), p. 04015003. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000799>
40. Hunt, W. F., Hathaway, J. M., Winston, R. J. and Jadlocki, S. J., 2010. Runoff volume reduction by a level spreader-vegetated filter strip system in suburban Charlotte, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15 (6), pp. 499–503. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000160)
41. Roy-Poirier, A., Champagne, P. and Filion, Y., 2010. Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering* 136 (9), 878–889. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227)
42. Goh, H. W., Lem, K. S., Azizan, N. A., Chang, C. K., Talei, A., Leow, C. S., Zakaria, N. A., 2019. A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics. *Environmental Science and Pollution Research*. 26 (15), pp. 14904–14919. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05041-0>
43. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, 292, p.112766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>
44. Wang, J., Chua, L. H. C. and Shanahan, P., 2017a. Evaluation of pollutant removal efficiency of a bioretention basin and implications for stormwater management in tropical cities. *Water Research and Technology*, 3(1), 78–91. <https://doi.org/10.1039/C6EW00285D>
45. <https://www.wake.gov/departments-government/water-quality-programs/watershed-management-erosion-sedimentation-control-floodplain-and-stormwater-management/stormwater-plan-review-and-permitting/stormwater-control-measures>

46. Livingston, E. H., Shaver, E., Skupien, J. J., Horner, R. R., 1997. Operation, maintenance, and management of stormwater management systems. Watershed Management Institute, Inc; August 1997. <https://stormwater.ucf.edu/wp-content/uploads/2014/09/stormwaterOMM.pdf>
47. Fortunato, C., McDonough, O. and Chambers, R., 2012. The effectiveness of dry and wet stormwater detention basins as sediment and nutrient processors. In: *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges*. pp. 1-12. [https://doi.org/10.1061/40763\(178\)98](https://doi.org/10.1061/40763(178)98)
48. Ivanovsky, A., Belles, A., Criquet, J., Dumoulin, D., Noble, P., Alary, C. and Billon, G., 2018. Assessment of the treatment efficiency of an urban stormwater pond and its impact on the natural downstream watercourse. *Journal of Environmental Management*, 226 (1), pp. 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.015>
49. Nayeb Yazdi, Scott, D., Sample, D. J. and Wang, X., 2021. Efficacy of a retention pond in treating stormwater nutrients and sediment. *Journal of Cleaner Production*, 290, p. 125787. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125787>
50. Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, Ch., Bray, R. and Shaffer, P., 2007. The SUDS manual (C697). [CIRIA. http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf](http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf)
51. Vishwakarma, S. and Dharmendra, D., 2024. Evaluating domestic wastewater treatment efficiency of field scale hybrid flow constructed wetland in series. *Pollution*, 10 (1), pp. 392-403. <https://doi.org/10.22059/POLL.2023.364339.2041>
52. https://waterprojectsonline/custom_case_study/clifton-icw-2022/
53. Shafique, M., Kim, R. and Lee, D., 2016. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15, pp. 715-719. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>
54. Morgan, S., Celik, S. and Retzlaff, W., 2012. Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering*, 139, pp. 471-478. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589)
55. Getter, K.L., Rowe, D.B. and Andresen, J.A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31, pp. 225-231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>
56. Vijayaraghavan K., 2016. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp. 740-752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
57. Shafique, M., Kim, R. and Kyung-Ho, K., 2018. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. *Sustainability*, 10, p. 584; <https://doi.org/10.3390/su10030584>
58. Stovin, V., Vesuviano, G. and Kasmin, H., 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414, pp. 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
59. Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Wong, T. and Binning, P. J., 2015. Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches. *Journal of Hydrology*, 529, pp. 1360-1372. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.047>
60. Copeland, C., 2016. Green Infrastructure and Issues in Managing Urban Stormwater. Congressional Research Service 7-5700 R43131. www.crs.gov
61. EPA, 2017. Clean Water Act Methods Update Rule for the Analysis of Effluent. U.S. Environmental Protection Agency (EPA-HQ-OW-2014-0797, FRL-9957-24-OW).
62. Marks, A. A. C., 2014. Stormwater management in Boston: to what extent are demonstration projects likely to enable citywide use of green infrastructure? (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
63. Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., 2005. Mass loading of first flush pollutants with treatment strategy simulations. *Transportation Research Record*, 1904, pp. 133-143. <https://doi.org/10.3141/1904-14>
64. Pati, A. and Sahoo, B., 2022. Effect of Low-Impact Development Scenarios on Pluvial Flood Susceptibility in a Scantily Gauged Urban-Peri-Urban Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(1), p. 05021034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002147](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002147)
65. Ontario Ministry of Environment, 2003. Stormwater Management Planning and Design Manual.
66. Roseen, R. M., Ballesterio, T. P., Houle, J. J., Avellaneda, P., Briggs, J., Fowler, G. and Wildey, R., 2009. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions. *Journal of Environmental Engineering*, 135(3), pp. 128-137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(128\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(128))
67. EU, 2016. The EU floods directive. http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/impl_em.html

68. Maigne, J., 2006. Sustainable management of 'alternative techniques' in stormwater purification. École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF - National School of Rural Water and Forestry Engineering). Centre de Montpellier, France. https://www.agroparistech.fr/IMG/doc/Version_finale_anglais_Maigne.doc
69. OIEau, 2014. Centre National de Formation aux Métiers de l'Eau (CNFME) e De nouvelles plates-formes pédagogiques dédiées à la gestion intégrée des eaux pluviales (in French). <http://www.oieau.fr/oieau/notre-actualite-et-avancement-de/article/cnfme-de-nouvelles-plates-formes?lang¼fr>
70. Schuetze, T. and Chelleri, L., 2013. Integrating decentralized rainwater management in urban planning and design: flood resilient and sustainable water management using the example of coastal cities in The Netherlands and Taiwan. *Water*, 5, pp. 593-616. <https://doi.org/10.3390/w5020593>
71. Jeong, H., Kim, H., Teodosio, B., Ramirez, R. and Ahn, J., 2015. A review of test beds and performance criteria for permeable pavements. In: Chang, et al. (Eds.), *Advances in Civil Engineering and Building Materials IV*. Taylor and Francis, London. <https://doi.org/10.1201/b18415-58>
72. ARSI, 2016. Association for rainwater storage and infiltration technology, Japan, Membership. http://arsit.or.jp/membership_list
73. Imbe, M., 2013. Stormwater treatment from the road in Japan. In: Regional Workshop on Eco-Efficient Water Infrastructure towards Sustainable Urban Development and Green Economy in Asia and the Pacific, 12-13 December 2013, Bangkok, Thailand. http://www.unescap.org/sites/default/files/3.2%20Japan_Imbe.pdf
74. Lee, J. G., Selvakumar, A., Alvi, Kh., Riverson, J., Zhen, J.X., Shoemaker, L. and Lai, F., 2012. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling and Software*, 37, pp. 6-18. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.04.011>
75. Mosleh, L. and Negahban-Azar, M., 2021. Role of models in the decision-making process in integrated urban water management: a review. *Water*, 13(9), p.1252. <https://doi.org/10.3390/w13091252>
76. Jia, H. F., Lu, Y. W., Zhen, X. and Yu, S. L., 2012. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of Beijing Olympic village. *Separation and Purification Technology*, 84, pp. 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.026>
77. Shoemaker, L., Riverson, J., Khalid, A., Zhen, J., Sabu, P. and Rafi, T., 2009. SUSTAIN, a framework for placement of best management practices in urban watersheds to protect water quality. Report EPA/600/R-09/095, USEPA, Washington, DC, USA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/sustain_complex_tools.pdf
78. Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S.L., Zhen, J.X. and Lu, Y., 2013. Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, pp. 7915-793. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3144-0>
79. Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, 16(3), pp. 195-231. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)
80. Holt, E., Koivusalo, H., Korkealaakso, J., Sillanpää, N. and Wendling, L., 2018. Filtration systems for stormwater quantity and quality management, Guideline for Finnish implementation. *VTT technical Research Centre of Finland Ltd*, p. 95.
81. Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H. and Koivusalo, H. 2014. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 512, pp. 482-497. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.013>
82. ForutanDanesh, 2021. Quantity and quality evaluation of urban runoff based on best management practices low-impact development (BMPs/LID) in gorgan. Ph.D thesis of watershed management. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University Faculty of Natural Resources, [in Persian].
83. Choi, Sumin, Seongsim Yoon, Byongju Lee, and Youngjean Choi, 2015. Evaluation of high-resolution QPE data for urban runoff analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*. 48(9), pp. 719-728. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.9.719>
84. Kim, J., Lee, J., Song, Y., Han, H. and Joo, J., 2018. Modeling the runoff reduction effect of low impact development installations in an industrial area, South Korea. *Water*, 10 (8), p. 967. <https://doi.org/10.3390/w10080967>
85. Kamali, M., Tajrishi, M. and Nazari Alavi, A., 2012. Investigation of surface runoff characteristics in Tehran. <https://civilica.com/doc/166096>. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.9.719> [In Persian].
86. Taghizadeh, S., 2017. Performance evaluation and optimization of innovative management methods (LID-BMP) in improving the quality and quantity of surface runoff in Tehran: case study of region 22. Master's Thesis, University of Qom [In Persian]. <https://sid.ir/paper/381460/fa>
87. Rajabnezhad, M., 2017. Utilizing innovative methods (LID-BMPs) in urban runoff management with a focus on pollution reduction. Master's Thesis, University of Qom [In Persian].

- <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9208bd2d9ddda5875cde861d60a7a627>
88. Binesh, 2015. Investigating the effect of applying the best management practices on the quantity and quality of urban stormwater. [Third National Conference on Flood Management and Engineering with Urban Floods Approach](#) [in Persian].
 89. Movahedinyia, M., Vali Samani, J. M. and Barakhshi, F., 2017. Investigating the effect of low-impact development (LID) rain barrel method on reducing urban flooding. *Water and Irrigation Management*, 7(1), pp. 1-16. [InPersian]
<https://doi.org/10.22059/jwim.2017.63736>
 90. Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H. and Mahabadi, N. A., 2021. Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), pp. 1-16.
<https://doi.org/10.1007/s40808-020-00870-2>
 91. Nazari, A., Roozbahani, A. and Hashemy Shahdanu, S.M., 2023. Integrated SUSTAIN-SWMM-MCDM approach for optimal selection of LID practices in urban stormwater systems. *Water Resource Management*, 37, pp. 3769-3793.
<https://doi.org/10.1007/s11269-023-03526-9>
 92. Naeimi, G., 1394. Integrated storm water and groundwater management, a case study: Isfahan metropolis. Master thesis, Isfahan Industrial University, Civil Engineering Faculty, [in Persian].
 93. Valipour, J., 2018. Designing Permeable Pavement and Urban Runoff Management (case study: Khorramabad City). Master thesis of Urban Design, Payam Noor University, East Tehran Branch [in Persian].
 94. Ahmadi, H., 2023. Optimization of runoff management using metaheuristic algorithm. Master thesis of Business Management, Mashhad University [in Persian].



Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

<https://sjce.journals.sharif.edu>



Research Note

A Review of the Physics of Debris Flows and the Significance of Employing the Unsaturated Soil Conditions in Estimating the Erosion Volume

Anahita Aghagoli and Hamed Sadeghi*

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author: (hsadeghi@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 20 February 2024

Revised: 13 May 2024

Accepted: 19 June 2024

Keywords:

Debris flow,
climate change,
landslide,
erosion,
unsaturated soil.

Abstract

Debris flows are natural disasters in mountainous regions and are formed when loose sedimentary deposits are carried by runoff and flow rapidly downslope. They are known for their high sediment concentrations and fast movements, which can cause significant casualties and damage to infrastructures. In contrast to floods and rock avalanches, where only one of the fluid or solid phases affects their dynamics, debris flows are influenced by both fluid and solid phases. In recent decades, the occurrence of these flows has increased due to climate change. Predicting and managing damages caused by these flows requires a systematic approach that involves identifying the causes, estimating the volume and distance, and assessing vulnerable areas and at-risk infrastructures. However, the interaction between solid and fluid phases gives rise to complexity in interpreting the development process. This complexity becomes even more exacerbated when it comes to employing the principles of unsaturated soil mechanics to investigate the behavior of unsaturated debris flows and the occurrence of unsaturated bed erosion. In this review paper, some of the factors influencing the behavior of debris flows, their physics, and the complex interactions between the flowing mass and the erosive bed, particularly unsaturated beds, are summarized and discussed. It is highlighted that the high mobility of the debris flows results in sudden and rapid fluctuations in stress-independent variables. These fluctuations can create regions of increased and decreased resistance, leading to localized variations in the stability of the flow. Based on the analysis of the existing literature, it can be concluded that there are limited numerical models capable of adequately capturing the instantaneous nature of debris flows. As a result, there is a strong need for the development of appropriate theoretical frameworks. Furthermore, in saturated soils, the pore pressure diffusion time decreases with increasing permeability. The pore pressure in these beds, therefore, dissipates rapidly during erosion. In contrast, the pore pressure diffusion time is longer in unsaturated beds. Consequently, with an increase in the water content, the erosion rate becomes significantly faster. This, in turn, results in a more significant flow momentum in wet beds compared to dryer ones.

Funding

The financial support provided by the Research Grant Office at Sharif University Technology by way of grants G4010902 and QB020105 is gratefully acknowledged.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

Anahita Aghagoli: Investigation, Formal Analysis, Writing – Original Draft, Visualization

Hamed Sadeghi: Conceptualization (Lead), Supervision, Writing – Review & Editing, Project Administration

...

To Cite this article:

Aghagoli, A. and Sadeghi, H. 2025. A review of the physics of debris flows and the significance of employing the unsaturated soil conditions in estimating the erosion volume, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 90-103.
<https://doi.org/10.24200/30.2024.64086.3304>



مروری بر فیزیک جریان‌های واریزه‌ای و اهمیت به‌کارگیری شرایط خاک غیراشباع در برآورد حجم فرسایش

آناهیتا آقاگلی و حامد صادقی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (hsadeghi@sharif.edu)

چکیده

جریان‌های واریزه‌ای، جریان‌های سریع مخلوط آب و توده‌های گسیخته‌شده‌ی خاک و سنگ با قدرت تخریب قابل‌توجه در مناطق کوهستانی هستند؛ که تناوب وقوع آن‌ها، به‌علت تغییرات اقلیم، افزایش یافته است. کنترل خسارت‌های جریان‌های واریزه‌ای، مستلزم پیش‌بینی مسافت طی‌شده و برآورد حجم آن‌هاست؛ اما وقوع فرسایش بستر، تغییر پیوسته‌ی حجم، و ترکیب جریان را در پی دارد. از آنجایی که بسترهای کاملاً اشباع، به‌ندرت در طبیعت مشاهده می‌شوند، برآورد میزان فرسایش، مستلزم به‌کارگیری اصول موضوع مکانیک خاک غیراشباع است. بنابراین، در نوشتار حاضر، به مؤلفه‌های تأثیرگذار در فیزیک جریان و چگونگی پاسخ بستر پرداخته شده است. جمع‌بندی یافته‌های متون فنی موجود نشان می‌دهد متغیرهای مستقل تنش در جریان‌های واریزه‌ای، دائماً به‌صورت موضعی تغییر می‌کنند. بنابراین، رفتار جریان بسیار متغیر و تابع زمان و تغییرات توپوگرافی است. همچنین، نرخ وقوع فرسایش در بسترهای غیراشباع، بسیار بیشتر از بسترهای خشک است، که افزایش قدرت تخریب جریان را منجر می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

واژگان کلیدی:

جریان واریزه‌ای،

تغییر اقلیم،

زمین‌لغزش،

فرسایش،

خاک غیراشباع.

۱. مقدمه

جریان‌های واریزه‌ای، جریان‌های حجیم و سریع در مناطق کوهستانی و با شیب تند هستند، که در اثر حرکت توأمان رواناب و نهشته‌های رسوبی سست، در جهت شیب به‌وجود می‌آیند. حجم جریان‌های واریزه‌ای در حین حرکت به سمت پایین‌دست، به‌علت فرسایش می‌تواند تا بیش از ۵۰ برابر حجم اولیه افزایش یابد،^[۱] و امواج تند حامل قطعات سنگی که گاهی ارتفاع‌شان از ۱۰ متر نیز فراتر می‌رود، باعث می‌شوند قدرت تخریب جریان‌های مذکور با انرژی پتانسیل بیشتر از 10^{16} ژول، قابل‌توجه باشد.^[۲ و ۳] جریان‌های واریزه‌ای، معمولاً در شیب‌های تندتر از ۳۰ درجه تشکیل می‌شوند و سرعت و حجم‌شان به ترتیب از ۱۰ متر بر ثانیه و 10^9 مترمکعب فراتر می‌رود.^[۴]

ایفای نقش هر دو فاز جامد و سیال به‌عنوان نیروی محرک در حرکت جریان، جریان‌های واریزه‌ای را از سایر جریان‌های ژئوفیزیکی، مانند بهمن سنگ^۱، متمایز می‌کند.^[۳] با اینکه جریان‌های واریزه‌ای، معمولاً اشباع در نظر گرفته می‌شوند، اما تفاوت قابل‌توجهی میان جریان‌های واریزه‌ای با سیلاب‌ها که در آن‌ها رسوب‌ها، معلق هستند و رفتار جریان توسط فاز سیال کنترل می‌شود، وجود دارد؛ در واقع، حضور ذرات معلق در سیلاب‌ها، در برابر تلاطم امواج، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.^[۵] نقطه‌ی مقابل، جریان‌های ناشی از ریزش

سنگ هستند که در آن‌ها، اندرکنش ذرات جامد با یکدیگر غالب است؛ با این حال، جریان‌های واریزه‌ای را معادل با جریان‌های ناشی از ریزش سنگ نیز نمی‌توان در نظر گرفت، چرا که اندرکنش میان فاز سیال و جامد، از اساسی‌ترین مشخصه‌های جریان‌های واریزه‌ای است.^[۵]

در دهه‌های اخیر، وقوع جریان‌های واریزه‌ای و خسارت‌های ناشی از آن‌ها، به‌علت تغییرات اقلیم افزایش یافته است.^[۶ و ۷] پیش‌بینی و مدیریت خسارت‌های ناشی از جریان‌های واریزه‌ای، مستلزم شناسایی علل احتمالی رخداد آن‌ها در مناطق مستعد، برآورد حجم، مسافت طی‌شده‌ی جریان، و درنهایت، مناطق و زیرساخت‌های در معرض خطر است. در نوشتار حاضر، ضمن بررسی علل وقوع جریان‌های واریزه‌ای و فیزیک رفتاری آن‌ها، چالش‌های پژوهشی موجود نیز بررسی شده است.

۲. پدیدارشناسی

میزان توسعه و گسترش جریان‌های واریزه‌ای، به پستی و بلندی مسیر و مشخصات جریان، مانند دانه‌بندی ذرات خاک، جرم حجمی، و لزجت جریان بستگی دارد.^[۸] همچنین برخی خصوصیات مانند اندرکنش فاز جامد و سیال و

¹ Rock avalanche

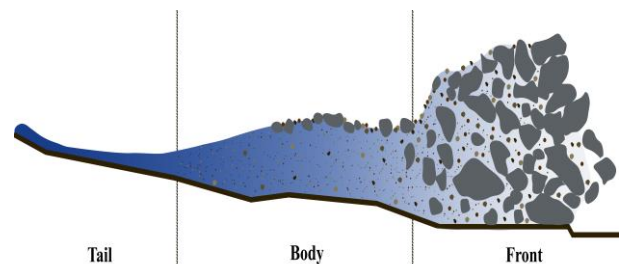
انبساط حجمی جریان، تفسیر چگونگی توسعه و به تبع آن، برآورد قدرت تخریب، سرعت، و حجم جریان‌های واریزه‌ای را پیچیده می‌کنند. در بخش حاضر، پس از ذکر عوامل مؤثر در شکل‌گیری جریان‌های واریزه‌ای، نیمرخ طولی آن‌ها بررسی و سپس به چگونگی تأثیر مصالح تشکیل‌دهنده جریان در مسافت طی شده و قدرت تخریب آن پرداخته شده است.

۱.۲. علل وقوع جریان‌های واریزه‌ای

بارندگی و زلزله، دو عامل افزایش تناوب جریان‌های واریزه‌ای هستند.^[۹ و ۱۰] دوره‌ی بازگشت جریان‌های واریزه‌ای در تایوان، پس از زلزله‌ی «چی‌چی»^۱، از ۵ سال به ۲ سال کاهش پیدا کرد و حدود آستانه‌ی شدت بارندگی و بارندگی تجمعی بحرانی برای شروع جریان واریزه‌ای، به $\frac{1}{3}$ مقادیر پیش از وقوع زلزله کاهش یافته‌اند.^[۱۰] بررسی‌های میدانی نشان داده‌اند در اثر زمین‌لرزه، حجم قابل‌توجهی از مصالح سست به‌وجود می‌آیند، که در اثر بارندگی، به راحتی دچار فرسایش می‌شوند و در تشکیل جریان‌های واریزه‌ای مشارکت می‌کنند.^[۱۱] جریان‌های واریزه‌ای ناشی از بارندگی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد، جریان‌های ناشی از: (۱) زمین‌لغزش، و (۲) وقوع رواناب. در دسته‌ی اول، جریان به‌علت نفوذ آب باران به داخل بستر، افزایش فشار آب حفره‌ای، گسیختگی شیروانی، و حرکت آن به سمت پایین‌دست رخ می‌دهد.^[۱۲ و ۱۳] دسته‌ی دوم، جریان‌های واریزه‌ای ناشی از رواناب، به واسطه‌ی بارندگی‌های شدید کوتاه‌مدت رخ می‌دهند، که عموماً با ریزش سنگ نیز همراه هستند و سرعت و قدرت تخریب‌شان بسیار بیشتر از جریان‌های دسته‌ی اول است.^[۹]

۲.۲. پروفیل جریان و مسافت طی‌شده

پروفیل عمده‌ی جریان‌های واریزه‌ای را می‌توان مطابق شکل ۱ به سه ناحیه‌ی: «جبهه‌ی ۲»، «بدنه‌ی ۳»، و «دنباله‌ی ۴» تقسیم کرد.^[۱۵ و ۱۶] دنباله‌ی جریان، ضخامت، و حجم رسوب‌های ناچیزی دارد و عمده‌ی حجم آن، از آب تشکیل می‌شود.^[۳] فشار سیال منفذی در پایین‌ترین بخش جبهه‌ی جریان، نزدیک به صفر است، اما با پیشروی به سمت بخش‌های انتهایی جریان افزایش می‌یابد.^[۳ و ۱۵] جبهه‌ی جریان، به علت وقوع فرآیند جدایی ذرات براساس ابعاد^۵، معمولاً حامل سنگ و درشت‌دانه‌ترین ذرات است. از آنجایی‌که ذرات درشت‌دانه، نفوذپذیری زیادی دارند، سیال منفذی جبهه‌ی جریان زهکش می‌شود و این بخش از جریان، معمولاً غیراشباع است. تجمع قطعات سنگی و مواد درشت‌دانه در جبهه‌ی جریان باعث می‌شود بخش جلویی آن مانند یک سد عمل کند، و حرکت جریان اشباع و روان بدنه‌ی جریان به سمت پایین شیب محدود شود، که افزایش ناگهانی دبی و عمق در بدنه را منجر می‌شود.^[۱۵] با پیشروی جبهه‌ی



شکل ۱. نیمرخ طولی جریان واریزه‌ای.

جریان به سمت پایین‌دست، بخشی از ذرات موجود در بدنه، که در مقایسه با جبهه‌ی آن شامل ذرات ریزدانه و روان‌تر هستند، از بالای ناحیه‌ی ضخیم جبهه‌ی جریان سقوط و جلوتر از آن به بستر برخورد می‌کنند و از سرعت‌شان کاسته می‌شود؛ بنابراین، مساحت سد متحرک در جلوی جریان، به واسطه‌ی جهش و سقوط ذرات درشت‌دانه‌ی موجود در سطح آزاد بدنه، به صورت پیوسته افزایش می‌یابد.^[۱۷] از طرفی، مقاومت جبهه‌ی جریان در برابر حرکت، در مقطع عرضی بخش جلویی جریان، ناپایداری ایجاد می‌کند، که باعث ریزش ذرات این بخش به کناره‌ها و به‌وجودآمدن خاکریزهایی در طرفین مسیر می‌شود.^[۱۸]

مسافت طی‌شده و زمان توقف جریان، تحت تأثیر نوسان‌های فشار منفذی است. هنگامی که اضافه‌فشار حفره‌ای از فشار هیدروستاتیک تجاوز کند، سبب کاهش مقاومت برشی و افزایش تحرک جریان می‌شود.^[۴] براساس مقدار فشار حفره‌ای، بعضی از جریان‌ها پس از طی مسافت کوتاهی متوقف می‌شوند، در حالی که برخی دیگر، مسافت‌های طولانی را می‌پیمایند و درنهایت، پس از رسیدن به شیب‌های ملایم، در سطح بستر پخش می‌شوند و رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد.^[۱۹-۲۱] بنابراین، برای پیش‌بینی مناطقی که در معرض جریان‌های واریزه‌ای قرار خواهند گرفت، محوشدن فشار حفره‌ای، از مهم‌ترین متغیرهایی است که باید در نظر گرفته شود.^[۲۲] در صورتی که مدت‌زمان لازم برای محوشدن فشار منفذی کوتاه‌تر از زمان توسعه و گسترش جریان باشد، سیال منفذی به سرعت زهکش می‌شود.^[۲۳] در این حالت، به‌علت افزایش اصطکاک میان ذرات خاک با بستر، مسافت طی‌شده کاهش خواهد یافت.^[۲۴] اگر زمان محوشدن فشار منفذی از زمان توسعه و گسترش جریان بیشتر باشد، جریان زهکشی‌نشده است؛ اما در صورتی که زمان لازم برای خروج سیال منفذی مشابه زمان موردنیاز برای توسعه‌ی جریان باشد، تا وقتی جریان واریزه‌ای به منطقه‌ای که در آن رسوب‌گذاری رخ خواهد داد برسد، فشار سیال منفذی، دوام خواهد داشت.^[۲۳] در چنین حالتی، سرعت فاز سیال با سرعت فاز جامد متفاوت است و اندرکنش دو فاز با یکدیگر، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار جریان ایفا خواهد کرد.^[۲۳]

۳.۲. ترکیب جریان

آب جریان‌های واریزه‌ای، حامل ذرات ریز معلق است، که خلل و فرج میان ذرات درشت‌دانه را پر می‌کنند و لزجت سیال را افزایش می‌دهند،^[۲۵] و باعث کاهش تماس میان ذرات و افزایش تحرک جریان می‌شوند.^[۳] از طرفی، تکانه^۶، فقط در اثر تماس مستقیم منتقل می‌شود؛ اما ذرات ریزدانه، در اثر شناوری، لزجت، و آشفتگی جریان بدون اینکه با یکدیگر برخورد و تماس مستقیم داشته باشند، معلق می‌مانند؛ در نتیجه، ذرات ریزدانه، جزء فاز جامد در نظر گرفته نمی‌شوند.^[۱۵] بنابراین، منظور از فاز سیال در جریان‌های واریزه‌ای، مجموع آب و ذرات ریزدانه‌ی کوچک‌تر از ۰/۰۶۲۵ میلی‌متر است.^[۳] فاز سیال در جریان‌های واریزه‌ای، از تعریف متداول آن، یعنی آب خالص و یا هوا تبعیت نمی‌کند. در بسیاری از متون فنی موجود، از وجود هوا، به‌علت جرم حجمی و لزجت ناچیز و همچنین تراکم‌پذیری زیاد صرف‌نظر شده است؛ زیرا فرض بر آن است که تأثیر هوا در مکانیک جریان، نسبت به آب خالص قابل توجه نیست.^[۱۵] با این حال، جریان‌های واریزه‌ای، به دو دسته تقسیم می‌شوند: (۱) جریان‌های کاملاً اشباع، و (۲) جریان‌های غیراشباع.^[۲۶] جریان‌های غیراشباع،

⁴ Tail

⁵ Size segregation

⁶ Momentum

¹ Chi Chi earthquake

² Front

³ Body

در شیب‌های تند، زوایای شیب بیشتر از 22° رخ می‌دهند و از ۳ لایه تشکیل می‌شوند.^[۲۶]

۱) لایه‌ی تحتانی که در تماس با بستر است، ۲) لایه‌ی میانی، که در آن جنبش و برخورد ذرات با یکدیگر قابل توجه است، و ۳) لایه‌ی بالایی که در تماس با هوا و غیراشباع است و هوا نیز، در فاز سیال وجود دارد. بنابراین، در چنین جریان‌هایی نمی‌توان از وجود هوا صرف‌نظر کرد. همچنین، در نرخ‌های کوچک کرنش برشی، مانند زمانی که شیب بستر ناچیز و سرعت جریان کم است، ذرات خاک، با یکدیگر در تماس هستند و نیروی غالب، نیروی اصطکاک میان آن‌هاست. در مقابل، در نرخ‌های بزرگ کرنش، در شرایطی که غلظت ذرات کم و شیب بستر تند است، برخورد ذرات خاک با یکدیگر غالب است و وجود هوا را نمی‌توان نادیده گرفت.^[۲۷ و ۲۸]

فاز جامد در جریان‌های واریزه‌ای، درصد‌های حجمی ۴۰-۸۰ را شامل می‌شود.^[۲۹] در جریان‌های دارای فاز سیال غالب (فاز جامد کمتر از ۵۰٪ حجمی جریان)، تنش مؤثر ناشی از تماس میان ذرات ناچیز است.^[۳۰] در مقابل، در جریان‌های دارای فاز جامد غالب، اصطکاک ناشی از تماس مستقیم ذرات قابل چشم‌پوشی نیست.^[۳۱] کوچک‌ترین تغییر در مقدار فاز جامد، در پاسخ فشار سیال منفذی تأثیر می‌گذارد،^[۳۲] و سیال منفذی نیز خود، میزان توسعه و گسترش جریان، مسافت طی‌شده، و نیرویی که در پایین‌دست بر زبرساخت‌ها وارد خواهد شد، را تعیین می‌کند؛ بنابراین، برآورد درصد حجمی فاز جامد، حائز اهمیت است.

سانگ^۷ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۳] رفتار جریان‌های متراکم دارای فاز جامد بیشتر از ۵۰٪ را هنگام برخورد به مانع بررسی کرده‌اند. عکس‌العمل جریان هنگام برخورد به مانع و مقدار نیرویی که بر آن وارد خواهد کرد، از دو جهت حائز اهمیت است: ۱) بیانگر قدرت تخریب جریان در پایین‌دست است؛ و ۲) از مهم‌ترین مشخصه‌هایی است که باید در طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی جریان، لحاظ شود. ایشان ریزکره‌های شیشه‌ای با قطر ۰/۶ میلی‌متر را به‌عنوان فاز جامد در نظر گرفتند و جریان‌های واریزه‌ای متراکم با درصد حجمی فاز جامد ۶۰ را در آزمایشگاه شبیه‌سازی کردند. مشاهده‌های آن‌ها نشان داد برخلاف جریان‌های دارای فاز سیال غالب فرآیند برخورد جریان‌های متراکم به مانع، شبه‌استاتیک و وابسته به پاسخ فشار سیال منفذی است. جریان‌های واریزه‌ای متراکم، حین حرکت، دچار انبساط حجمی، که به نرخ برش وابسته است، می‌شوند. با توجه به اینکه نرخ توزیع برش در جریان‌های واریزه‌ای یکنواخت نیست، پاسخ فشار منفذی به انبساط حجمی، به‌صورت غیرخطی خواهد بود و تغییر فشار منفذی در نقاطی که انبساط حجمی را تجربه می‌کنند، با یکدیگر برابر نیست؛ بنابراین، تأثیر آن به‌صورت موضعی است.^[۳۳] میزان تأثیرپذیری رفتار جریان از تغییرات فشار سیال منفذی در نفوذپذیری جریان،^[۳۴] و در نتیجه مدت زمانی که به طول می‌انجامد تا فشار سیال منفذی موضعی ایجادشده در کل ضخامت جریان واریزه‌ای اثر بگذارد، بستگی دارد.^[۳۳] مشاهده‌های سانگ و همکاران نشان داد فشار منفذی منفی ناشی از انبساط حجمی جریان متراکم، در مدت حدود ۱ ثانیه ایجاد شده است، اما ۱۰ ثانیه طول کشید تا کل ضخامت جریان، تحت تأثیر قرار گیرد؛ بنابراین، رفتار شبه‌استاتیک جریان‌های متراکم هنگام برخورد به موانع به علت وجود این اختلاف زمانی است. همچنین، سانگ و همکاران برای برآورد نیروی وارد بر

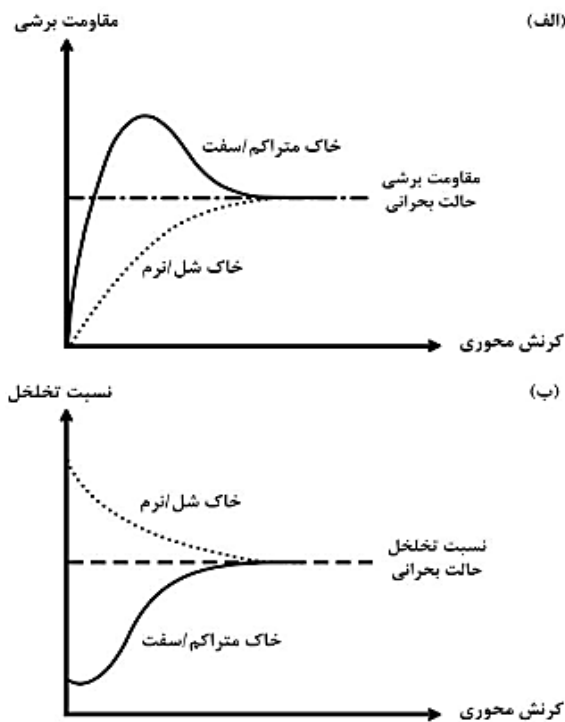
موانع در اثر برخورد جریان‌های متراکم (F)، رابطه‌ی ۱ را ارائه داده‌اند:

$$F = 0.5k_H \rho g H^2 \cos \theta \quad (1)$$

که در آن، k_H ضریب فشار جانبی خاک، ρ جرم حجمی، g شتاب گرانش زمین، H ارتفاع رسوب‌های انباشته‌شده در بالادست مانع، و θ زاویه‌ی شیب هستند. یکی از چالش‌های محاسبه‌ی نیرو با استفاده از رابطه‌ی ۱، محاسبه‌ی مقدار H است؛ در حال حاضر، روشی که قادر به برآورد ارتفاع رسوب‌های پشت مانع با اعمال اثر پاسخ فشار منفذی باشد، وجود ندارد.^[۳۳] با اینکه مطالعات سانگ و همکاران برای اولین بار جنبه‌های ناشناخته‌ی متعددی از فرآیند برخورد جریان‌های واریزه‌ای متراکم به موانع را روشن ساخت، اما ریزکره‌های شیشه‌ای استفاده‌شده در مطالعه‌ی آن‌ها به‌عنوان فاز جامد، ابعاد برابر (۰/۶ میلی‌متر) داشته‌اند، در حالی که جریان‌های واریزه‌ای در طبیعت، بازه‌ی گسترده‌ای از دانه‌بندی را شامل می‌شوند و انبساط حجمی کمتری را تجربه می‌کنند. بنابراین، جریان متراکم شبیه‌سازی‌شده در پژوهش ایشان نمی‌تواند مستقیماً با آنچه در طبیعت رخ می‌دهد، مقایسه شود.

مصالح تشکیل‌دهنده‌ی فاز جامد و سیال جریان، نقش مهمی در چگونگی تغییرات فشار منفذی ایفا می‌کنند؛ چرا که نفوذپذیری اولیه‌ی یک محیط متخلخل، متأثر از ترکیب مصالح،^[۳۲] و میزان لزجت آن، تحت تأثیر چگالی سیال است.^[۳۴] ژنگ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۵] سرعت محوشدن فشار منفذی را با تغییر در جرم حجمی سیال بررسی کرده و دریافته‌اند هنگامی که آب خالص به‌عنوان سیال منفذی در خلل و فرج وجود داشته باشد، سرعت زهکشی زیاد است و سیال منفذی، سریعاً محو می‌شود. با افزایش جرم حجمی سیال منفذی به‌علت اضافه‌شدن ریزدانه، دو فرآیند مشاهده شد: ۱) سرعت محوشدن فشار حفره‌ای در ابتدا سریع و سپس آهسته بود، ۲) سرعت محوشدن فشار حفره‌ای، در کل فرآیند آهسته بود. در بازه‌ی چگالی سیال ۱۲۷۵-۱۲۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب، غلظت ذرات ریزدانه، در حدی که باعث انسداد کامل مسیرهای ارتباطی میان منافذ شود، نبوده است؛ در ابتدا، معلق‌بودن ذرات ریزدانه در مسیرهای باریک، باعث کاهش نفوذپذیری به صورت موقتی شده است، اما به‌تدریج، نفوذپذیری بهبود و فشار حفره‌ای سریعاً کاهش یافته است. در مقابل، غلظت زیاد ذرات ریزدانه، مسیرهای ارتباطی باریک میان حفره‌ها را کاملاً مسدود کرده، نفوذپذیری را کاهش داده، و خروج سیال منفذی، به کندی صورت گرفته است.

ابعاد ذرات خاک در جریان، از مشخصه‌هایی است که مسافت طی‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مسافت طی‌شده‌ی جریان، با ذرات درشت‌دانه همبستگی منفی و با ذرات ریزدانه همبستگی مثبت دارد.^[۳۶] افزایش ذرات درشت‌دانه باعث می‌شود تأثیر تنش‌های ناشی از برخورد ذرات به یکدیگر و اصطکاک، افزایش و تلاطم جریان و مسافتی که طی می‌کند، کاهش یابد.^[۳۷] شایان ذکر است برخی مشاهده‌های آزمایشگاهی، عکس این موضوع را گزارش کرده‌اند.^[۳۸] در مقابل، افزایش ذرات ریزدانه باعث می‌شود برخورد ذرات با یکدیگر، به‌علت افزایش روانروی و نیروی شناوری کاهش یابد.^[۳۲] مشاهده‌های دی‌هاس^۸ و همکاران (۲۰۱۵)،^[۳۸] نشان داده است که افزایش میزان رس در جریان، منجر به طی مسافت طولانی‌تر و کاهش مقاومت جریان شده است. با این حال، اگر مقدار رس، بسیار زیاد (بیشتر از ۲٪ حجم کل جریان،^[۳۸] باشد، مسافت طی‌شده به‌علت لزجت قابل توجه جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۲. (الف) رفتار مقاومت برشی، و (ب) تغییر شکل خاک‌های اشباع شل و متراکم در شرایط تحکیم یافته‌ی زهکشی‌شده.^[۱۴]

حالت بحرانی‌اش فراتر رود؛ که به تبع آن، در تغییر مکان‌های بسیار بزرگ، انقباض و افزایش موقت فشار سیال منفذی رخ می‌دهد.^[۱۲ و ۱۴] در صورتی که هنگام شکل‌گیری جریان، بارش باران متوقف نشده باشد و یا رواناب نیز بر روی توده‌ی لغزنده جاری باشد، نفوذ سریع آب به داخل توده‌ی گسیخته‌شده‌ی در حال اتساع، فشار منفذی را افزایش می‌دهد، که منجر به خنثی شدن اثر انبساط حجمی در کاهش فشار منفذی می‌شود و تبدیل جریان متراکم به جریان روان را سرعت می‌بخشد.^[۴۴ و ۴۷]

در ساختگاه‌های دارای بستر غیراشباع، تنش مؤثر را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی بی‌شاپ^{۱۲}، مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد:^[۲۷]

$$\sigma'' = \bar{\sigma} - \chi \sigma \quad (2)$$

که در آن، σ'' تنش مؤثر در خاک غیراشباع، $\bar{\sigma}$ اختلاف تنش کل و فشار منفذی، χ درجه‌ی اشباع خاک، و σ مکش ساختاری است. در ساختگاه‌های مذکور، در نقطه‌ی شروع گسیختگی، هنگامی که تنش مؤثر به کمینه‌ی مقدار خود می‌رسد، فشار آب حفره‌ای به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد؛ با این حال، فشار افزایش‌یافته پایدار نیست و به‌سرعت محو می‌شود. با افزایش فشار آب حفره‌ای در طول چند ثانیه‌ی ابتدایی، سرعت حرکت توده‌ی گسیخته‌شده نیز به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و سپس، روند کاهشی را طی می‌کند.^[۲۷] نسبت تخلخل نیز، در ثانیه‌های ابتدایی، به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد، تا زمانی که به نسبت تخلخل حالت بحرانی برسد.^[۲۷] در نتیجه، در ساختگاه‌های غیراشباع، هنگامی که مقاومت برشی خاک بستر از دست رفت، شتاب حرکت توده‌ی گسیخته‌شده افزایش می‌یابد و پس از آن، در مقاومت برشی حالت بحرانی، محو شدن اضافه فشار آب حفره‌ای رخ می‌دهد، که منجر به تحکیم توده‌ی گسیخته‌شده و تسریع در روند توقف جریان می‌شود.^[۲۷]

در مجموعه‌ی آزمون‌های دی‌هاس و همکاران در فلوم آزمایشگاهی مشاهده شده است در صورتی که سنگ و ذرات درشت‌دانه، ۲۵ الی ۵۰ درصد حجم جریان را تشکیل دهند؛ در مسیر حرکت، به کناره‌های کانال سقوط می‌کنند، خاکریزهای جانبی را تشکیل می‌دهند که باعث کاهش ابعاد مقطع عرضی کانال جریان می‌شود و مسافت طی‌شده افزایش می‌یابد. در حالی که سنگ و ذرات درشت‌دانه، کمتر از ۲۵٪ حجم کل جریان، در حدی که باعث کاهش عرض مسیر شوند، نیستند و درصدهای ذرات درشت‌دانه‌ی بیشتر از ۵۰٪ نیز در جبهه‌ی جریان، مانند یک سد متحرک عمل می‌کنند. برخلاف مشاهده‌های دی‌هاس و همکاران، نتایج بررسی‌های گانگ^۹ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۷] نشان داده است با افزایش سنگ و ذرات درشت‌دانه، مستقل از حدود به‌دست‌آمده توسط دی‌هاس و همکاران، مسافت طی‌شده کاهش یافته است. تفاوت، در این است که علی‌رغم غلبه‌ی تنش‌های ناشی از برخورد ذرات بر اصطکاک میان آن‌ها در هر دو مطالعه، تنش‌های ناشی از لزجت جریان در مطالعه‌ی دی‌هاس و همکاران، به‌دلیل استفاده از بازه‌ی دانه‌بندی گسترده‌تر برای شبیه‌سازی جریان، بیشتر از مطالعه‌ی گانگ و همکاران بوده است.

۳. توصیف شکل‌گیری جریان‌های واریزه‌ای با استفاده از مفاهیم مکانیک خاک حالت بحرانی^{۱۰}

اگر آرایه‌ای از ذرات کروی در متراکم‌ترین حالت ممکن در مجاورت یکدیگر قرار گرفته باشند، اعمال تنش برشی، باعث حرکت ذرات بر روی یکدیگر و در نهایت افزایش حجم سیستم می‌شود (پدیده‌ی اتساع^{۱۱}). تغییر در نسبت تخلخل خاک و فشار سیال منفذی در اثر انبساط حجمی یا فشردگی، باعث تغییر شکل برشی خاک می‌شود. تغییر شکل اخیر تا زمانی که نسبت تخلخل و مقاومت برشی، مستقل از نسبت تخلخل اولیه‌ی خاک، به یک وضعیت یکنواخت، که حالت بحرانی نامیده می‌شود برسد، ادامه پیدا می‌کند (شکل ۲-الف).^[۳۹ و ۴۰] با توجه به شکل ۲-ب، خاک‌های متراکم تحت برش تا زمان رسیدن به حد بحرانی، اتساع را تجربه می‌کنند، اما خاک‌های شل تا زمان رسیدن به حد بحرانی، تمایل به متراکم شدن دارند.^[۴۰] اگر کاهش فضای حفره‌ها در اثر تراکم، سریع‌تر از خروج سیال منفذی رخ دهد، فشار منفذی افزایش می‌یابد. فشار افزایش‌یافته می‌تواند منتهی به شکل‌گیری جریان واریزه‌ای شود.^[۴۱] در مقابل، در خاکی با نسبت تخلخل کمتر از نسبت تخلخل حالت بحرانی در اثر انبساط حجمی ناشی از تنش برشی، کاهش فشار حفره‌ای و افزایش مقاومت برشی و در نتیجه کاهش سرعت و یا توقف جریان رخ می‌دهد.^[۱۲ و ۴۲-۴۴]

در بسیاری از مطالعات فرض شده است جریان‌های واریزه‌ای، فقط در صورت وجود خاک شل، که در آن‌ها جرم حجمی توده‌ی خاک کمتر از حالت بحرانی است، رخ می‌دهند؛^[۱۲] در صورتی که مشاهده‌های میدانی، وقوع جریان‌های واریزه‌ای در بعضی مناطق دارای خاک متراکم را گزارش کرده‌اند.^[۴۱ و ۴۵] در راستای مشاهده‌های ذکر شده، تلاش‌ها برای توضیح چگونگی نوسان‌های فشار سیال منفذی در ساختگاه‌های دارای خاک متراکم افزایش یافته است. شایان ذکر است فرضیه‌های متفاوتی در مورد چگونگی شکل‌گیری جریان‌های واریزه‌ای در ساختگاه‌های مذکور وجود دارد. اندرکنش میان ذرات خاک، توأم با حرکت سریع آن‌ها، که در مکانیک خاک حالت بحرانی لحاظ نمی‌شود، باعث می‌شود خاک دچار انبساط حجمی شود و نسبت تخلخل آن از نسبت تخلخل

¹¹ Dilation

¹² Bishop's effective stress

⁹ Gong

¹⁰ Critical State Soil Mechanics

۴. فرسایش و تغییر حجم جریان

وقوع فرسایش در طی جریان‌های واریزه‌ای می‌تواند ناشی از آبشستگی کف بستر یا ریزش دیواره‌های کانالی باشد که جریان در آن در حرکت است؛ این پدیده، حجم جریان و در نتیجه قدرت تخریب آن را پیش از رسیدن به مناطق هموار، رسوب‌گذاری و توقف جریان را چندین برابر می‌کند. [۴، ۴۹، ۵۰] بررسی فرسایش، به این علت حائز اهمیت است که در برآورد انرژی جنبشی و مسافت طی‌شده‌ی جریان و همچنین وسعت مناطق در معرض خطر تعیین‌کننده است؛ [۵۱] با این حال، پیشرفت‌ها در زمینه‌ی توضیح دقیق فرآیند فرسایش و چگونگی افزایش حجم جریان، به دلیل طبیعت آشفته و متلاطم جریان‌های ژئوفیزیکی و مشکل بودن اندازه‌گیری‌های میدانی محدود بوده است و جزء چالش‌های فعلی به‌شمار می‌رود. [۱۶، ۵۰، ۵۲]

در بسیاری از تئوری‌های فعلی مانند مدل مدینا و همکاران (۲۰۰۸)، [۵۳] فرسایش، گسیختگی برشی مصالح بستر، که در اثر تجاوز تنش برشی از مقاومت برشی رخ می‌دهد، تعریف شده است. در مدل ایشان، از معیار گسیختگی موهر-کولمب، که در آن تعادل نیروهای برشی وارد بستر (τ_b)، با نیروهای مقاوم بررسی می‌شود، استفاده و معیار وقوع فرسایش، طبق رابطه‌ی ۳ تعریف شده است:

$$\tau_b > h \rho g \cos \theta \tan \phi_{bed} \quad (3)$$

که در آن، ϕ_{bed} زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح بستر، h عمق جریان، ρ جرم حجمی جریان، و θ زاویه‌ی شیب نسبت به افق است.

اندازه‌گیری‌های میدانی از جریان‌های واریزه‌ای نشان داده‌اند عمده‌ی حجم فرسایش، در اثر عبور جبهه‌ی جریان از بستر رخ می‌دهد. [۵۴] از طرفی، قطعات سنگی و ذرات درشت‌دانه، در این بخش از جریان واقع شده‌اند و تنش‌های ناشی از ضربه و برخورد ذرات به بستر بر تنش‌های اصطکاکی غالب هستند. [۵۴] و علاوه بر این، در جریان واریزه‌ای منطقه‌ی ایلگنابن^{۱۳} سوییس، حین عبور جبهه‌ی جریان از روی بستر، تنش برشی از مقاومت خاک بستر کمتر بوده است؛ با وجود این، فرسایش رخداد نشان می‌دهد رویکردهای مبتنی بر معیار گسیختگی موهر-کولمب، مانند مدل مدینا و همکاران، توصیف جامعی از فرآیند فرسایش ارائه نمی‌کنند. [۵۴]

تنش‌های ناشی از برخورد و ضربه‌ی ذرات به یکدیگر (σ_c) مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود: [۵۲]

$$\sigma_c = v_s \rho_s \dot{\gamma}^2 D^2 \quad (4)$$

که در آن، v_s حجم فاز جامد، ρ_s جرم حجمی ذرات خاک، $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش، و D ابعاد ذرات موجود در جریان است. رابطه‌ی ۴ نشان می‌دهد شدت برخورد ذرات با یکدیگر و خصوصیات دینامیکی جریان، وابسته به ابعاد ذرات است.

سانگ و چویی (۲۰۲۱)، [۵۲] از رابطه‌ی ۴، برای تعریف عدد بی‌بعد N_{SNCS} ، که برابر با نسبت تنش‌های ناشی از برخورد ذرات به یکدیگر به مقاومت برشی بستر ($N_{SNCS} = \sigma_c / \tau_f$) است، استفاده کرده‌اند. نرخ فرسایش، $\partial z / \partial t$ ، توسط ایشان با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$-\partial z / \partial t = K \cdot N_{SNCS} \quad (5)$$

که در آن، K ضریب مربوط به مشخصات مصالح جریان است. با اینکه اثر برخورد ذرات در فرآیند فرسایش در مدل سانگ و چویی لحاظ شده است؛ اما رابطه‌ی ۴، که اساس توسعه‌ی مدل آن‌ها بوده است، بیانگر تنش‌های ناشی از برخورد ذرات به یکدیگر و نه برخورد ذرات به بستر است. بنابراین در رابطه‌ی ۵، از اثر ضربه‌های ناشی از برخورد ذرات به بستر در فرآیند فرسایش چشم‌پوشی شده است.

تنش‌های ناشی از برخورد و ضربه‌ی ذرات به بستر (σ_{bc})، توسط چویی و سانگ (۲۰۲۶)، [۵۶] مطابق رابطه‌ی ۶ تعریف شده است:

$$\sigma_{bc} = \chi g v_f \rho_s D Fr^{2k} \quad (6)$$

که در آن، χ ضریب بی‌بعد مربوط به مقاومت بستر، Fr عدد بی‌بعد فرود، و k ثابت عددی است. مدل‌های سانگ و چویی (۲۰۲۱)، [۵۲] و چویی و سانگ (۲۰۲۶)، [۵۶] هر دو بر این مبنا توسعه یافته‌اند که بیشترین حجم فرسایش، هنگام عبور جبهه‌ی جریان، که در آن تنش‌های ناشی از برخورد ذرات به یکدیگر و به بستر غالب هستند، رخ می‌دهد. با این حال، مشاهدات دی‌هاس و همکاران (۲۰۲۲)، [۱۶] نشان داد اگر چه شدت فرسایش هنگام عبور جبهه‌ی جریان قابل توجه است، اما فرسایش ناشی از عبور بدنه و دنباله‌ی جریان قابل چشم‌پوشی نیستند.

در مدل‌های محاسبه‌ی حجم فرسایش مک‌دوگال و هانگر^{۱۴} (۲۰۰۵)، [۵۵] آیورسون^{۱۵} (۲۰۱۲)، [۵۷] و بسیاری از مطالعات دیگر، که تأثیر فرسایش در آن‌ها لحاظ شده است، [۴، ۵۸-۶۱] بستر اشباع فرض شده است؛ این، در حالی است که بستر کاملاً اشباع، به‌ندرت در طبیعت مشاهده می‌شود. [۶۲] بستر اشباع، هنگامی که در معرض بار وارد از سمت جریان قرار می‌گیرد، با افزایش فشار آب حفره‌ای، کاهش تنش مؤثر و مقاومت بستر مواجه می‌شود؛ در حالی که پیشینه‌ی مقاومت خاک غیراشباع می‌تواند سه برابر مقاومت آن در حالت اشباع باشد. [۶۳ و ۶۴] این تفاوت، به این دلیل است که متغیر حالت تنش در خاک اشباع، با خاک غیراشباع متفاوت است.

مقاومت برشی خاک اشباع، با استفاده از یک متغیر حالت تنش، یعنی تنش مؤثر ($\sigma_n - u_w$)، که در آن σ_n و u_w به ترتیب تنش نرمال و فشار آب حفره‌ای هستند، محاسبه می‌شود. در خاک غیراشباع، فصل مشترک هوا و آب، که پوسته‌ی کششی نام دارد، مانند یک غشاء کشسان عمل می‌کند و ذرات خاک را توسط کشش سطحی در مجاورت یکدیگر نگاه می‌دارد. [۶۵] کشش سطحی ایجادشده توسط پوسته‌ی کششی و فشار آب حفره‌ای منفی توأم با یکدیگر، باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شوند. [۶۶] مقاومت برشی خاک غیراشباع را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه کرد: [۶۶]

$$\tau = (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (7)$$

که در آن، u_a فشار هوای حفره‌ای، u_w فشار آب حفره‌ای، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، و ϕ^b زاویه‌ای است که نرخ افزایش مقاومت برشی نسبت به مکش ساختاری ($u_a - u_w$) را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۷، نشان می‌دهد مقاومت برشی خاک غیراشباع، توسط دو متغیر حالت تنش $\sigma_n - u_a$ و $u_a - u_w$ بیان می‌شود.

¹⁵ Iverson

¹³ Illgraben

¹⁴ McDougall & Hungr

ذرات درشت‌دانه، مقاومت بستر در برابر نیروهای خارجی را کاهش می‌دهد. بنابراین، هدایت هیدرولیکی ناچیز از یک سو و نبود ذرات درشت‌دانه از سوی دیگر، باعث می‌شود فرسایش در بسترهای ریزدانه به صورت لایه‌ای رخ دهد. در مقابل، هدایت هیدرولیکی زیاد بستر درشت‌دانه باعث می‌شود انتقال سیال منفذی، به سهولت صورت بگیرد و فرسایش، با عمق بیشتری به وقوع بپیوندد. از نتایج پژوهش‌های لی و همکاران (۲۰۲۴)^[۶۹] و همچنین چن و همکاران (۲۰۲۴)^[۷۰] که نشان داده‌اند در یک کانال دارای بستر غیراشباع، معیارهای طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی جریان با توجه به شیب کانال متغیر هستند و حجم فرسایش بستر در پایین‌دست سازه‌های مذکور، متأثر از زاویه‌ی شیب است، دو نکته‌ی اساسی را می‌توان استنباط کرد: (۱) فلوام‌های آزمایشگاهی برای مدل‌سازی جریان‌های واریزه‌ای را باید به نحوی طراحی کرد که قابلیت ایجاد دست‌کم دو شیب متفاوت در طول فلوام به‌صورت هم‌زمان^{۱۷} را داشته باشند، و (۲) در نظر گرفتن بستر صلب در آزمون‌های کوچک‌مقیاس، نتایجی متفاوت از آنچه در طبیعت رخ می‌دهد را حاصل می‌کند. براساس مشاهده‌های لی و همکاران (۲۰۲۴)^[۶۹] عمق جریان بر روی بستر فرسایش‌پذیر، از عمق جریان بر روی بستر صلب بیشتر است؛ به این دلیل که مصالح فرسایش‌یافته‌ی بستر، حجم مخلوط جریان و در نتیجه عمق آن را افزایش می‌دهند.

نوسان‌های فشار منفذی در یک بستر رسوبی، هنگامی که تحت بار ناشی از عبور جریان‌های واریزه‌ای قرار می‌گیرند، را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف کرد:^[۵۷]

$$\frac{dp}{dt} = \nabla \cdot \frac{k}{C\mu} \nabla p + \frac{d\sigma}{dt} - \frac{\dot{\gamma} \tan \phi}{C} \quad (9)$$

که در آن، p فشار منفذی، σ تنش نرمال کل ناشی از عبور جریان از روی بستر، k نفوذپذیری بستر، μ لزجت سیال، $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش بستر، C قابلیت فشرده‌گی مصالح بستر در حالت زهکشی‌شده، و ϕ زاویه‌ی اتساع است، که تمایل بستر به اتساع ($\phi > 0$) یا تراکم ($\phi < 0$) را نشان می‌دهد. از رابطه‌ی ۹ می‌توان دریافت که نوسان‌های فشار منفذی به قابلیت انتشار (اولین جمله‌ی سمت راست رابطه)، فشرده‌شدن بستر به‌علت فشار ناشی از وزن جریان (دومین جمله‌ی سمت راست رابطه) و فشرده‌شدن بستر به علت تجربه‌ی تنش‌های برشی (سومین جمله‌ی سمت راست رابطه) بستگی دارد. در بسترهای اشباع، زمان پخش فشار منفذی با افزایش نفوذپذیری کاهش می‌یابد؛ بنابراین، فشار منفذی در حین وقوع فرسایش، در زمان کوتاهی محو می‌شود.^[۷۱] در مقابل، در بسترهای غیراشباع، زمان انتشار فشار منفذی طولانی‌تر بوده است و با افزایش نفوذپذیری و میزان رطوبت، سیال منفذی تحت فشار قرار می‌گیرد.^[۷۱] این روند، باعث می‌شود نرخ وقوع فرسایش، در بسترهای مرطوب بسیار سریع‌تر از نرخ وقوع آن در بسترهای خشک باشد. بنابراین، سرعت جریان واریزه‌ای و اندازه‌ی حرکت آن در بسترهای غیراشباع، به مراتب بیشتر از بسترهای خشک است.^[۷۱]

یکی از اساسی‌ترین محدودیت‌های متون فنی موجود، عدم ایجاد تمایز میان مؤلفه‌های فرسایش، یعنی آبستگي^{۱۸} و فرسایش توده‌ای خاک^{۱۹} است. منظور از آبستگي، شروع به حرکت ذرات خاک لایه‌ی سطحی بستر به‌علت تجربه‌ی تنش برشی هیدرودینامیکی (τ_h) است، که مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه

مقاومت برشی بستر غیراشباع، که در معرض بارگذاری زهکشی‌نشده قرار می‌گیرد، توسط سانگ و چویی (۲۰۲۱)^[۵۲] مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه شده است:

$$\tau_f = \sigma_n \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b - B_a \sigma_n \tan \phi' \quad (8)$$

که در آن، B_a متغیر مربوط به فشار هوای حفره‌ای است. با جایگذاری مقاومت برشی حاصل از رابطه‌ی ۸ در رابطه‌ی ۵، میزان فرسایش قابل محاسبه است.

چویی و سانگ (۲۰۲۳)^[۵۶] تأثیر جریان‌های دانه‌ای خشک در فرآیند فرسایش بستر غیراشباع را در یک فلوام آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. بستر آزمون از ماسه با درصد رطوبت حجمی متغیر ۰-۳۰ تشکیل شده بود. مشاهده‌های ایشان نشان داد هنگامی که بستر غیراشباع در معرض بارگذاری سریع ناشی از عبور جریان دانه‌ای خشک قرار می‌گیرد، انقباض حجمی بستر، که از قابلیت فشرده‌گی فاز هوای موجود در آن نشأت می‌گیرد، تنش‌های برشی ایجادشده را خنثی و از وقوع فرسایش جلوگیری می‌کند. مشاهده‌ی اخیر گواهی بر آن است که فرض وجود بستر اشباع در بیشتر مدل‌های برآورد حجم فرسایش، فرضی غیرواقع‌گرایانه است.^[۵۶] اگرچه، در آزمون‌های اخیر ایشان، تأثیر سیال منفذی در جریان نادیده گرفته شده است؛ در حالی که در صورت وجود سیال منفذی، نقش تنش برشی ناشی از لزجت، باید در برآورد حجم فرسایش لحاظ شود. در این حالت، مکانیزم غالب در وقوع فرسایش از تنش‌های ناشی از برخورد ذرات به یکدیگر و به بستر، به تنش برشی ناشی از لزجت سیال منفذی تغییر خواهد کرد. علاوه‌بر این، نوسان‌های فشار سیال منفذی نیز تأثیر قابل توجهی در فرآیند فرسایش خواهد داشت؛ چرا که نفوذ سیال منفذی به داخل بستر، رطوبت آن را افزایش می‌دهد و در مقاومت برشی تأثیر می‌گذارد.

مشاهده‌های آزمایشگاهی رولوفز^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۳)^[۶۷] نشان داده است که مصالح تشکیل‌دهنده‌ی بستر غیراشباع، تأثیر قابل توجه، اما پیچیده‌ای در فرسایش می‌گذارند. براساس نتایج آن‌ها، وجود رس در بستر بیشتر از یک حد بحرانی، مانع از زهکشی بستر می‌شود، فشار سیال منفذی را افزایش می‌دهد، و باعث روانگرایی لایه‌ی فوقانی بستر می‌شود. با وجود اینکه ترکیب بستر، نقش مهمی در میزان فرسایش ایفا می‌کند، اما مدل‌های فعلی برآورد حجم فرسایش، بر مبنای میزان تنش برشی وارد بر بستر و نیروی ناشی از ضربه‌های ذرات خاک به آن،^[۵۷ و ۵۰] توسعه یافته‌اند و برخی، نقش ترکیب مصالح بستر را فقط در میزان فرسایش‌پذیری بررسی کرده‌اند.^[۶۸]

همچنین، براساس نتایج مطالعات لی و همکاران (۲۰۲۴)^[۶۹] نقش ترکیب بسترهای فرسایش‌پذیر دارای زاویه‌ی شیب متغیر، به مراتب بیشتر از بسترهای دارای شیب طولی یکنواخت است، که در بیشتر مدل‌های فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی مشاهده می‌شوند. در این بسترها، تغییر جهت پیوسته و در نتیجه تغییر مداوم رژیم جریان، باعث آشفتگی شدید و تشکیل حباب‌هایی در مخلوط جریان می‌شود و انرژی جریان واریزه‌ای را مستهلک می‌کند. با این حال، نیروی ناشی از برخورد جریان به بستر، باعث وقوع فرسایش می‌شود و حجم مصالح فرسایش‌یافته نسبت به وضعیت دارای شیب بستر یکنواخت، به میزان قابل توجهی بیشتر خواهد شد. در چنین وضعیتی، با توجه به اینکه ضریب هدایت هیدرولیکی بستر ریزدانه کمتر از هدایت هیدرولیکی بستر درشت‌دانه است، انتقال سیال منفذی با محدودیت مواجه خواهد شد. از طرفی، عدم حضور

¹⁸ Scouring

¹⁹ Mass failure

¹⁶ Roelofs

¹⁷ Bilinear flume

در عمده‌ی آن‌ها مکانیزم فرسایش توده‌ای نادیده گرفته شده است، حجم فرسایش بستر در رطوبت‌های کمتر از رطوبت بحرانی، کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است.

از سوی دیگر، نرخ فرسایش توده‌ای با افزایش سرعت جریان تا زمان رسیدن به یک سرعت بحرانی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در محدوده‌ی سرعت‌های کمتر از سرعت بحرانی، تنش برشی هیدرودینامیکی برای ایجاد فرسایش توده‌ای در بالای جبهه‌ی ترشونده کافی نیست. در این حالت، حجم جبهه‌ی ترشونده، در تعیین حجم فرسایش توده‌ای نقشی ندارد؛ بلکه مقدار خاکی که جریان، توانایی گسیخته‌کردن آن توسط تنش برشی هیدرودینامیکی را دارد، تعیین‌کننده است. در مقابل، در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی، تنش برشی هیدرودینامیکی برای ایجاد فرسایش در کل حجم جبهه‌ی ترشونده کافی است. بنابراین، حجمی از خاک، که در بالای جبهه‌ی ترشونده واقع شده است، میزان فرسایش توده‌ای خاک را تعیین می‌کند. نتیجه‌ی اخیر نشان می‌دهد وضعیت هیدرولوژیکی منطقه‌ی بررسی‌شده نیز در تعیین وقوع فرسایش توده‌ای بسیار مهم است و در مطالعات آتی، برای پیش‌بینی فرآیند وقوع فرسایش در بسترهای غیراشباع، توسعه‌ی مدل‌های همبسته‌ی هیدرولوژیکی-مکانیکی را باید مدنظر قرار داد. این تذکر لازم است که سانگ و همکاران (۲۰۲۴)^[۷۲] تأثیر جریان آب خالص در فرآیند فرسایش بستر ماسه‌ای را بررسی کرده و بنابر نتایج مطالعات ایشان نمی‌تواند مستقیماً در تفسیر فرآیند وقوع فرسایش در جریان‌های واریزه‌ای استفاده شود؛ زیرا در مورد جریان‌های واریزه‌ای، خصوصیات مصالح تشکیل‌دهنده‌ی جریان نیز خود بر سرعت نفوذ و عمق پیشروی جبهه‌ی ترشونده به داخل بستر تأثیرگذار است و تفسیر فرآیند فرسایش، خصوصاً فرسایش توده‌ای به مراتب پیچیده‌تر خواهد بود.

۵. تحلیل و بررسی محدودیت‌های موجود در پژوهش‌های پیشین

علی‌رغم وجود مطالعات متعدد در زمینه‌ی فیزیک رفتاری جریان‌های واریزه‌ای، پژوهشگران همچنان با چالش‌هایی مواجه هستند؛ که عمدتاً از آنجا نشأت می‌گیرند که جریان‌های واریزه‌ای ترکیبی از آب و توده‌های گسیخته‌شده‌ی متشکل از خاک و سنگ هستند، که در طول مسیر در اثر فرسایش یا رسوب‌گذاری، ترکیب‌شان دچار تغییر می‌شود و پیش‌بینی چگونگی اندرکنش ذرات خاک با یکدیگر، فاز سیال با فاز جامد، و جریان با بستر در آن‌ها بسیار مشکل خواهد بود.

مرور متون فنی موجود نشان می‌دهد دانش موجود از فیزیک رفتاری جریان‌های واریزه‌ای، عمدتاً بر مبنای نتایج آزمون‌های کوچک‌مقیاس هستند و مشاهده‌های میدانی و مطالعات بزرگ‌مقیاس بسیار محدودند. رفتار مصالح خاکی، تابع حالت تنش است و بنابراین، جریان‌های شبیه‌سازی‌شده در آزمون‌های کوچک‌مقیاس، به‌علت اینکه تنش کمتری را تجربه می‌کنند، نمی‌توانند تمامی جوانب فیزیک رفتاری جریان‌های واریزه‌ای در طبیعت را آشکار سازند.^[۷۳] بنابراین، خلأ داده‌های حاصل از انجام آزمون‌های بزرگ‌مقیاس، کاملاً در این زمینه مشهود است.

شایان ذکر است که بیشتر مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس موجود در متون فنی، قابلیت ایجاد شیب یکنواخت در کل مقطع فلوم را دارند؛ در حالی که

می‌شود؛ در حالی که فرسایش توده‌ای، هنگامی رخ می‌دهد که یک توده از خاک بستر، گسیخته و به همراه جریان، به سمت پایین‌دست جاری شود.

$$\tau_h = C_f \rho_f u^2 \quad (10)$$

که در آن، C_f عامل اصطکاک مربوط به عدد رینولدز جریان، ρ_f جرم حجمی جریان، و u سرعت آن هستند.

اندازه‌گیری‌های میدانی مک‌کوی^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۲)^[۵۸] نشان داد آبشستگی بستر و فرسایش توده‌ای، هر دو حین عبور جریان واریزه‌ای از سطح یک بستر غیراشباع رخ می‌دهند؛ اما وقوع آبشستگی، به‌صورت پیوسته و مداوم است، در حالی که فرسایش به‌صورت توده‌ای، مقطعی، و با نرخ پایین‌تری اتفاق می‌افتد. فرسایش توده‌ای باعث تشکیل امواج مقطعی در جریان می‌شود، که افزایش ناگهانی عمق و غلظت رسوب‌ها را در پی دارد. با این حال، تمرکز بیشتر مطالعات موجود، بر آبشستگی بسترهای فرسایش‌پذیر بوده است.

نفوذ رواناب به داخل بستر، با توجه به رابطه‌ی ۱۱، مقاومت خاک واقع در بالای جبهه‌ی ترشونده را افزایش می‌دهد.^[۷۲]

$$\tau_{us} = (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) S_r^* \tan \phi' \quad (11)$$

که در آن، τ_{us} مقاومت خاک غیراشباع، S_r^* درجه‌ی اشباع خاک، و K ثابت عددی است. بنابراین، در سطح مشترک جبهه‌ی ترشونده با لایه‌ی خاک زیرین، مقاومت برشی به‌میزان کمینه است و با توجه به میزان رطوبت اولیه‌ی بستر و همچنین سرعت جریان، گسیختگی توده‌ای می‌تواند از این محل آغاز شود.^[۷۲] در نتیجه، عمق نفوذ رواناب به داخل بستر، که برابر با متوسط فاصله‌ی سطح بستر از جبهه‌ی ترشونده است، را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه و حجم خاکی که احتمال دارد دچار فرسایش توده‌ای شود، را تعیین کرد:

$$e_{ni} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} S \sqrt{t} - \dot{e}_s t \, dt \quad (12)$$

که در آن، e_{ni} عمق نفوذ، T_0 گام زمانی، S میزان جذب آب توسط خاک به‌علت وجود موینگی^{۲۱}، و $\dot{e}_s$ نرخ آبشستگی است.

سانگ و همکاران (۲۰۲۴)^[۷۲] فرآیند وقوع فرسایش توسط رواناب جاری بر روی یک بستر ماسه‌ای غیراشباع دارای زاویه‌ی شیب متغیر را با رویکرد آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج مشاهده‌های آن‌ها نشان داد میزان آبشستگی، مستقل از رطوبت اولیه‌ی بستر است؛ چرا که هنگام عبور جریان از روی بستر، لایه‌ی سطحی که در آن آبشستگی رخ می‌دهد، به سرعت اشباع می‌شود. در مقابل، میزان رطوبت بستر در تعیین میزان فرسایش توده‌ای نقش مهمی را ایفا می‌کند. افزایش رطوبت، باعث کاهش نرخ و عمق نفوذ می‌شود. از طرفی، اگر رطوبت بحرانی، میزان رطوبتی تعریف شود که در آن نرخ نفوذ جریان به داخل خاک با نرخ آبشستگی برابر می‌شود، هنگامی که رطوبت بستر کمتر از این مقدار بحرانی است، نفوذ رواناب به داخل بستر، سریع‌تر از نرخ آبشستگی خواهد بود. بنابراین، جبهه‌ی ترشونده به سمت سطح زیرین خاک بستر پیشروی و سطح تماس ضعیفی را ایجاد می‌کند، که مستعد گسیختگی است. در حالی که با تجاوز رطوبت از مقدار رطوبت بحرانی، قابلیت جذب آب توسط خاک کاهش می‌یابد و نرخ نفوذ کمتر از نرخ وقوع آبشستگی می‌شود؛ بنابراین، سطح تماس ضعیف میان جبهه‌ی ترشونده و لایه‌ی خاک زیرین تشکیل نمی‌شود و فرسایش توده‌ای رخ نمی‌دهد. نتیجه‌ی اخیر نشان می‌دهد که در مطالعات موجود، که

شیب کانال‌های طبیعی، پیوسته در حال تغییر است و در بسیاری از موارد، مورفولوژی بستر به‌صورت مقعر، محدب، یا ترکیبی است. علاوه بر این، باید توجه کرد در نظر گرفتن بستر صلب برای مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس به‌منظور تحلیل خصوصیات دینامیکی جریان‌های واریزه‌ای، نتایج متفاوتی از آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد را ارائه می‌کند؛ زیرا در کانال‌های طبیعی، فرسایش بستر خاکی باعث افزایش حجم جریان می‌شود و عمق جریان واریزه‌ای نیز به تبع آن، افزایش می‌یابد. بنابراین، وجود بستر صلب در مدل‌های فیزیکی در جهت اطمینان نیست.

یکی از محدودیت‌های اصلی در متون فنی موجود، صرف‌نظر از وجود هوا در جریان و اشباع در نظر گرفتن جریان‌های واریزه‌ای است. این فرض، در شیب‌های تند و برای جریان‌های غیراشباع مصداق ندارد؛ زیرا در چنین مواردی، علاوه بر نوسان‌های فشار آب منفذی، فشار هوای منفذی نیز در چگونگی توسعه‌ی جریان و تعیین نقطه‌ی حدودی توقف آن مؤثر است؛ و در نتیجه، لازم است که نوسان‌های فشار هوای منفذی نیز در تحلیل‌ها لحاظ شوند. این تذکر نیز لازم است که دینامیک و سرعت قابل توجه جریان‌های واریزه‌ای، باعث می‌شود متغیرهای مستقل تنش به‌صورت موضعی، پیوسته در حال تغییر باشند و این موضوع، مدل‌سازی عددی را با چالش‌های متعددی مواجه می‌کند. یک راه-حل ممکن، مدل‌سازی با استفاده از روش نقطه‌ی ماده (MPM)^{۲۲} است. روش MPM، مبتنی بر دیدگاه ترکیبی اولی‌ری-لاگرانژی است و معمولاً برای مدل‌سازی پدیده‌هایی که تغییرشکل‌های بسیار بزرگ را تجربه می‌کنند، استفاده می‌شود.^[۷۴ و ۷۵] با این حال، نوسان‌های عددی در MPM، می‌تواند منجر به ناپایداری روش حل و تولید نتایج نادرست شود.^[۲۷] دکارلوچیو^{۲۳} و همکاران (۲۰۲۴)،^[۲۷] فیزیک رفتاری جریان ناشی از گسیختگی یک توده‌ی غیراشباع و وقوع فرسایش و رسوب‌گذاری در طول مسیر را با استفاده از روش MPM بررسی کرده‌اند؛ اما مدل آن‌ها، قابلیت لحاظ تغییرات فاز گاز در جریان را نداشته و فشار گاز، در طول فرآیند ثابت فرض شده است. بنابراین، با توجه به لزوم توجه به توسعه و تغییر فشار منفذی هوا و محدودیت‌های روش‌های عددی موجود، توسعه‌ی چارچوب‌های نظری مرتبط را می‌توان به‌عنوان افق آتی پژوهش‌های پیش‌رو مدنظر قرار داد.

از سوی دیگر، با توجه به اینکه تلاطم جریان‌های متراکم نسبت به جریان‌های دارای فاز سیال غالب کمتر است و در نتیجه قدرت تخریب کمتری دارند؛ تاکنون، تمرکز عمده‌ی پژوهش‌ها بر جریان‌های سریع و مخرب بوده است. با این حال، جریان‌های متراکم در کنار دره‌ها و حاشیه‌ی ارتفاع‌های در حال فرسایش، که در آن‌ها سنگ و خاک توسط فرآیندهای هوازدگی سست می‌شوند و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند، مشاهده می‌شوند.^[۱۲] و بررسی رفتار آن‌ها مهم است. سانگ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۳] برای اولین بار، رفتار جریان‌های اخیر را هنگام برخورد به موانع در آزمایشگاه بررسی کرده‌اند؛ اما آزمون‌های آن‌ها، برخلاف آنچه در طبیعت رخ می‌دهد، با استفاده از ریزکره‌های شیشه‌ای با ابعاد یکسان انجام شده است. علاوه بر این، در رابطه‌ی پیشنهادی آن‌ها برای محاسبه‌ی نیروی وارد بر مانع، برآورد ارتفاع رسوب‌های انباشته‌شده در بالادست مانع با اعمال نوسان‌های فشار سیال منفذی لازم است؛ که در حال حاضر، چنین مدلی برای محاسبه‌ی ارتفاع رسوب، که بسیار مهم است، وجود ندارد.

همچنین، فرض نظریه‌های فعلی، وجود بستر کاملاً اشباع هنگام وقوع فرسایش

است،^[۵۶] با این حال، بستر کاملاً اشباع، بندرت در طبیعت مشاهده می‌شود. در نتیجه، مطالعات فعلی در ارتباط با تأثیر بستر غیراشباع در فرآیند فرسایش، بسیار محدود هستند و از فرسایشی که توسط بدنه و دنباله‌ی جریان ایجاد می‌شود، چشم‌پوشی کرده‌اند. علاوه بر این، دانش فعلی درخصوص تأثیر فاز سیال و نوسان‌های فشار منفذی جریان‌های واریزه‌ای بر فرسایش بستر غیراشباع بسیار محدود است و تمرکز عمده‌ی مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه بر جریان‌های دانه‌ای خشک بوده است.

جمع‌بندی یافته‌ها از متون فنی موجود نشان می‌دهد که در مدل‌های فعلی، محاسبه‌ی حجم فرسایش از اعمال تأثیر ترکیب مصالح بستر در فرآیند فرسایش صرف‌نظر شده است. در حالی که ترکیب بستر، خصوصاً میزان رس، در نوسان‌های فشار منفذی و میزان فرسایش تأثیرگذار است. در نتیجه، به توسعه‌ی مدلی که بتواند با لحاظ تأثیر توأم ترکیب جریان و ترکیب بستر غیراشباع، حجم فرسایش را برآورد کند، نیاز است.

از طرفی، تمرکز بیشتر پژوهش‌های پیشین بر مطالعه‌ی فرآیند آبشستگی بستر در اثر عبور جریان‌های واریزه‌ای بوده و دانش فعلی درخصوص فرآیند وقوع فرسایش توده‌ای بستر، بسیار محدود است. براساس نتایج مطالعه‌ی سانگ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۷۲] می‌توان استنباط کرد که وقوع فرسایش توده‌ای و حجم آن، به شیب بستر، سرعت جریان، میزان رطوبت بستر، و نفوذپذیری مصالح آن وابسته است. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده، کیفی و براساس مشاهدات آزمایشگاهی بوده و جریان رواناب نیز منحصر از آب خالص به‌وجود آمده است. از سوی دیگر، تحلیل کمی نیازمند اندازه‌گیری تغییرات رطوبت بستر است، که ابزارگذاری در آن با محدودیت‌ها و چالش‌های متعددی مواجه است. بنابراین، در مطالعات آتی، نیاز به توسعه‌ی مدل‌های عددی برای پیش‌بینی فرآیند وقوع فرسایش در بسترهای غیراشباع با اعمال تأثیر توأم خصوصیات هیدرولوژیکی و مکانیکی است.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به مرور فیزیک رفتاری جریان‌های واریزه‌ای برخی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار در قدرت تخریب جریان‌های واریزه‌ای و چالش‌های پیش‌رو پرداخته شده و این نتایج کلیدی به‌دست آمده است:

۱- تلاطم و میزان مسافت طی‌شده‌ی جریان‌های واریزه‌ای، به نوسان‌های فشار منفذی وابسته است. اگر زمان لازم برای محوشدن فشار سیال منفذی جریان کوتاه‌تر از زمان توسعه و گسترش جریان باشد، افزایش اصطکاک ذرات خاک با بستر، باعث کاهش مسافت طی‌شده می‌شود. در صورتی که محوشدن فشار سیال منفذی، طولانی‌تر از مدت توسعه و گسترش جریان باشد، جریان روان به طی مسافت‌های طولانی ادامه می‌دهد و در صورت برابری این دو زمان با یکدیگر، فشار سیال منفذی تا زمان رسیدن به منطقه‌ی رسوب‌گذاری دوام خواهد داشت. در این حالت، اندرکنش فاز سیال و جامد، نقش مهمی در تفسیر رفتار جریان واریزه‌ای ایفا می‌کند.

۲- در ساختگاه‌های دارای خاک شل، اگر تراکم سریع‌تر از خروج سیال منفذی رخ دهد، جاری‌شدن مصالح بستر و وقوع جریان واریزه‌ای محتمل است. از سوی دیگر، در ساختگاه با بستر متراکم، در صورتی که در حین گسیختگی، بارندگی یا رواناب وجود نداشته باشد، خاک بستر اتساع و سپس در تغییرمکان‌های بسیار بزرگ، تراکم، افزایش موقت فشار سیال منفذی، و درنهایت جاری‌شدن

غیرواقع‌گرایانه است. نرخ وقوع فرسایش، در بسترهای مرطوب بسیار سریع‌تر از نرخ وقوع آن در بسترهای خشک است. همچنین، سرعت جریان واریزه‌ای و اندازه‌ی حرکت آن در بسترهای غیراشباع، به مراتب بیشتر از بسترهای خشک است.

۶- میزان رطوبت اولیه‌ی بستر، نقشی در مقدار آبشستگی ندارد؛ چرا که لایه‌ی سطحی بستر به سرعت اشباع می‌شود. در مقابل، برای تعیین حجم فرسایش توده‌ای، باید رطوبت اولیه‌ی بستر غیراشباع را مدنظر قرار داد. در رطوبت‌های کمتر از رطوبت بحرانی، تشکیل سطح تماس ضعیف میان جبهه‌ی ترشونده با خاک زیرین، احتمال وقوع فرسایش توده‌ای را افزایش می‌دهد. در حالی که در رطوبت‌های بیشتر از رطوبت بحرانی، این سطح تماس ضعیف تشکیل نمی‌شود و بنابراین، فرسایش توده‌ای رخ نخواهد داد.

را تجربه می‌کند. در غیر این صورت، نفوذ آب به داخل توده‌ی در حال گسیختگی، اثر اتساع خنثی و منجر به وقوع جریان می‌شود.

۳- مورفولوژی و تغییرات شیب بستر، نقش تعیین‌کننده‌ای در حجم فرسایش دارند. میزان فرسایش بستر در شیب‌های یکنواخت، به مراتب از بسترهای دارای شیب طولی متغیر، کمتر است.

۴- جریان‌های واریزه‌ای، به دو دسته‌ی جریان‌های کاملاً اشباع و جریان‌های غیراشباع تقسیم می‌شوند. جریان‌های اشباع، در شیب‌های ملایم مشاهده می‌شوند، در حالی که جریان‌های غیراشباع، در شیب‌های تند رخ می‌دهند و در آن‌ها نمی‌توان وجود هوا را نادیده گرفت.

۵- فرض وجود بستر اشباع در بیشتر مدل‌های برآورد حجم فرسایش، فرضی

References – منابع

- Hungr, O., McDougall, S. and Bovis, M., 2005. *Entrainment of Material by Debris Flows*, In *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, Springer Praxis Books, pp.135-158, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_7.
- Iverson, R.M., 2014. Debris flows: behaviour and hazard assessment. *Geology Today*, 30(1), pp.15-20. DOI: <https://doi.org/10.1111/gto.12037>.
- Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), pp.245-296. DOI: <https://doi.org/10.1029/97RG00426>.
- Iverson, R.M., Reid, M.E., Logan, M., LaHusen, R.G., Godt, J.W. and Griswold, J.P., 2011. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment. *Nature Geoscience*, 4(2), pp.116-121. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1040>.
- Iverson, R.M., 2005. Debris-flow mechanics. *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, 8, pp.105-134. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_6.
- Tian, S., Hu, G., Chen, N., Rahman, M., Han, Z., Somos-Valenzuela, M. and Maurice Habumugisha, J., 2022. Extreme climate and tectonic controls on the generation of a large-scale, low-frequency debris flow. *Catena*, 212, pp.106086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106086>.
- Hirschberg, J., Fatichi, S., Bennett, G.L., McArdeil, B.W., Peleg, N., Lane, S.N., Schlunegger, F. and Molnar, P., 2021. Climate change impacts on sediment yield and debris-flow activity in an alpine catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(1), pp.e2020JF005739. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JF005739>.
- Wang, D., Chen, Z., He, S., Liu, Y. and Tang, H., 2018. Measuring and estimating the impact pressure of debris flows on bridge piers based on large-scale laboratory experiments. *Landslides*, 15, pp.1331-1345. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0944-x>.
- Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hübl, J., Miyata, S., Smith, J.B. and Yin, H.Y., 2019. Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199, pp.102981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>.
- Lin, C.W., Shieh, C.L., Yuan, B.D., Shieh, Y.C., Liu, S.H. and Lee, S.Y., 2004. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan. *Engineering Geology*, 71(1-2), pp.49-61. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00125-X).
- Sato, H.P. and Harp, E.L., 2009. Interpretation of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008, M7. 9 Wenchuan earthquake in the Beichuan area, Sichuan Province, China using satellite imagery and Google Earth. *Landslides*, 6, pp.153-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0147-6>.
- Iverson, R.M., Reid, M.E. and LaHusen, R.G., 1997. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1), pp.85-138. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.85>.
- Bogaard, T.A. and Greco, R., 2016. *Landslide hydrology: from hydrology to pore pressure*. Wiley

- Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), pp.439-459. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1126>.
14. Gregoret, C., Degetto, M., Bernard, M., Crucil, G., Pimazzoni, A., De Vido, G., Berti, M., Simoni, A. and Lanzoni, S., 2016. Runoff of small rocky headwater catchments: Field observations and hydrological modeling. *Water Resources Research*, 52(10), pp.8138-8158. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016WR018675>.
 15. Pierson, T.C., 2020. Flow Behavior of Channelized Debris Flows, Mount St. Helens, Washington, In *Hillslope Processes*, A.D. Abrahams, pp.269-296, Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003028840-13>.
 16. De Haas, T., McArdell, B.W., Nijland, W., Åberg, A.S., Hirschberg, J. and Huguenin, P., 2022. Flow and bed conditions jointly control debris-flow erosion and bulking. *Geophysical Research Letters*, 49(10), pp. e2021GL097611. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL097611>.
 17. Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G. and Berti, M., 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3), pp.2009JF001514. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009JF001514>.
 18. Pouliquen, O., Delour, J. and Savage, S.B., 1997. Fingering in granular flows. *Nature*, 386(6627), pp.816-817. DOI: <https://doi.org/10.1038/386816a0>.
 19. Tiranti, D., Bonetto, S. and Mandrone, G., 2008. Quantitative basin characterisation to refine debris-flow triggering criteria and processes: an example from the Italian Western Alps. *Landslides*, 5, pp.45-57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0101-4>.
 20. Hürlimann, M., McArdell, B.W. and Rickli, C., 2015. Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. *Geomorphology*, 232, pp.20-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.030>.
 21. McCoy, S.W., Kean, J.W., Coe, J.A., Staley, D.M., Waskiewicz, T.A. and Tucker, G.E., 2010. Evolution of a natural debris flow: In situ measurements of flow dynamics, video imagery, and terrestrial laser scanning. *Geology*, 38(8), pp.735-738. DOI: <https://doi.org/10.1130/G30928.1>.
 22. D'Agostino, V., Cesca, M. and Marchi, L., 2010. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 115(3-4), pp.294-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.032>.
 23. Tayyebi, S.M., Pastor, M. and Stickle, M.M., 2021. Two-phase SPH numerical study of pore-water pressure effect on debris flows mobility: Yu Tung debris flow. *Computers and Geotechnics*, 132, pp.103973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103973>.
 24. Johnson, C.G., Kokelaar, B.P., Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G. and Gray, J.M.N.T., 2012. Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1), pp.2011JF002185. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JF002185>.
 25. Coussot, P., 1995. Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for clay-water suspensions. *Physical Review Letters*, 74(20), pp.3971. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3971>.
 26. Takayama, S., Karasawa, R. and Imaizumi, F., 2024. Depth-averaged mixture model for development processes of debris flows over a steep unsaturated mobile bed. *Landslides*, pp.1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02202-8>.
 27. Di Carluccio, G., Pinyol, N.M., Alonso, E.E. and Hürlimann, M., 2024. Liquefaction-induced flow-like landslides: The case of Valarties (Spain). *Géotechnique*, 74(4), pp.307-324. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00112>.
 28. Zheng, H., Niu, W., Mao, W. and Huang, Y., 2024. Effect of gravity on granular material flows. *Computers and Geotechnics*, 170, pp.106328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106328>.
 29. Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, pp.167-194. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
 30. Song, D., Bai, Y., Chen, X.Q., Zhou, G.G., Choi, C.E., Pasuto, A. and Peng, P., 2022. Assessment of debris flow multiple-surge load model based on the physical process of debris-barrier interaction. *Landslides*, 19(5), pp.1165-1177. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01778-3>.
 31. Bowman, E.T., Laue, J., Imre, B. and Springman, S.M., 2010. Experimental modelling of debris flow behaviour using a geotechnical centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(7), pp.742-762. DOI: <https://doi.org/10.1139/T09-141>.
 32. Iverson, R.M. and George, D.L., 2014. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2170), pp.20130819. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0819>.

33. Song, D., Chen, X., Sadeghi, H., Zhong, W., Hu, H. and Liu, W., 2023. Impact behavior of dense debris flows regulated by pore-pressure feedback. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(12), pp.e2023JF007074. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023JF007074>.
34. Major, J.J., 2000. Gravity-driven consolidation of granular slurries: implications for debris-flow deposition and deposit characteristics. *Journal of Sedimentary Research*, 70(1), pp.64-83. DOI: <https://doi.org/10.1306/2DC408FF-0E47-11D7-8643000102C1865D>.
35. Zheng, H., Shi, Z., Kaitna, R., Zhao, F., de Haas, T. and Hanley, K.J., 2023. Control mechanisms of pore-pressure dissipation in debris flows. *Engineering Geology*, 317, pp.107076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107076>.
36. Major, J.J. and Iverson, R.M., 1999. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), pp.1424-1434. DOI: [https://doi.org/10.1130/00167606\(1999\)111<1424:DFD EOP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/00167606(1999)111<1424:DFD EOP>2.3.CO;2).
37. Gong, X.L., Chen, X.Q., Chen, J.G. and Song, D.R., 2023. Effects of material composition on deposition characteristics of runoff-generated debris flows. *Landslides*, 20(12), pp.2603-2618. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02129-0>.
38. De Haas, T., Braat, L., Leuven, J.R.F.W., Lokhorst, I.R. and Kleinhans, M.G., 2015. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *JGR Earth Surface*, 120, pp.1949-1972. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JF003525>.
39. Atkinson, J., 1993. An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations: Through Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd.
40. Das, B.M., 2019. Advanced Soil Mechanics, CRC press.
41. Fleming, R.W., Ellen, S.D. and Algu, M.A., 1989. Transformation of dilative and contractive landslide debris into debris flows—an example from Marin County, California. *Engineering Geology*, 27(1-4), pp.201-223. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(89\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(89)90034-3).
42. Iverson, R.M., Reid, M.E., Iverson, N.R., LaHusen, R.G., Logan, M., Mann, J.E. and Brien, D.L., 2000. Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity. *Science*, 290(5491), pp.513-516. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.290.5491.513>.
43. Moore, P.L. and Iverson, N.R., 2002. Slow episodic shear of granular materials regulated by dilatant strengthening. *Geology*, 30(9), pp.843-846. DOI: [https://doi.org/10.1130/00917613\(2002\)030<0843:SES OGM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/00917613(2002)030<0843:SES OGM>2.0.CO;2).
44. Iverson, R.M., 2005. Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F2), pp.2004JF000268. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004JF000268>.
45. Anderson, S.A. and Sitar, N., 1995. Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp.544-552. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1995\)121:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1995)121:7(544)).
46. Iverson, R.M. and LaHusen, R.G., 1989. Dynamic pore-pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials. *Science*, 246(4931), pp.796-799. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.246.4931.796>.
47. Fuchu, D., Lee, C.F. and Sijing, W., 1999. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology*, 51(4), pp.279-290. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00047-7).
48. Budhu, M., 2011. Soil Mechanics and Foundations, 3rd Ed., Wiley, New York.
49. Wang, G., Sassa, K. and Fukuoka, H., 2003. Downslope volume enlargement of a debris slide—debris flow in the 1999 Hiroshima, Japan, rainstorm. *Engineering Geology*, 69(3-4), pp.309-330. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00289-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00289-2).
50. Iverson, R.M. and Ouyang, C., 2015. Entrainment of bed material by Earth-surface mass flows: Review and reformulation of depth-integrated theory. *Reviews of Geophysics*, 53(1), pp.27-58. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013RG000447>.
51. Pudasaini, S.P. and Krautblatter, M., 2021. The mechanics of landslide mobility with erosion. *Nature Communications*, 12(1), pp.6793. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26959-5>.
52. Song, P. and Choi, C.E., 2021. Revealing the importance of capillary and collisional stresses on soil bed erosion induced by debris flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(5), pp.e2020JF005930. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JF005930>.
53. Medina, V., Hürlimann, M. and Bateman, A., 2008. Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5(1), pp.127-142. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0102-3>.

54. Berger, C., McArdell, B.W. and Schlunegger, F., 2011. Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F1), pp.n/a-n/a. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JF001722>.
55. McDougall, S. and Hungr, O., 2005. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), pp.1437-1448. DOI: <https://doi.org/10.1139/t05-064>.
56. Choi, C.E. and Song, P., 2023. New unsaturated erosion model for landslide: Effects of flow particle size and debunking the importance of frictional stress. *Engineering Geology*, 315, pp.107024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107024>.
57. Iverson, R.M., 2012. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3). DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JF002189>.
58. McCoy, S.W., Kean, J.W., Coe, J.A., Tucker, G.E., Staley, D.M. and Wasklewicz, T.A., 2012. Sediment entrainment by debris flows: In situ measurements from the headwaters of a steep catchment. *J. Geophys. Res.*, 117, pp.2011JF002278. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JF002278>.
59. Hu, W., Van Asch, T.W., Zheng, Y., Li, Y., Xu, Q., Huang, R. and McSaveny, M., 2022. Unraveling the effect of a two-layer system on the mobility of rapid gravitational flows. *Engineering Geology*, 297, pp.106481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106481>.
60. Hu, W., Zheng, Y., McSaveny, M., Xu, Q. and van Asch, T., 2023. Fluidization of bed material caused by shear thinning during rock avalanche entrainment: Insights from flume tests and rheological experiments. *Engineering Geology*, 325, pp.107276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107276>.
61. Hungr, O. and Evans, S.G., 2004. Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism. *Geological Society of America Bulletin*, 116(9-10), pp.1240-1252. DOI: <https://doi.org/10.1130/B25362.1>.
62. An, H., Ouyang, C., Wang, F., Xu, Q., Wang, D., Yang, W. and Fan, T., 2022. Comprehensive analysis and numerical simulation of a large debris flow in the Meilong catchment, China. *Engineering Geology*, 298, pp.106546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106546>.
63. Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D. and Barbour, S.L., 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), pp.440-448. DOI: <https://doi.org/10.1139/t96-065>.
64. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W., 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), pp.379-392. DOI: <https://doi.org/10.1139/t96-060>.
65. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R., 1977. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, 103(5), pp.447-466. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000423>.
66. Lu, N., 2008. Is matric suction a stress variable?. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7), pp.899-905. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:7\(899\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(899)).
67. Roelofs, L., Nota, E.W., Flipsen, T.C., Colucci, P. and de Haas, T., 2023. How bed composition affects erosion by debris flows—An experimental assessment. *Geophysical Research Letters*, 50(14), pp.e2023GL103294. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023GL103294>.
68. Baggio, T., Mergili, M. and D'Agostino, V., 2021. Advances in the simulation of debris flow erosion: The case study of the Rio Gere (Italy) event of the 4th August 2017. *Geomorphology*, 381, pp.107664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107664>.
69. Li, P., Wang, J., Hu, K. and Xie, J., 2024. Shedding effects of sediment composition and bed morphology on debris flow dynamics and entrainment mechanism: Insights from laboratory experiments. *Engineering Geology*, pp.107495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107495>.
70. Chen, J., Zhang, W., Cao, C., Yin, H., Wang, J., Li, W. and Zheng, Y., 2024. The effect of the check dam on the sediment transport and control in debris flow events. *Engineering Geology*, 329, pp.107397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107397>.
71. Zheng, H., Hu, X., Shi, Z., Shen, D. and De Haas, T., 2024. Deciphering controls of pore-pressure evolution on sediment bed erosion by debris flows. *Geophysical Research Letters*, 51(5), pp. e2024GL108583. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024GL108583>.
72. Song, P., Yang, J., Choi, C.E. and Zhang, J., 2024. Experimental investigation on scouring vs Mass failure of unsaturated soil bed: Implications for debris flow initiation and erosion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(4), pp. e2023JF007275. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023JF007275>.

73. Iverson, R.M., 2015. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments. *Geomorphology*, 244, pp.9-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.033>.
74. Yerro, A., Alonso, E.E. and Pinyol, N.M., 2015. The material point method for unsaturated soils. *Géotechnique*, 65(3), pp.201-217. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.14.P.163>.
75. Li, Y., Zhang, J.M. and Wang, R., 2024. An explicit material point and finite volume sequentially coupled method for simulating large deformation problems in saturated soil. *Computers and Geotechnics*, 170, pp.106270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106270>.



Research Note

Providing a Pricing Model for Shuttle Taxi Services in Isfahan City

Aamin Najafi¹, Amir Masoud Rahimi^{*2} and Mohsen Aboutalebi Isfahani³

¹. Faculty of Civil Engineering, Road and Transportation Engineering, Islamic Azad University, Najaf Abad branch.

². Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

³. Department of Railway Engineering and Transportation Planning, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

* corresponding author:(amrahimi@znu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 4 November 2023

Revised: 4 May 2024

Accepted: 12 May 2024

Keywords:

Taxi,
fare,
modeling,
pricing.

Abstract

In the city of Isfahan, taxi lines, as one of the most widely used methods of public transportation, make a significant contribution to the daily movement of people. The current fares are set in a way that not only do they not meet the costs of the service providers, but also lead to the dissatisfaction of the drivers and passengers. Therefore, the necessity of revising the pricing system of shuttle taxi services in order to fully cover the costs, the profit of the drivers, and the satisfaction of the passengers is clearly felt. This research is based on the assumptions that form its basis, including the lack of response of the current fares to the costs of providing taxi services and the failure to consider the time parameter in the pricing of taxi services. The main goal of this research is to determine pricing in a way that covers all the costs of providing the service, along with a certain profit for the taxi providers. The research method in this study focuses on price modeling based on the final cost method. First, the parameters affecting the price have been identified, and then the contribution of each parameter to the total cost has been determined. In the following, the navigation cost for each kilometer is calculated, and finally, a price model that includes all costs along with 20% profit for four different modes of operating a shuttle taxi is presented. Taxi fares are calculated based on the distance and travel time of passengers, and different pricing strategies are used for different hours to manage demand. This strategy sets prices higher during peak hours and lower during off-peak hours to help manage demand. This method will encourage people to use taxis during off-peak hours, and at the same time, the promotion of drivers to provide services during high-traffic hours will remain. The results of this research provide valuable insight into the pricing dynamics of taxi services in different conditions and based on the length of different routes. For example, the cost of traveling by Samand taxi is 32183 riyals per kilometer. Also, in the conditions of traffic congestion, the increase in the cost of each kilometer of travel has been calculated to be 38016 Riyals. These results show that for long distances, such as the Bozorgmehr Bridge-Khorasgan University, the current fares are not enough to cover the costs.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:

Najafi, A., Rahimi, A.M. and Aboutalebi Isfahani, M. 2025. Providing a pricing model for shuttle taxi services in Isfahan city, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 104-113. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.63375.3270>

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the [CC-BY 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



ارائه مدل قیمت‌گذاری برای خدمات تاکسی خطی در شهر اصفهان

امین نجفی^۱، امیرمسعود رحیمی^{۲*} و محسن ابوطالبی اصفهانی^۳^۱ گروه عمران گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد^۲ گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان^۳ گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

*نویسنده مسئول (amrahimi@znu.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، نظام قیمت‌گذاری فعلی تاکسی خطی در شهر اصفهان بررسی و به دلیل عدم تناسب با هزینه‌ها و نارضایتی مسافران، نیاز به بازنگری آن آشکار شده است. هدف پژوهش حاضر، ارائه مدلی برای قیمت‌گذاری است، که ضمن پوشش کامل هزینه‌ها، سودی را نیز برای رانندگان در نظر بگیرد. روش پژوهش مبتنی بر مدل‌سازی قیمت براساس روش هزینه‌ی نهایی بوده و پارامترهای مؤثر در قیمت‌شناسایی و سهم هر یک در کل هزینه‌ها مشخص شده است. سپس، هزینه‌ی پیمایش برای هر کیلومتر محاسبه و در نهایت، مدلی برای قیمت‌گذاری ارائه شده است، که شامل تمام هزینه‌ها و ۲۰٪ سود برای ۴ حالت مختلف بهره‌برداری از تاکسی خطی است. کرایه‌ی تاکسی براساس مسافت و زمان سفر مسافران محاسبه و برای مدیریت تقاضا، از راهبرد قیمت‌گذاری متفاوت برای ساعت‌های مختلف استفاده می‌شود. راهبرد موردنظر، قیمت‌ها را در ساعت‌های اوج بالاتر و در ساعت‌های غیراوج پایین‌تر تنظیم می‌کند تا به مدیریت تقاضا کمک کند. نتایج نشان داده‌اند که هزینه‌ی هر کیلومتر سفر با تاکسی سمند، ۳۲۱۸۳ ریال بوده و برای جبران هزینه در شرایط شلوغی ترافیک، افزایش هزینه‌ی هر کیلومتر پیمایش به ۳۸۰۱۶ ریال محاسبه شده است. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که در مسافت‌های طولانی، مانند پل بزرگمهر-دانشگاه خوارسگان، کرایه‌های فعلی برای پوشش هزینه‌ها کافی نیستند. پژوهش حاضر، بینش ارزشمندی درباره‌ی پویایی قیمت‌گذاری خدمات تاکسی در شرایط مختلف و براساس طول مسیرهای متفاوت ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مسئولان مرتبط در جهت اصلاح نظام قیمت‌گذاری تاکسی خطی در شهر اصفهان استفاده شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳
تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

واژگان کلیدی:

تاکسی،
کرایه‌ی حمل،
مدل‌سازی،
قیمت‌گذاری.

۱. مقدمه

با ادامه‌ی رشد شهرنشینی، تقاضا برای گزینه‌های حمل‌ونقل کارآمد و مقرون‌به‌صرفه در حال افزایش است. خدمات تاکسی به‌عنوان یک سامانه‌ی حمل‌ونقل شبه‌همگانی در ایران، نقش مهمی در برآورد تقاضای مذکور ایفا می‌کند. در مواجهه با افزایش تقاضا برای سفر، تاکسی‌ها به‌دلیل راحتی در بین مردم محبوب هستند. تاکسی‌های خطی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین وسائط حمل‌ونقل عمومی در شهرها، نقش حیاتی در ارتباط‌های شهری و رفاه شهروندان دارند. از آنجا که سامانه‌های مذکور، بخش مهمی از زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری را تشکیل می‌دهند، مدل‌های قیمت‌گذاری مناسب برای خدمات تاکسی خطی بسیار حائز اهمیت هستند. در این راستا، ارائه مدل‌های قیمت‌گذاری مناسب و منطبق با شرایط محلی، علاوه بر بهبود اقتصادی و عملکرد سامانه‌های اشاره‌شده، به بهبود کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی و بهبود زندگی شهروندان کمک می‌کند.^[۱-۳] در مطالعه‌ای که توسط سازمان تاکسیرانی اصفهان انجام شده است، ۲۹/۹۶٪ پاسخ‌دهنده‌ها در هفته تا ۵

مرتبه و بیش از ۶۰٪ آن‌ها در هفته بیش از ۵ مرتبه از تاکسی استفاده می‌کنند، و ۶۷٪ آن‌ها نیز استفاده از تاکسی خطی را ترجیح می‌دهند.^[۴] تاکسی‌های خطی در اصفهان در قالب ۷۶ خط و به طول تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتر فعالیت می‌کنند. در شهر اصفهان در ساعت‌های اوج صبح و ظهر و مخصوصاً اوایل شب، که تقاضای سفر بالاست، برخی از تاکسی‌ها از شبکه خارج می‌شوند؛^[۵] این مطلب بیانگر آن است که در محاسبه‌های کرایه‌ی تاکسی، تأثیر زمان سفر مشاهده نشده است.

در بیشتر خطوط، تاکسی‌ها فقط هنگام پرشدن ظرفیت حرکت می‌کنند و فقط مسافرانی را سوار می‌کنند که در انتهای خط قصد پیاده‌شدن دارند. در نتیجه، بیشتر مسافران بین‌راهی با تاکسی‌های پر مواجه می‌شوند و زمان زیادی باید معطل بمانند تا سرویس دریافت کنند. همچنین مسافرانی که قصد سفرهای کوتاه‌تری دارند، معمولاً باید زمان انتظار زیادی تحمل کنند یا مجبور می‌شوند، خدمات را در ازاء پرداخت کامل کرایه‌ی مسیر دریافت کنند.^[۶]

استناد به این مقاله:

نجفی، امین، رحیمی، امیرمسعود و ابوطالبی اصفهانی، محسن، ۱۴۰۴. ارائه مدل قیمت‌گذاری برای خدمات تاکسی خطی در شهر اصفهان. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص ۱۱۳-۱۰۴. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.63375.3270>



عواملی، مانند: هزینه‌های عملیاتی، تقاضای بازار، رقابت، و رضایت مشتری ایجاد کنند. در ادامه، بخشی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه ارائه شده است.

دی بورگر^۱ و همکاران (۱۹۹۶)، با در نظر گرفتن مدل عرضه‌ی تابع تقاضا، به تعیین قیمت بهینه‌ی حمل‌ونقل شهری بلژیک پرداختند و دریافتند که قیمت‌گذاری بهینه، منجر به کاهش هزینه‌ی اجتماعی نهایی و افزایش تقاضا برای حمل‌ونقل عمومی می‌شود. در شرایط محدودیت بودجه، قیمت‌های بهینه برای کلیه‌ی حالت‌های حمل‌ونقل عمومی در هر دوره افزایش می‌یابد.^[۹]

دی بورگر و ووترز^۲ (۱۹۹۸)، مدل قبلی را توسعه داده و به منظور بهینه‌سازی قیمت‌ها، عرضه‌ی حمل‌ونقل عمومی، تعداد وسیله‌ی نقلیه‌ی همگانی، و زیرساخت‌های جاده‌ای را تابع هدفی شامل رفاه اجتماعی کل به اضافه‌ی خالص درآمدهای دولت در نظر گرفته‌اند. در مدل مذکور، عرضه‌ی حمل‌ونقل عمومی مستقیماً و با دو دسته متغیر زمان انتظار برای حمل‌ونقل عمومی و تعداد کل مسافر جابجا شده لحاظ شده است.^[۱۰]

کیم و هوانگ^۳ (۲۰۰۸)، با مدل‌سازی فرآیند ورود مشتریان به صورت فرآیند پواسون، مدلی ریاضی برای بهینه‌سازی سود با اعمال سیاست تخفیف افزایشی در کرایه‌ی تاکسی ارائه کردند و دریافتند که سیاست اخیر می‌تواند میانگین سود یک شرکت تاکسیرانی را افزایش دهد، اما اثربخشی آن به عواملی مانند کشش تقاضا و هزینه‌های عملیاتی بستگی دارد.^[۱۱]

پاری و تیمیسلینا^۴ (۲۰۱۰)، با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی تحلیلی، به بررسی قیمت‌گذاری بهینه برای حمل‌ونقل شهری در مکزیکوسیتی پرداختند و با لحاظ کردن هزینه‌های خارجی ناشی از آلودگی هوا، ازدحام، و تصادف‌ها، قیمت‌های بهینه را برای وسائط نقلیه‌ی شخصی، مینی‌بوس، اتوبوس، و قطار شهری تعیین کردند. نتایج نشان داده است که وضع مالیات بر بنزین به نسبت وضع عوارض بر روی خودروهای شخصی و اصلاح نرخ کرایه‌ی حمل‌ونقل همگانی، منجر به سطح رفاه بالاتری شده است.^[۱۲]

یانگ و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از داده‌های شهر هنگ‌کنگ، به بررسی آثار ساختار غیرخطی کرایه در بازارهای تاکسی براساس سود درک‌شده (سود موردانتظار راننده در واحد زمان) پرداخته و پیشنهاد کرده‌اند که برای کاهش صف تاکسی در مکان‌هایی مانند فرودگاه‌ها، با کاهش نرخ کرایه، به مشتریان تخفیف بیشتری داده شود.^[۱۳]

غلامی و همکاران (۱۳۹۳)، خطوط تاکسی در شهر تهران را براساس شاخص‌های توپوگرافی و هزینه‌ی خط دسته‌بندی و مدلی برای برآورد هزینه‌ها در هر مد ارائه کرده و دریافت‌اند که در حدود ۸۰٪ از خطوط، ون صرفه‌ی اقتصادی دارد. همچنین برای خطوط با طول متوسط ۲۲ کیلومتر، اتوبوس جایگزین مناسب‌تری است. در مجموع، نتایج حاکی از عدم صرفه‌ی اقتصادی تاکسی خطی در تهران و تناسب بیشتر قیمت ون و اتوبوس با شاخص قیمت تاکسی است.^[۱۴]

ژن و اورن^۵ (۲۰۱۴)، مفهوم قیمت‌گذاری تاکسی پویا را بررسی و آثار آن را

در سطح جهانی، مدل‌های مختلفی برای قیمت‌گذاری در حمل‌ونقل عمومی، به ویژه در حوزه‌ی تاکسی، از جمله: روش‌های ثابت قیمت، مبتنی بر فاصله، زمان، ترافیک، و ویژگی‌های سفر استفاده شده‌اند. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های نوین، مانند اپلیکیشن‌های تلفن همراه برای سفارش تاکسی و پرداخت الکترونیکی نیز به توسعه‌ی مدل‌های جدید قیمت‌گذاری کمک کرده‌اند. مدل‌های ذکرشده براساس شرایط اقتضاء محلی، نیازهای شهروندان و شرایط جغرافیایی متفاوت، تنظیم و بهبود یافته‌اند.^[۷ و ۸] ضروری است که در ابتدای پژوهش در پاسخ به این سؤال که کدام پارامترهای کلیدی در قیمت‌گذاری خدمات تاکسی تأثیر می‌گذارند؟، پارامترهای مذکور شناسایی شوند. با درک مؤلفه‌های مختلفی که در هزینه‌ی کلی سفر با تاکسی نقش دارند، می‌توان مدل قیمت‌گذاری دقیق‌تر و منصفانه‌تری ایجاد کرد، که هزینه‌های کامل بهره‌برداری به اضافه‌ی سود معینی برای ارائه‌کننده‌ی خدمات را تضمین کند. پس از شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر در کرایه‌ی تاکسی، سهم هر پارامتر در هزینه‌ی یک کیلومتر سفر تاکسی تعیین شده است. این روند شامل تجزیه و تحلیل داده‌ها از منابع مختلف، مانند گزارش‌های سازمان تاکسیرانی و مطالعه‌های موردی، برای تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر در ساختار کلی هزینه‌ی خدمات تاکسی بوده است.

سپس مدلی براساس طول پیمایش و زمان سفر به عنوان عوامل کلیدی در تعیین قیمت سفر تاکسی ایجاد شده است؛ که عواملی، مانند: تراکم ترافیک و سرعت سفر را در نظر می‌گیرد، و می‌تواند در هزینه‌ی کلی خدمات تاکسی تأثیر بگذارد. با گنجانیدن عوامل اخیر در مدل قیمت‌گذاری و در نظر گرفتن راهبردهای مناسب، می‌توان نمایش دقیق و منصفانه‌تری از هزینه‌ی واقعی سفر تاکسی ارائه و به مدیریت تقاضا کمک کرد. در چنین شرایطی، هم سرویس به اندازه‌ی کافی ارائه می‌شود، که در جهت رفاه مسافر است و هم راننده‌ی تاکسی و ارائه‌دهنده‌ی خدمات، سود معقول خواهند داشت، که تداوم سرویس‌دهی را تضمین می‌کند.

در ادامه، یک مدل قیمت‌گذاری برای ۴ حالت عملکرد مختلف خدمات تاکسی خطی براساس مکان سوار و پیاده شدن مسافر در طول مسیر ارائه شده‌اند. از مزایای مدل مذکور، کاربردی بودن آن و تضمین‌کننده بودن سود رانندگان در حالت‌های مختلف ارائه‌ی خدمت، مانند شرایط متفاوت آب و هوایی یا روزها و ساعت‌های متفاوت کاری است. پیش از ارائه‌ی مدل، دو فرضیه‌ی پژوهش تعریف شده‌اند: ۱) کرایه‌های فعلی خطوط تاکسی در اصفهان پاسخگوی هزینه‌های ارائه‌کننده‌ی خدمات نیستند؛ و ۲) نقش پارامتر زمان در کرایه‌های فعلی برای تاکسی خطی در نظر گرفته نشده است، که می‌تواند در برخی از مواقع بیشترین تأثیر را در قیمت کرایه داشته باشد. با فرض اینکه قیمت‌های مبنای محاسبه‌ها براساس قیمت‌های سال ۱۴۰۰ بوده است، در ادامه، به بررسی دو فرضیه‌ی اخیر پرداخته شده است.

۲. بررسی ادبیات و پیشینه‌ی پژوهش

قیمت‌گذاری خدمات تاکسی، نقشی اساسی در عملکرد پایدار و رقابت‌پذیری سیستم تاکسیرانی ایفا می‌کند؛ که مستقیماً در رفتار ارائه‌دهندگان خدمات و مسافران تأثیر می‌گذارد. راهبردهای قیمت‌گذاری باید تعادلی با در نظر گرفتن

⁴ Parry & Timilsina

⁵ Zeng & Oren

¹ De Borger

² De Borger & Wouters

³ Kim & Hwang

هدف مدل اخیر، کاهش هزینه‌های سفر برای مسافران و افزایش درآمد نهایی رانندگان بوده است. نتایج نشان داده‌اند که مدل مذکور در مقایسه با تاکسی‌های سنتی و Didi Express در لانژو چین، از نظر کاهش هزینه‌های سفر برای مسافران و افزایش درآمد نهایی برای رانندگان، عملکرد بهتری داشته‌اند.^[۲۲]

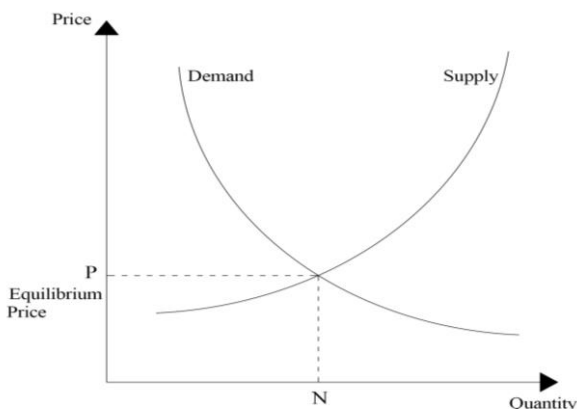
می‌توان مطالب ذکرشده را این‌گونه جمع‌بندی کرد که روش واحدی برای قیمت‌گذاری خدمات تاکسی وجود ندارد و قیمت‌گذاری خدمات آن‌ها، نقشی حیاتی در عملکرد پایدار و رقابت‌پذیری این سیستم ایفا می‌کند. این امر مستقیماً در رفتار ارائه‌دهندگان خدمات و مسافران تأثیر می‌گذارد. راهبردهای قیمت‌گذاری باید تعادلی را با در نظر گرفتن عواملی، مانند: هزینه‌های عملیاتی، تقاضای بازار، رقابت، و رضایت مشتری ایجاد کنند. مدل‌های مختلفی برای قیمت‌گذاری خدمات تاکسی وجود دارد، از جمله: مدل قیمت بهینه، مدل تخفیف، مدل قیمت‌گذاری پویا، مدل عدالت در قیمت‌گذاری، و مدل‌های اشتراک‌گذاری. با این حال هنوز به پژوهش‌های بیشتری در زمینه‌ی قیمت‌گذاری خدمات تاکسی نیاز است، به‌ویژه در زمینه‌ی مدل‌های مناسب برای شهرهای کوچک‌تر، تأثیر آلودگی و ترافیک در قیمت‌گذاری، و مدل‌های جدید قیمت‌گذاری، که پوشش‌دهنده‌ی تمام عوامل مؤثر در قیمت باشند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

از آنجایی که موضوع پژوهش حاضر در رابطه با اقتصاد حمل‌ونقل است، روش‌هایی که در پژوهش حاضر استفاده شده‌اند؛ روش‌های ریاضی مدل‌سازی اقتصادی و حمل‌ونقلی بوده‌اند. در ابتدا، به شناسایی عوامل مؤثر در قیمت پرداخته شده است. در ادامه، با توجه به هدف اصلی پژوهش (مدل‌سازی قیمت‌گذاری)، تئوری‌های اقتصادی نقش اصلی در پژوهش حاضر را داشته‌اند. در پژوهش حاضر از روش قیمت‌گذاری هزینه‌ی نهایی استفاده و مدلی برای محاسبه‌ی کرایه براساس مسافت و زمان ارائه شده است.

• تئوری‌های قیمت‌گذاری

قیمت‌گذاری فعالیتی است که باید تکرار شود و فرآیندی مداوم و پیوسته محسوب می‌شود. این تداوم ناشی از محیط و عدم ثبات شرایط بازار است، که لزوم تغییر و تعدیل قیمت را ایجاد می‌کند.^[۲۳] قیمت‌گذاری در حالت بازار به‌صورت تعادلی انجام می‌شود. در این روش این‌گونه عمل می‌شود که قیمت تعادلی یک محصول در نقطه‌ای قرار دارد که منحنی‌های عرضه و تقاضای آن محصول به یکدیگر برخورد می‌کنند (شکل ۱). در حالت بازار اگر قیمت در



شکل ۱. منحنی عرضه - تقاضا و قیمت.^[۲۰]

در رانندگان و مسافران مقایسه کردند و دریافتند که این روش می‌تواند سود رانندگان را افزایش دهد، اما آثار آن در مسافران کاملاً مشخص نیست.^[۱۵]

وانگ و همکاران (۲۰۱۶)، در بررسی راهبردهای قیمت‌گذاری یک پلتفرم تاکسی در چارچوب تعادل کلی بازار تاکسی به این سؤال‌ها پاسخ دادند که آیا تعادل بازار تاکسی تحت هر راهبرد قیمت‌گذاری پایدار است؟ چگونه سیستم تاکسی در پاسخ به اختلال قیمت تغییر می‌کند؟ چگونه یک پلتفرم باید راهبردهای قیمت‌گذاری خود را برای بهبود سودآوری و/یا رفاه اجتماعی تنظیم کند؟ یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که راهبردهای قیمت‌گذاری بهینه بین دیدگاه‌های عمومی و پلتفرم متفاوت است. همچنین، ایشان راه‌حل‌های تعادلی را ایجاد و شرایط کافی برای ثبات تعادل را بررسی کردند.^[۱۶]

گالو^۶ (۲۰۱۸)، رویکردی برای تعیین کرایه‌ی تاکسی براساس مبدأ با هدف افزایش برابری در سیستم‌های حمل‌ونقل شهری ارائه کرده است، که برای شهر ناپل طراحی شده بود. قیمت‌گذاری در سطح شبکه به گونه‌ای بوده است که برای هر جفت مبدأ - مقصد، کرایه‌ی کمتری از مشتری دریافت و توزیع سرویس بهتری ارائه شود. پژوهشگر برای بهبود عدالت در سیستم، پیشنهاد کرده است که کرایه‌ی سایر خدمات حمل‌ونقل نیز اصلاح شود و به برخی فعالیت‌های حمل‌ونقلی مانند دوچرخه‌سواری یا رانندگی یارانه تعلق گیرد.^[۱۷]

ژانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، مدل بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم ژنتیک را برای حل مشکل انحراف تاکسی ارائه کرده و هدفشان، تعیین طرح قیمت‌گذاری منصفانه برای مسافران و رانندگان در عین حفظ منافع آن‌ها بوده است. نتایج نشان داده است که روش مذکور می‌تواند انحراف تاکسی را کاهش و منافع مسافران و رانندگان را به‌طور همزمان تضمین کند.^[۱۸]

فتاح‌زاده و خانی (۱۳۹۸)، با استفاده از روش خوشه‌بندی و شاخص قیمت، یک روش سیستماتیک برای محاسبه‌ی کرایه‌ی تاکسی در شهر تهران ارائه و خطوط تاکسیرانی را براساس شباهت‌ها در خوشه‌هایی دسته‌بندی و سپس نرخ کرایه‌ی عادلانه را با استفاده از میانگین درآمد ناخالص یک مسیر استاندارد به عنوان شاخص قیمت برای هر خوشه محاسبه کرده‌اند.^[۱۹]

ژی ژوان^۸ و همکاران (۲۰۲۰)، مدل قیمت اشتراک‌گذاری تاکسی پویا را معرفی کرده‌اند، که براساس تقاضای مسافران و عرضه‌ی رانندگان، نرخ کرایه را به‌صورت پویا تعیین می‌کند. مدل مذکور با بهینه‌سازی کمینه‌ی تفاوت بین کاهش هزینه‌ی مسافران و افزایش درآمد رانندگان، به دنبال یافتن نرخ تخفیف بهینه برای تعداد مسافران مختلف بوده است. نتایج نشان داده است که این روش می‌تواند هزینه‌ی سفر مسافران را کاهش و در عین حال درآمد رانندگان را افزایش دهد.^[۲۰]

ترو^۹ (۲۰۲۰)، در بررسی خود بر روی ۴۸ نوشتار منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۲۰، به تغییرات قابل توجهی در مدل‌های قیمت‌گذاری تاکسی در فنلاند پس از اجرای قانون خدمات حمل‌ونقل اشاره کرده‌اند؛ که شامل: افزایش انعطاف‌پذیری در کرایه‌ها و مناطق عملیاتی، معرفی قیمت‌گذاری پویا، و استفاده از فناوری برای شفافیت و رقابت بیشتر بین مراکز اعزام تاکسی می‌شود.^[۲۱]

ژو و همکاران (۲۰۲۰)، مدل پویای قیمت‌گذاری اشتراک‌گذاری سواری را برای تاکسی‌ها ارائه کرده‌اند، که براساس تعادل بین نرخ راننده و مسافر بوده است.

⁸ Xijun Zhang

⁹ Tervo

⁶ Gallo

⁷ Zhang

$$MR = \frac{\Delta TR}{\Delta Q} = \frac{\Delta (P \times Q)}{\Delta Q} = P \times \frac{\Delta Q}{\Delta Q} = P \quad (۴)$$

(درآمد نهایی = تغییر در درآمد کل / تغییر در تولید)

مشاهده می‌شود که در بازار رقابت کامل، درآمد نهایی برابر با قیمت محصول است.

یک بنگاه اقتصادی به دنبال بیشینه‌سازی سود اقتصادی و یا افزایش اختلاف بین درآمد کل و هزینه کل است. در حالت بازار، سود بنگاه هنگامی بیشینه می‌شود که درآمد نهایی برابر با قیمت (P) باشد؛ لذا، شرط بیشینه‌سازی سود را می‌توان برابری قیمت و هزینه نهایی (مطابق رابطه ۵) عنوان کرد.

$$P = MC \quad (۵)$$

این شرط را می‌توان از بیشینه‌سازی تابع سود به صورت رابطه ۶ به دست آورد:

$$\pi = TR - TC \quad (۶)$$

جهت بیشینه‌سازی تابع سود از آن بر حسب Q مشتق گرفته می‌شود و برابر صفر قرار می‌گیرد (رابطه ۷):

$$\frac{\partial \pi}{\partial Q} = \frac{\partial TR}{\partial Q} - \frac{\partial TC}{\partial Q} = 0 \rightarrow \frac{\partial \pi}{\partial Q} = MR - MC = 0 \rightarrow MR = MC \quad (۷)$$

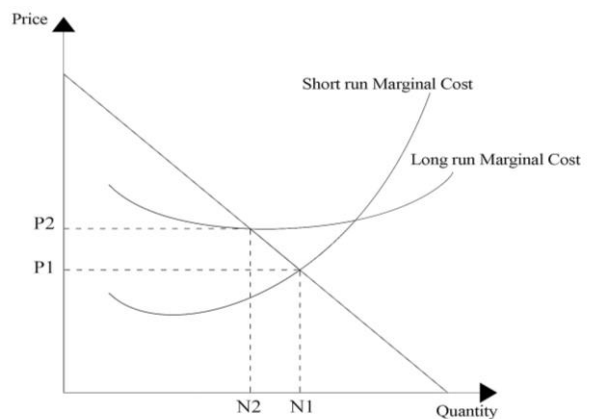
• قیمت‌گذاری براساس هزینه نهایی

قیمت‌گذاری براساس هزینه نهایی، دو وجه متمایز دارد و قیمت‌ها را می‌توان بر حسب هزینه‌های نهایی درازمدت یا کوتاه‌مدت طراحی کرد (شکل ۲). در صورت ارائه قیمت بر پایه هزینه نهایی درازمدت، استفاده‌کنندگان حمل‌ونقل هزینه‌ها را در حدودی پرداخت می‌کنند که عوامل حمل‌ونقل را قادر می‌سازد تا بر روی تسهیلات جدیدتری سرمایه‌گذاری کنند. در حالی که قیمت‌گذاری در کوتاه‌مدت این امکان را می‌دهد که از منابع موجود، بهترین استفاده می‌مکن به عمل آید.^[۲۶]

• متغیرهای پژوهش

در واقع متغیرهایی که در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند، پارامترهایی هستند که در نرخ‌گذاری خدمات تاکسیرانی مؤثر هستند (جدول ۱) و به دو دسته کلی هزینه‌ای و درآمدی تقسیم می‌شوند. پارامترهای هزینه‌ای خود به دو گروه خارجی و مستقیم تقسیم می‌شوند (روابط ۸ و ۹). پارامترهای مذکور به این شرح هستند:

$$F = f(C, T, L, P) \quad (۸)$$



شکل ۲. هزینه نهایی درازمدت و کوتاه‌مدت.^[۲۷]

نقطه‌ای تعادل نباشد، توسط دست پنهان بازار به تعادل می‌رسد. قیمت در این حالت براساس چانه‌زنی بین مسافر و راننده خواهد بود، که درنهایت به توافق بر سر یک قیمت می‌رسند.

با جابجایی منحنی‌های عرضه و تقاضا، قیمت تعادلی نیز تغییر می‌کند.^[۲۴] روش‌های متعددی برای تعیین نرخ کرایه‌ی حمل‌ونقل عمومی وجود دارد، که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: قیمت‌گذاری براساس مسافت، قیمت‌گذاری براساس زمان، قیمت‌گذاری مقاطع سفر (کورس)، قیمت‌گذاری براساس مرز ناحیه، قیمت‌گذاری براساس هزینه واحد (بلیط).

الف) قیمت‌گذاری براساس مسافت: در این روش قیمت هر سفر به طول سفر که برحسب کیلومتر است، بستگی دارد. هر چه سفر طولانی‌تر باشد؛ قیمت پرداختی بیشتر خواهد بود.^[۲۵]

ب) قیمت‌گذاری براساس زمان: در این روش قیمت هر سفر براساس زمان سفر محاسبه می‌شود؛ در نتیجه، هر چه زمان سفر بیشتر باشد، قیمت افزایش پیدا خواهد کرد.

ج) قیمت‌گذاری مقاطع سفر (کورس): در این روش هزینه‌ی سفر برای برخی مسیرهای خاص محاسبه می‌شود، به این حالت که هر مقطعی از مسیر که از نقطه‌ی معین شروع می‌شود و تا نقطه‌ی معین دیگر ادامه دارد، قیمت مشخصی دارد. هر قطعه‌ی مشخص از مسیر را در اصطلاح یک کورس می‌نامند.

د) قیمت‌گذاری براساس مرز ناحیه: در این روش کل شهر به ناحیه‌هایی با مساحت و مرزهای معین تقسیم می‌شود و قیمت سفر فقط به ناحیه‌ی شروع و پایان سفر بستگی دارد. در این روش قیمت‌ها برای هر جفت از نواحی به شکل ماتریس داده می‌شود.^[۲۵]

ه) قیمت‌گذاری براساس هزینه واحد (بلیط): در این روش که ساده‌ترین نوع قیمت‌گذاری است، هزینه‌ی تمامی سفرها یکسان و مستقل از طول سفر تعیین می‌شود.^[۲۵]

• مدل‌های قیمت‌گذاری

مدل‌های قیمت‌گذاری در واقع روش‌های ریاضی برای قیمت‌گذاری بر روی کالاها و خدمات مختلف هستند. در پژوهش حاضر، به چند نمونه از مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است.

در حالت بازار، درآمد کل از حاصل ضرب مقدار عرضه‌ی محصول در قیمت آن به دست می‌آید (رابطه ۱):

$$TR = P \times Q \quad (۱)$$

و هزینه کل، شامل هزینه‌های آشکار و نهان می‌شود و اختلاف بین درآمد کل و هزینه کل، سود اقتصادی را نشان می‌دهد (رابطه ۲):

$$\pi = TR - TC \quad (۲)$$

(سود اقتصادی = درآمد کل - هزینه کل)

درآمد متوسط به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$AR = \frac{TR}{Q} = \frac{P \times Q}{Q} = P \quad (۳)$$

(درآمد متوسط = درآمد کل / کل تولید)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، درآمد متوسط برابر با قیمت خواهد بود.

درآمد نهایی نیز از نسبت درآمد کل به تغییر در کل تولید به دست می‌آید و به عبارتی دیگر، درآمد نهایی مطابق رابطه ۴ است:

جدول ۱. متغیرهای پژوهش.

Cost Parameters			Revenue Parameters
External Costs	Driver Costs	Taxi Costs	
- Air Pollution - Noise Pollution - Congestion - Accidents	- Wages - Insurance - Housing & Child Allowance - Bonuses & Festival Allowances - Sick Pay - Worker Benefits - Lunch Expenses - Uniform Costs	- Capital Depreciation - Insurance - Equipment - Fuel - Maintenance - Taxes & Duties - Membership Fees	- Vehicle Occupancy - Distance Traveled - Travel Time - Presence of Cargo - Weekday - Time of Day

که در آن، F کرایه، C هزینه، T زمان سفر، L طول سفر، و P تعداد مسافر هستند.

$$C_T = C_d + C_t + C_e \quad (9)$$

که در آن، C_T هزینه‌ی نهایی کل، C_d هزینه‌ی کل راننده، C_t هزینه‌ی کل تاکسی، و C_e هزینه‌ی کل خارجی هستند.

• ارائه‌ی مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی کرایه‌ی تاکسی خطی

برای تاکسی خطی مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی به ۴ حالت تقسیم می‌شود، که هر کدام از حالت‌های مذکور در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.

علت در نظر گرفتن چند حالت مجزا برای تاکسی خطی، حالت‌های مختلف سوار و پیاده شدن مسافران است. گرچه تاکسی خطی غالباً الگویی دارد که سوار و پیاده شدن مسافران در مکان‌های ثابتی انجام می‌شود، اما آنچه در واقعیت رخ می‌دهد این است که در بین این نقاط نیز مسافرانی سوار و پیاده می‌شوند و تاکسی‌ها عملاً در الگویی شبیه به تاکسی‌های گردش در بخشی از مسیر رفتار می‌کنند. پژوهش حاضر به دنبال ارائه‌ی مدلی است که خدمات تاکسی، پوشش‌دهنده‌ی نیاز این دسته از مسافران نیز باشد و کرایه‌ی سفر برای آنان دقیق محاسبه شود (و آن‌ها هزینه‌ی کل مسیر را نپردازند) و همچنین رانندگان را ترغیب به ارائه‌ی خدمت به آنان کند.

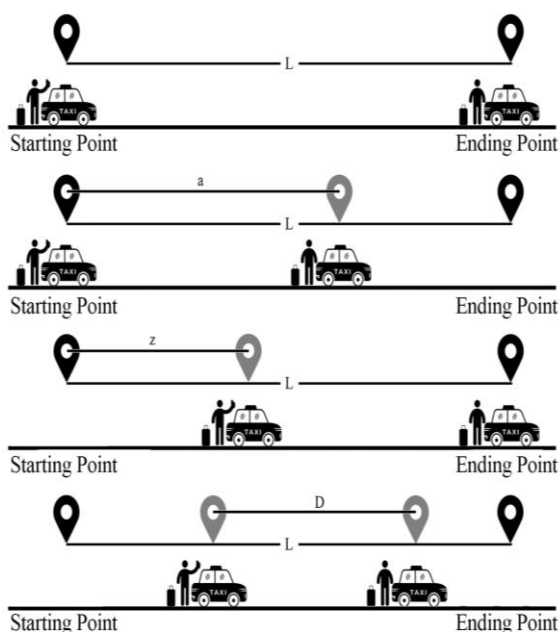
- حالت اول

در این حالت، مسافر در ابتدای خط، سوار و در انتهای خط پیاده می‌شود. برای این حالت مدل قیمت‌گذاری به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ پیشنهاد شده است.

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T L}{P} + M \quad \text{if } V \geq 20 \text{ km/h} \quad (10)$$

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T L}{P} + M + \frac{(VOT)t}{P} \quad \text{if } V \leq 20 \text{ km/h} \quad (11)$$

که در آن‌ها، F کرایه برای هر مسافر بر حسب ریال؛ P تعداد مسافر؛ L طول خط (کیلومتر)؛ C_T هزینه‌ی نهایی کل به ازاء هر کیلومتر پیمایش (ریال)؛ A_i ضریب A کرایه (به صورت جدول ۲ محاسبه می‌شود)؛ V سرعت حرکت تاکسی



شکل ۳. حالت‌های مختلف بهره‌برداری از تاکسی خطی.

جدول ۲. ضرایب کرایه.

Fare Coefficients		
Suggested Value	Description	Coefficients
6 AM - 11 PM = 1	Time of Day Coefficient	A_1
11 PM - 6 AM = 1.35		
Weekdays = 1	Day of Week Coefficient	A_2
Holidays = 1.35		
Snow & Ice = 1.15	Weather Coefficient	A_3
Rain = 1.1		
Normal = 1		
1.2	Profit Margin Coefficient	A_4

(کیلومتر بر ساعت)؛ VOT ارزش یک دقیقه زمان برابر با ۵۸۳۳ ریال بر طبق محاسبات انجام‌شده؛ t زمان سفر وقتی که سرعت حرکت تاکسی از ۲۰ کیلومتر بر ساعت کمتر است؛ M هزینه‌ی داشتن بار معادل یک دقیقه ارزش زمان^{۱۰}.

که برابر با ۱۹/۱ کیلومتر بر ساعت بوده و به عدد ۲۰ کیلومتر بر ساعت گرد شده است.^[۲۷]

^{۱۰} علت در نظر گرفتن معیار ۲۰ کیلومتر بر ساعت برای آستانه‌ی دو ضابطه‌ای، متوسط سرعت تاکسی و مسافرکش در ساعت اوج ترافیک در اصفهان بوده است.

A_۱ ضریب ساعت شبانه‌روز: این ضریب براساس ماده‌ی ۵۳ قانون کار که کارهای روزانه را از ساعت ۶ الی ۲۲ و کار شبانه را از ساعت ۲۲ الی ۶ صبح روز بعد معین می‌کند و ماده‌ی ۵۳ قانون کار که برای هرساعت کار در شب به کارگران غیرنوبتی ۳۵٪ اضافه بر مزد ساعت کار عادی تعلق می‌گیرد، تعیین شده است. از آنجایی که رانندگی تاکسی غیرنوبتی بوده و الگوی عرفی ساعت کاری برای رانندگان شب‌کار طبق ضوابط سازمان تاکسیرانی ساعت ۲۳ در نظر گرفته می‌شود؛ این ضریب در محاسبات اعمال می‌شود.

A_۲ ضریب روزهای هفته: طبق ماده‌ی ۶۲ قانون کار، کارگرانی که به هر عنوان روز جمعه کار می‌کنند، در مقابل استفاده از تعطیل روز جمعه ۴۰٪ اضافه بر مزد روزانه دریافت خواهند کرد. البته ممکن است طبق توافق یا الگوی تاکسیرانی، روز تعطیل هفته برای هر راننده، روزی به جز جمعه در نظر گرفته شود، که حکم همان روز تعطیل را برای او دارد. توجه شود که طبق قانون تاکسیرانی یک جمعه در هر ماه راننده باید به‌عنوان شیفت اجباراً خدمات ارائه کند، که برای مسافران کمبود سرویس اتفاق نیفتد؛ این موضوع توسط گشت-های سازمان تاکسیرانی هم کنترل می‌شود.

A_۳ ضریب آب و هوا: این ضریب اصلاحی با توجه به افزایش هزینه‌های هر کیلومتر پیمایش تاکسی در شرایط نامساعد جوی به‌علت استفاده از (ضد یخ، برف پاک‌کن، زنجیر چرخ، فن و بخاری، نیاز به کارواش پس از بارندگی) است. همچنین رانندگی در شرایط برفی و بارانی احتمال وقوع تصادف را نیز افزایش می‌دهد، و همچنین میانگین سرعت نیز کاهش پیدا می‌کند. برای شهر تهران، سازمان تاکسیرانی عدد ۰ تا ۱۵ درصد افزایش کرایه را برای این شرایط در نظر گرفته است.

A_۴ ضریب سود: سود خرده‌فروشی برای مشاغل مختلف طبق اعلام سازمان حمایت از مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان بین ۵ الی ۳۰ درصد برای کسب و کارهای مختلف در نظر گرفته می‌شود. نویسندگان نوشتار حاضر با توجه به این مصوبه و سود متعارف، عدد ۲۰٪ را در نظر گرفته‌اند. البته این عدد می‌تواند با توجه به نظر هر سازمان تاکسیرانی متفاوت در نظر گرفته شود.

- حالت دوم

در حالت دوم، مسافر در ابتدای خط سوار و در بین مسیر پیاده می‌شود. برای این حالت، مدل قیمت‌گذاری به‌صورت روابط ۱۲ و ۱۳ پیشنهاد شده است.

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T (a + \frac{L-a}{2})}{P} + M \quad \text{IF } V \geq 20 \text{ km/h} \quad (12)$$

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T (a + \frac{L-a}{2})}{P} + M + \frac{(VOT)t}{P} \quad \text{IF } V \leq 20 \text{ km/h} \quad (13)$$

که در آن‌ها، a طولی از خط است، که مسافر سوار تاکسی است (کیلومتر).

- حالت سوم

در حالت سوم، مسافر در بین مسیر سوار و در انتهای خط پیاده می‌شود. برای این حالت مدل قیمت‌گذاری به‌صورت روابط ۱۴ و ۱۵ پیشنهاد شده است.

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T (L-z)}{P} + M \quad \text{IF } V \geq 20 \text{ km/h} \quad (14)$$

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T (L-z)}{P} + M + \frac{(VOT)t}{P} \quad \text{IF } V \leq 20 \text{ km/h} \quad (15)$$

که در آن‌ها، z طولی از خط است، که تاکسی پیاده است تا مسافر را سوار کند (کیلومتر).

- حالت چهارم

در حالت چهارم، مسافر در بین مسیر سوار و پیش از رسیدن به پایان خط پیاده می‌شود. برای این حالت مدل قیمت‌گذاری مطابق روابط ۱۶ و ۱۷ پیشنهاد شده است.

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T D}{P} + S + M \quad \text{IF } V \geq 20 \text{ km/h} \quad (16)$$

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i) C_T D}{P} + S + M + \frac{(VOT)t}{P} \quad \text{IF } V \leq 20 \text{ km/h} \quad (17)$$

که در آن‌ها، D طول پیمایشی است که مسافر سوار بر تاکسی است (کیلومتر)؛ و S مبلغ ثابت گام اولیه (۵۰۰۰ ریال) است.

۴. تحلیل نتایج

نتایج مطالعه‌ی حاضر، بینش ارزشمندی را در مورد پویایی قیمت‌گذاری خدمات تاکسی در سناریوها و طول‌های مسیرهای مختلف ارائه می‌دهد. قیمت‌گذاری موجود به‌صورت قیمت‌های ثابت برای هر کورس مشخص از سواری است؛ که پوشش‌دهنده‌ی تمامی هزینه‌های تاکسی مانند هزینه‌ی استهلاک است، که به‌طورمثال برای هر کیلومتر پیمایش خودروی سمند برابر ۲۸۶۵ ریال است، نیستند. این هزینه اگر تأمین نشود، طی چند سال باعث فرسودگی ناوگان خواهد شد. از دیگر نارسایی‌های قیمت‌گذاری موجود، در نظر نگرفتن عامل مهم زمان در قیمت‌گذاری است، که در ساعت‌های شلوغی باعث زیان رانندگان می‌شود و همین امر منجر به ارائه نکردن خدمات توسط رانندگان در ساعت‌های شلوغی است. در نظر گرفتن عامل زمان در قیمت‌گذاری، باعث منصفانه‌تر شدن قیمت‌ها می‌شود، که رانندگان را ترغیب می‌کند در تمامی ساعت‌ها، خدمات ارائه کنند. این کاستی‌ها باعث به‌وجود آمدن انگیزه برای ارائه‌ی مدل موجود در پژوهش حاضر شده است، که در آن هزینه‌ی هر کیلومتر سفر با تاکسی سمند، ۳۲۱۸۳ ریال برآورد شده است. در صورت شلوغی ترافیک، هزینه‌ی هر کیلومتر تقریباً به ۳۸۰۱۶ ریال افزایش می‌یابد. مشاهده شده است که برای طول مسیرهای کوتاه‌تر، کرایه‌های محاسبه‌شده (به‌دست‌آمده از نوشتار نجفی (۲۰۲۱)، عموماً از کرایه‌های فعلی تعیین‌شده توسط سازمان تاکسیرانی بیشتر بوده است. با این حال، برای مسیرهای بیش از ۳ کیلومتر، کرایه‌های محاسبه‌شده به‌طور کلی بالاتر از کرایه‌های فعلی است. شایان ذکر است، در مسیرهای طولانی مانند پل بزرگمهر- دانشگاه خواراسگان، کرایه‌های فعلی برای پوشش هزینه‌ها کافی نیست و در نتیجه، خسارتی به مبلغ ۵۵۰۰ ریال به اِزاء هر کیلومتر پیمایش به راننده براساس سناریوی اول به راننده تحمیل می‌شود. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که هزینه‌ی تاکسی با مسافت طی‌شده به‌دلیل هزینه‌های هر کیلومتر، که به کرایه‌ی پایه اضافه می‌شود، افزایش می‌یابد. این ساختار قیمت‌گذاری، سفرهای کوتاه‌تر را تشویق

جدول ۳. مقایسه‌ی کرایه‌های کنونی و محاسباتی برای تاکسی خطی حالت اول.

Comparison of Current and Calculated Fares for Shared Taxis (Scenario 1)						
Fare if 5 Minutes of Stop Occurs Along the Route (Rials)	Fare if Entire Route Traveled at Speed < 20 km/h (Rials)	Fare if Entire Route Traveled at Speed > 20 km/h (Rials)	Current Fare (Rials)	Line Length (km)	Route	Line Number
39000	33000	31000	50000	3.15	Jomhouri Square - Moftah Malek Shahr	1
124000	124000	116000	50000	12	Bozorgmehr Bridge - Khorasgan University	7
35000	29000	27000	34000	2.75	Enghelab Square - Bozorgmehr Bridge	13
44000	39000	36000	33000	3.7	Azadi Square - Soffeh Terminal	26
66000	62000	58000	40000	6	Ahmadabad Square - Khorasgan Square	34
42000	36000	34000	25000	3.5	Beginning of Ghaemiyeh - End of Ghaemiyeh	43
48000	43000	40000	33000	4.1	Laleh Square - Beginning of Parvin	47

تاکسیرانی تعیین شده‌اند، پایین‌تر از کرایه‌های محاسبه‌شده توسط مدل هستند. این امر نشان می‌دهد که رانندگان تاکسی با نرخ‌های فعلی در حال ضررکردن هستند. نرخ‌های دستوری و ثابت در بلندمدت منجر به انباشت زیان برای رانندگان می‌شود. این زیان‌ها مانع از جایگزینی خودروهای فرسوده با خودروهای جدید می‌شود و درنهایت، منجر به فرسودگی ناوگان تاکسیرانی و افزایش هزینه‌ها خواهد شد. قیمت‌های ثابت با توجه به تورم موجود در کشور منطقی نیستند. تورم باعث افزایش هزینه‌های رانندگان تاکسی می‌شود، در حالی که کرایه‌ها ثابت می‌مانند و این امر به ضرر رانندگان تمام می‌شود. اصلاح نرخ‌ها، استفاده از مدل‌های قیمت‌گذاری پویا، ارائه‌ی یارانه به رانندگان، و حمایت از نوسازی ناوگان تاکسیرانی از جمله راهکارهای حل مشکل‌های ذکرشده هستند.

می‌کند و می‌تواند سفرهای طولانی‌تر را برای مسافران گران‌تر سازد. نتایجی که در جدول ۳ ارائه شده است، برای چند خط که به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و برای سناریوهای مختلف که سرعت در این مسیرها بیش از ۲۰ کیلومتر بر ساعت فرض شده است. این یافته‌ها ملاحظات قیمت‌گذاری و تغییرات در سناریوهای عملیاتی مختلف را روشن می‌کند و به درک بهتر پویایی قیمت‌گذاری خدمات تاکسی کمک می‌کند و امکان تصمیم‌گیری آگاهانه را برای ارائه‌دهندگان خدمات و ذینفعان فراهم می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطالعه‌ی حاضر نشان داده است که کرایه‌های فعلی تاکسی که توسط سازمان

References- منابع

1. Milioti, C., Kepaptsoglou, K. and Vlahogianni, E. 2021. Driver perceptions on taxi-sharing and dynamic pricing in taxi services: Evidence from Athens, Greece. *Journal of Public Transportation*, 23(2). <http://dx.doi.org/10.5038/2375-0901.23.2.4>.
2. Zhang, W., He, R., Chen, Y., Gao, M. and Ma, C. 2019. Research on taxi pricing model and optimization for carpooling detour problem. *Journal of Advanced Transportation* 2019, pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/3867874>.
3. Fumagalli, L.A.W., Rezende, D.A. and Guimarães, T.A. 2022. Data intelligence in public transportation: Sustainable and equitable solutions to urban modals in strategic digital city subproject. *Sustainability*, 14(8), p. 4683. <http://dx.doi.org/10.3390/su14084683>.
4. Comprehensive studies of Isfahan transportation, the title of the report on the current status of the public transportation system of Isfahan city, Isfahan University of Technology and Isfahan University. 2014. [In Persian]

5. Studies on organizing and forecasting the state of public transportation in Isfahan city until 2019, studies and planning unit, Isfahan municipality's transport and traffic department. 2019. [In Persian]
6. Feasibility of implementing an electronic payment system for travel fares and mechanized monitoring of Isfahan taxi fleet based on a survey of passengers, ITS specialized working group, Isfahan Municipality Transport and Traffic Deputy. 2011. [In Persian]
7. Salazar, M., Rossi, F., Schiffer, M., Onder, C.H. and Pavone, M. 2018. On the interaction between autonomous mobility-on-demand and public transportation systems. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). <http://dx.doi.org/10.1109/itsc.2018.8569381>.
8. Pavlíček, A. and Sudzina, F. 2020. Intergroup comparison of personalities in the preferred pricing of public transport in rush hours: Data revisited. *Sustainability*, 12(12), p. 5162. <http://dx.doi.org/10.3390/su12125162>.
9. De Borger, B., Mayeres, I., Proost, S. and Wouters, S. 1996. Optimal pricing of urban passenger transport A simulation exercise for Belgium. *Journal of Transport Economics and Policy*, 30(1), pp. 31-54.
10. De Borger, B. and Wouters, S. 1998. Transport externalities and optimal pricing and supply decisions in urban transportation: a simulation analysis for Belgium. *Regional Science and Urban Economics*, 28(2), pp. 163-197. [http://dx.doi.org/10.1016/s0166-0462\(97\)00018-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0166-0462(97)00018-5).
11. Kim, Y.-J. and Hwang, H. 2008. Incremental discount policy for taxi fare with price-sensitive demand. *International Journal of Production Economics*, 112(2), pp. 895-902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.08.001>.
12. Parry, I.W.H. and Timilsina, G.R. 2010. How should passenger travel in Mexico City be priced? *Journal of Urban Economics*, 68(2), pp. 167-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jue.2010.03.009>.
13. Yang, H., Fung, C.S., Wong, K.I. and Wong, S.C. 2010. Nonlinear pricing of taxi services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), pp. 337-348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.004>.
14. Gholami, A., Taghizadeh, Y. and Tian, Z. 2014. Classification of taxi khattee (jitney) lines based on topography and line cost indices. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 59, pp. 239-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2013.12.004>.
15. Zeng, C. and Oren, N. 2014. Dynamic taxi pricing: Paper presented at Eu. Conf. on Artificial Intelligence (ECAI)., Prague, United Kingdom, pp. 1135-1136. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-419-0-1135>.
16. Wang, X., He, F., Yang, H. and Oliver Gao, H. 2016. Pricing strategies for a taxi-hailing platform. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, pp. 212-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.011>.
17. Gallo, M. 2018. Improving equity of urban transit systems with the adoption of origin-destination based taxi fares. *Socio-Economic Planning Sciences*, 64, pp. 38-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2017.12.005>.
18. Zhang, W., He, R., Chen, Y., Gao, M. and Ma, C. 2019. Research on taxi pricing model and optimization for carpooling detour problem. *Journal of Advanced Transportation* 2019, pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/3867874>.
19. Fatahzadeh, F. and Khani, F. 2018. Presenting a systematic solution for calculating taxi fare, a case study of Tehran province: 12th Int. conf. on the Iranian Association for Operations Research, Mazandaran, Iran. [In Persian]
20. Zhang, X.-J., Tao, Y., Zhang, Q.-R., Dong, M. and Zhao, J. 2020. Research on dynamic taxi ride-sharing price model. 2020 Eighth International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD). <http://dx.doi.org/10.1109/cbd51900.2020.00023>.
21. Tervo, E. 2020. Dynamic pricing or not? — Pricing models of Finnish taxi dispatch centers under the Act on Transport Services. Master's thesis, University of Oulu, Oulu, Finland.
22. Xu, S., Yin, C. and Zhang, Q. 2020. Research on dynamic taxi ride-sharing price model. 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT). <http://dx.doi.org/10.1109/icectt50890.2020.00116>.
23. Zavareh, S. and Masoumi Khalaji, H. 2018. Identifying and investigating pricing factors and their impact on profitability. 2nd Nat. Conf. on modern economics, management and accounting studies in Iran, Tehran, Iran. [In Persian]
24. Mehregan, N. 2016. *Micro economics*. Noor Alam Publishing House, New Ed., 23rd Edn, pp. 245-259, Adib, Tehran, Iran. [In Persian]
25. Pour Pirali Abponeh, Maleeha. 2013. Pricing analysis of intra-city transportation (case study: Isfahan city),

- Master's thesis, Economic systems planning, Isfahan University of Technology. [In Persian]
26. Mahmoudi, A. 2019. *Transport economics*. Publishing Company of Business Publishing, 2nd Edn, Tehran, Iran, pp. 162-181. [In Persian].
27. Isfahan metropolis atlas. 2015. Isfahan municipality research and information technology planning deputy.
- Department of Statistics and Information Analysis. [In Persian].
28. Najafi, A. 2021. Development a model and strategies for taxi services pricing (case study of Isfahan city), Master's thesis, Islamic Azad University, NajafAbad branch. [In Persian]



Research Note

Investigating the Effect of Gorgan Bay's Sludge Ash on the Mechanical Parameters of Gorgan Loess Soil at Different Moisture Content and the Same Compaction Energy

Vahid Pesarakloo¹, Seyed Hamid Lajevardi^{*1}, Hosein MolaAbasi² and Seyed mohammad Mirhoseini

¹Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

²Department of Civil Engineering, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

* corresponding author:(Sh.lajevardi@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 15 April 2024

Revised: 22 June 2024

Accepted: 7 July 2024

Keywords:

Loess stabilization,
Gorgan Gulf's sludge ash,
unconfined compressive
strength,
shear strength,
consolidation properties.

Abstract

The objective of this study is to examine the mechanical properties of Gorgan loess enhanced with sludge pond ash (*SPA*) from Gorgan Gulf under different conditions. To achieve this, different proportions of *SPA* were mixed with the loess to obtain accurate findings on the efficacy of *SPA* addition on the unconfined compressive strength (*UCS*), cohesion (*C*), friction angle (*f*), compression (*C_c*), and recompression (*C_s*) index of the loess. Firstly, the sludge from a pond burned at 1000°C, which was the optimal temperature determined by X-ray fluorescence analysis (*XRF*), was added to the mixture as 0, 2, 4, 6, 8, and 10% of the soil's dry weight, respectively. The studied samples were prepared with the same energy (equivalent to the standard Proctor test) at different moisture contents (16, 18.5, 21, 23.5, and 26%) and were tested in unconfined compressive strength, direct shear, and consolidation devices at 56 days of curing in a humid room with a temperature of 24°C. It was found that adding *SPA* to the base soil increases the maximum strength measured in unconfined compressive strength, which is defined as unconfined compressive strength (*UCS*). On the other hand, it decreased with increasing moisture content. The addition of *SPA* as an additive material to the loess mixture was found to exert a significant effect on the shear strength properties (*C* and *f*) of the loess. The changes in moisture percentage for this test were not specific due to soil saturation and consolidation, and did not have a great effect on the increase of shear strength parameters with the increase of *SPA*. Examining the graphs of the consolidation test shows that the addition of 2% of *SPA* to the loess caused a noticeable decrease in the amount of *C_c* of the sample under the test after processing. Increasing the amount of *SPA* up to 10% caused a further decrease in the *C_c* value of the samples. This trend is also noticeable for the re-compression index, which showed a greater intensity with the increase in the amount of *SPA*. Accordingly, adding *SPA* to the soil caused a sharp decrease in *C_s* in the samples compared to the base soil. At the end, the results of macro-scale analyses collectively confirm the superior efficacy of the *SPA* replacement in enhancing various strength and stiffness properties of the loess.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Hosein MolaAbasi: Methodology, Technical support, Reviewing.

S.M. Mirhoseini: Reviewing.

Authors contribution statement

Vahid Pesarakloo: Investigation, Methodology, Writing-Original draft, Experimentation, Data curation.

Seyed Hamid Lajevardi: Supervision, Conceptualization, Methodology, Technical support, Reviewing, Final Editing.

To Cite this article:

Pesarakloo, V., Lajevardi, S.H., Mola Abasi, H. and Mirhoseini, S.M. 2025. Investigating the effect of gorgan bay's sludge ash on the mechanical parameters of Gorgan loess soil at different moisture content and the same compaction energy, Sharif Civil Engineering Journal, 41(2), 114-123. <https://doi.org/10.24200/ij30.2024.64158.3314>



بررسی اثر خاکستر لجن خلیج گرگان در پارامترهای مکانیکی خاک لس گرگان در درصد رطوبت‌های متفاوت و انرژی تراکم یکسان

وحید پسرکلو^۱، سید حمید لاجوردی^{۱*}، حسین ملاعباسی^۲ و سید محمد میرحسینی^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران

*نویسنده مسئول (Sh.lajevardi@iau.ac.ir)

چکیده

هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی خواص مکانیکی خاک لس تثبیت‌شده با لجن سوزانده‌شده‌ی خلیج گرگان در دمای بهینه‌ی ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (SPA) است. برای رسیدن به این هدف، ابتدا SPA به ترتیب ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن خشک خاک لس جایگزین شده است. نمونه‌های مطالعه‌شده با انرژی یکسان (معادل آزمون پروکتور استاندارد) در درصد رطوبت‌های مختلف تهیه و بعد از ۵۶ روز عمل‌آوری در دستگاه‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم بررسی شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزودن SPA سبب بهبود مقاومت فشاری محصورنشده و مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) خاک لس شده است، که این بهبود در ۱۰٪ جایگزینی خاک با SPA، بیشترین مقدار بوده است. همچنین با افزودن SPA، شاخص‌های فشرده‌گی و بازفشرده‌گی خاک تثبیت‌شده به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به خاک پایه کاهش یافته است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷
تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

واژگان کلیدی:

تثبیت لس،
خاکستر لجن خلیج گرگان،
مقاومت فشاری محصورنشده،
مقاومت برشی،
خصوصیات تحکیمی.

کاربری‌های ژئوتکنیکی، آهک، سیمان پرتلند، و یا مخلوطی از آن‌ها با مواد افزودنی دیگر هستند. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج پژوهشگران در زمینه‌ی استفاده از سیمان و آهک در تثبیت خاک لس ارائه شده است.

۱. مقدمه

خاک‌های فروریزشی و به خصوص خاک لسی، یکی از انواع گوناگون خاک‌های مسئله‌داری هستند که وجود آن‌ها در برخی از مناطق کشور، از جمله استان‌های گلستان، سمنان، همدان، سیستان و بلوچستان، و بخش‌هایی از خراسان و مازندران گزارش شده است. تغییرات رطوبت باعث ایجاد انقباض در این خاک‌ها شده است؛ که نتیجه‌ی آن، وارد آمدن خسارت‌های جدی به سازه‌ها و صرف هزینه‌های هنگفت جهت تعمیر و بازسازی آن‌هاست. برای نمونه می‌توان به آسیب‌های وارده به شالوده‌ی ساختمان‌های مسکونی، سازه‌های سبک و مدفون، بزرگراه‌ها، روسازی باند فرودگاه‌ها، و خاکریزهای بناشده بر روی خاک‌های مذکور اشاره داشت. با وجود این، استعداد فروریزشی خاک‌های فروریزشی را می‌توان با به‌کارگیری روش‌هایی، چون: کنترل رطوبت، جایگزینی خاک مناسب، تثبیت شیمیایی، و یا استفاده از شالوده‌های گسترده، نیمه‌عمیق، و عمیق کاهش داد.^[۱]

از میان روش‌های گوناگون اشاره‌شده، تثبیت شیمیایی یکی از بهترین و مؤثرترین شیوه‌های شناخته‌شده جهت تثبیت خاک‌های فروریزشی است. در حال حاضر، تثبیت‌کننده‌های اصلی و عمده‌ی استفاده‌شده در راه‌سازی و

استناد به این مقاله:

پسرکلو، وحید، لاجوردی، سیدحمید، ملاعباسی، حسین و میرحسینی، سیدمحمد، ۱۴۰۴. بررسی اثر خاکستر لجن خلیج گرگان در پارامترهای مکانیکی خاک لس گرگان در درصد رطوبت‌های متفاوت و انرژی تراکم یکسان. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص. ۱۱۴-۱۲۳. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.64158.3314>



Mr (مدول برجهندگی)، LWF (مصلح پُرکننده‌ی سبک)، و SF (کرنش گسیختگی).

امروزه نگرانی‌ها در ارتباط با ذخیره‌ی انرژی و منابع طبیعی، انتشار گاز دی‌اکسیدکربن (CO_2)، همچنین مدیریت تجمع رسوب‌ها در تالاب‌ها، مخزن سدها، و مجاری رودخانه‌های بزرگ در حال افزایش است. برای کاهش این نگرانی‌ها، تمامی حوزه‌های اقتصادی از جمله صنعت مصالح ساختمانی باید در راستای تحقق اهداف اشاره‌شده عمل کنند.

رسوب نهشته‌های خاکی در خلیج گرگان، همچنین تولیدات روزافزون آن‌ها، موجب تجمع این لجن‌ها شده است. حجم بالای لجن‌ها، همچنین خطرهایی که آن‌ها برای محیط‌زیست و حیات جانداران ایجاد کرده‌اند، توجه زیادی را از جانب گروه‌های مختلف جهت یافتن روشی مناسب برای دفع و یا استفاده‌ی مجدد از آن‌ها را به خود جلب کرده است.

یکی از روش‌های استفاده‌شده جهت کاهش حجم لجن‌های استخراجی از خلیج گرگان، سوزاندن آن‌هاست. از مزایای سوزاندن این مواد، نه فقط تولید خاکستر قابل استفاده به عنوان مصالح ساختمانی است، بلکه از بین بردن آلاینده‌های آلی و تجمع آلاینده‌های غیرآلی در حجم محدود نیز است. این اقدام به حل مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انباشته‌شدن لجن‌های مذکور کمک می‌کند.

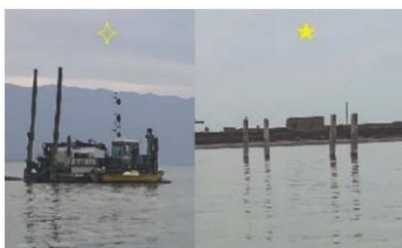
در شکل ۱، به محدوده‌ی مطالعاتی شامل موقعیت خلیج گرگان و رسوب‌های نهشته‌شده اشاره شده است. خلیج گرگان بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر است،

از دلایل تولید و انتشار زیاد CO_2 این است که سنگ‌آهک و آلومینیوم سیلیکات، باید در دمای بسیار بالا قرار گیرند، تا کلینکر تشکیل شود؛ که یکی از عوامل اصلی آن، الیت (Ca_2SiO_5) است، که یک ماده‌ی معدنی و از عوامل اصلی مقاومت اولیه‌ی سیمان است و در پروسه‌ی تشکیل کلینکر باید تا ۱۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت ببیند، که دمای بسیار زیادی است.^[۸] لذا، لزوم پژوهش بر روی تثبیت‌کننده‌های نوین و موادی که ضمن داشتن کارایی لازم، کمترین آثار مخرب زیست‌محیطی را نیز داشته باشند، بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از مصالح نوین، که در طرح‌های بهسازی استفاده می‌شود، به‌کارگیری ماده‌ی دورریز خاکستر لجن رسوب‌هاست. تولید خاکستر لجن رسوب‌ها و سیمان در روند احتراق ناشی از سوخت فسیلی و تشکیل گاز CO_2 مشترک بوده است، اما لجن رسوب‌ها عموماً در زمان و دمایی کمتر از دمای تولید سیمان سوزانده می‌شوند.^[۹] بنابراین جایگزینی سیمان با خاکستر لجن می‌تواند ردپای CO_2 را کاهش دهد. در پژوهش حاضر، از خاکستر حاصل از پسماند رسوب‌های خلیج گرگان^۱ (SPA)، به عنوان ماده‌ی جدید افزودنی به خاک لس استفاده شده است. به‌صورت خلاصه می‌توان مطالعات پیشین آثار مربوط به استفاده از خاکستر لجن به همراه سایر مواد افزودنی بر خاک‌های ریزدانه را در جدول ۲ خلاصه کرد.

یادداشت: (+) (روند افزایشی)، (-) (روند کاهش)، OMC (درصد رطوبت بهینه)، MDD (بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک)، UCS (مقاومت فشاری محصورنشده)، STS (مقاومت کششی دونیم‌شدن)، CBR (ظرفیت باربری کالیفرنیا)، LL (حد روانی)، PI (شاخص خمیری)، q_u (ظرفیت باربری نهایی).

جدول ۲. مشخصات خاک تثبیت‌شده با خاکستر لجن و سایر افزودنی‌ها.

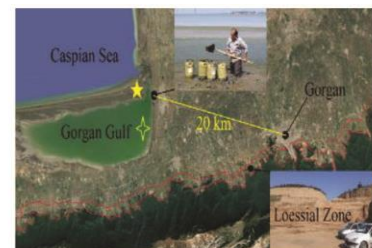
Researcher (reference)	Summary of results	Base soil	Additive
Kumar & Gupta (2016), ^[10]	OMC(+), MDD(-), UCS and STS up to PA=40%(+), LWF(+), SF(-)	CL-ML	Sludge ash
Gupta & Kumar (2017), ^[11]	MDD(-), OMC(+), CBR up to PA=40%(+)	CL-ML	Sludge ash & cement
Arora & Kumar (2019), ^[12]	q_u (+)	CL	Fiber-reinforced sludge ash
Gupta et al. (2019), ^[13]	OMC(+), MDD(-), UCS up to PA=30%(+)	CL	Sludge ash
Gupta et al. (2020), ^[14]	LL(-), PI(-), MDD(-), OMC(+), CBR up to PA=30%(+), Mr(+)	CL-ML	Sludge ash & crushed brick pieces
Mogili et al. (2021), ^[15]	CBR(+), Mr(+)	Coal Ash	Fiber & Lime
Pesarakloo et al. (2024), ^[16]	OMC(+), MDD(-), UCS up to PA=10%(+)	CL-ML	Sludge ash



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) محدوده‌ی جغرافیایی پژوهش حاضر، (ب) کاهش عمق خلیج به دلیل رسوب‌گذاری، (ج) لایروبی خلیج.

^۱ از این به بعد به جای عبارت خاکستر حاصل از پسماند رسوب‌های خلیج گرگان به دلیل اختصار از واژه‌ی خاکستر پسماند تالاب با نماد (SPA) استفاده می‌شود.

- معرفی SPA به‌عنوان جایگزین مواد افزودنی سنتی، از جمله سیمان با توجه کاهش تولید گاز CO_2 ، و در نتیجه کاهش اثر ردپای کربن در چرخه‌ی محیط‌زیست.
- ارائه‌ی راهکار برای کاهش هزینه‌های لایروبی به واسطه‌ی کاهش هزینه‌های حمل و نیز استفاده‌ی مجدد مصالح فرآوری‌شده برای کاربرد در اهداف بهسازی خاک‌های لسی منطقه‌ی گرگان.
- امکان‌سنجی استفاده از مصالح فرآوری‌شده‌ی بازیافتی در پروژه‌های بهسازی خاک، مانند: ساخت خاکریز، بسترسازی و نظایر آن.

۲. معرفی مصالح استفاده‌شده و روش انجام آزمون

در بخش حاضر، به معرفی مصالح استفاده‌شده، روند نمونه‌سازی و نحوه‌ی انجام آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم پرداخته شده است.

۱.۲. خصوصیات مواد و مصالح استفاده‌شده

• لس گرگان

خاک بررسی‌شده در پژوهش حاضر از نوع لس بوده است، که از جنوب شهر گرگان تهیه شده است (شکل ۲- الف). برای تعیین دانه‌بندی خاک موردنظر، براساس استاندارد ASTM D4۲۲^[۱۷] از روش تر استفاده شده است، به این صورت که جهت تعیین درصد وزنی خاک عبورکرده از الک ۲۰۰ و تشخیص اولیه‌ی ریزدانه و یا درشت‌دانه‌بودن آن، ابتدا ۵۰۰ گرم خاک خشک روی الک ۲۰۰ با فشار مستقیم آب شسته شده است، تا جایی که آب خارج‌شده کاملاً شفاف شود. در ادامه، خاک به‌جای‌مانده بر الک ۲۰۰ در گرم‌خانه به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۱۰ خشک و سپس وزن شد. نتیجه‌ی حاصل از آزمون بر خاک پایه حاکی از آن است که بیش از ۹۷٪ ذرات خاک از الک ۲۰۰ عبور کرده‌اند. منحنی حاصل از آزمون دانه‌بندی و هیدرومتری در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همچنین آزمون‌های حدود اتربرگ بر روی خاک پایه براساس استاندارد ASTM D4۳۱۸^[۱۸] انجام شده است، که نتایج آن حاکی از حد

که بر اثر پیشروی و گسترش شرقی رشته‌ی ساحلی شبه جزیره‌ی میانکاله در جنوب شرقی دریای خزر تشکیل شده است. وسعت خلیج گرگان حدود ۴۰۰ کیلومترمربع است. خلیج گرگان کم‌عمق است، به‌طوری‌که با درنظرگرفتن بالآمدگی آب، بیشینه‌ی عمق آن به ۴ متر و به‌طور متوسط حدود ۳ متر می‌رسد و از غرب به شرق تا حوالی ضلع جنوبی آشوراده به عمق آب افزوده می‌شود. فرایندهای فرسایش، انتقال رسوب، و رسوبگذاری توسط عوامل هیدرودینامیکی نظیر امواج و نوسان‌های تراز دریا از یک طرف و آورد رسوب رودخانه‌ای و بادی از دیگر سو، اهمیت خاصی به خلیج گرگان داده است. چهار گروه اصلی رسوب‌های ماسه‌ای، گلی، گل ماسه‌ای، و ماسه‌ی گلی در خلیج گرگان انباشته شده‌اند (شکل ۱- الف)، که موجب بسته‌شدن کانال‌های انتقال آب در دهانه‌ی ورودی خلیج و پسروی آب و درنهایت خشکی دائمی خلیج گرگان شده‌اند. به‌دلیل رسوب‌گذاری‌های صورت‌گرفته، عمق خلیج گرگان در نقاط عمیق از بیشینه‌ی ۳ متر به ۱/۵ متر کاهش یافته است (شکل ۱- ب و ج).

بزرگ‌ترین معضل جمع‌آوری و رسوب‌زدایی خلیج گرگان، در وهله‌ی اول، حجم زیاد رسوب‌هاست، که باید در مکانی مناسب تخلیه شوند. جمع‌آوری و حمل رسوب‌ها، هزینه‌های بسیار زیادی در پی خواهد داشت. به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد، رسوب‌ها باید پس از جمع‌آوری و حمل دریایی، به فاصله‌ی نزدیک از محل جمع‌آوری حمل و تخلیه شوند. بنابراین، پس از مدت کوتاهی به‌واسطه‌ی جریان‌های هیدرودینامیکی، مجدداً به خلیج برگشته و راهکار رسوب‌زدایی، تقریباً بی‌اثر بوده و نیازمند تکرار این عملیات خواهد بود. بارگیری و حمل زمینی نیز نیازمند دسترسی به زمین‌های وسیع و در دسترس محل رسوب‌زدایی خواهد بود؛ بنابراین، با توجه به عدم دسترسی به چنین مکان‌هایی، این روش هم روش مناسبی نخواهد بود و سبب بروز ریزگردها در منطقه خواهد شد. یکی از راه‌حل‌های ارائه‌شده در رفع مشکل‌های ناشی اشاره‌شده‌ی رسوب‌های خلیج گرگان، سوزاندن آن‌هاست، که سبب کاهش حجم قابل‌ملاحظه‌ای در رسوب‌ها می‌شود.

از سویی دیگر، نواحی جنوبی و غربی شهرستان گرگان، سرشار از تپه‌های لسی هستند، که عموماً مناسب ساخت‌وساز نیستند و بهتر است قبل از ساخت بنا روی این نوع خاک‌ها، تثبیت بستر صورت پذیرد. بنابراین، در پژوهش حاضر به‌عنوان یک راهکار، از خاکستر به‌جامانده از سوختن رسوب‌های لجن خلیج گرگان، به‌عنوان یک ماده‌ی افزودنی جهت افزایش پارامترهای مقاومتی خاک لسی استفاده شده است. استفاده از مواد افزودنی، نظیر سیمان و آهک، مستلزم استخراج منابع طبیعی است، که پس از استخراج معادن، فرایند تولید این محصولات، نیازمند صرف انرژی، زمان، و نیروی انسانی و به‌تبع آن ایجاد آلودگی زیست‌محیطی است؛ بنابراین با به‌کارگیری رسوب‌های لجن، ضمن اینکه نیاز به استفاده از منابع طبیعی به‌عنوان ماده‌ی اولیه‌ی تولید محصول را کاهش خواهد داد، از انباشت مواد زائد و آلودگی‌های ناشی از این نهشته‌ها، جلوگیری به‌عمل خواهد آورد. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار مقاومتی برشی خاک لس تثبیت‌شده با SPA در طرح‌های بهسازی لایه‌های سطحی است، که کاربرد زیادی در راهسازی (لایه‌ی اساس و زیراساس) دارد. در این راستا، از آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم بر روی مخلوط خاک و SPA با انرژی تراکم یکسان (با توجه به کاربرد در راهسازی) و درصد رطوبت‌های متفاوت استفاده شده است. به‌صورت کلی، این موارد به‌عنوان نوآوری پژوهش در ارتباط با استفاده‌کردن از SPA مدنظر هستند:



(الف) (ب)



(پ) (ت)

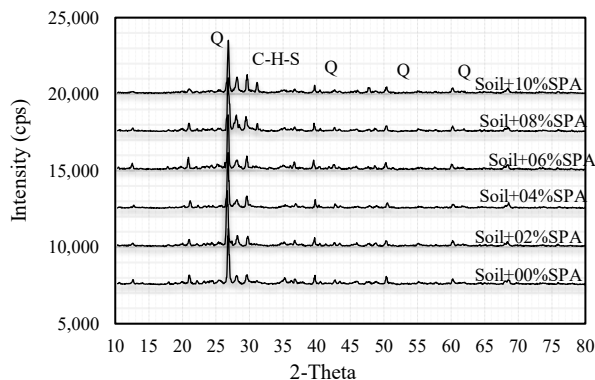


(ث)

شکل ۲. (الف) خاک لس، (ب) لجن، (پ) کوره‌ی سوزاندن لجن، (ت) تراکم نمونه‌ها، (ث) عمل‌آوری نمونه‌ها.

جدول ۳. مشخصات اجزاء شیمیایی مصالح - نتایج آزمون XRF.

	SPA	Loess
Temp (°)	1000°C	100°C
P ₂ O ₅	0.41	0.24
TiO ₂	0.82	1.14
SiO ₂	48.8	50.85
CaO	18	8.22
Al ₂ O ₃	13.9	4.69
K ₂ O	1.7	4.33
MgO	4	5.25
Cl	0.16	0.1
Na ₂ O	1.3	1.54
S	1.7	1.1
Fe ₂ O ₃	8.8	8.41
L.O.I	0.41	14.13

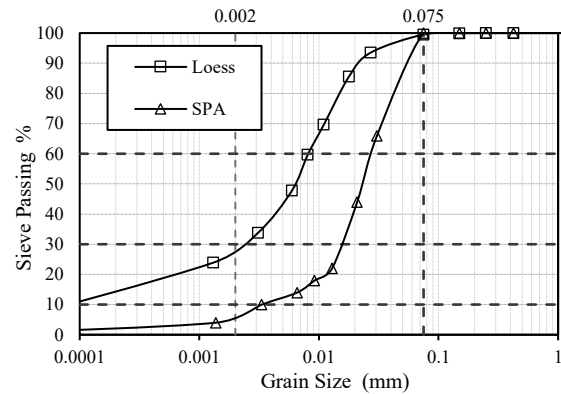


شکل ۵. نتایج آزمون XRD.

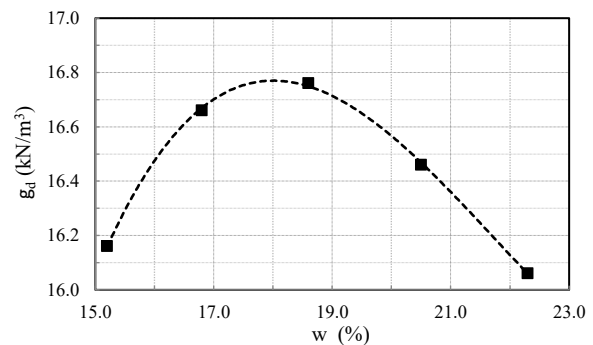
تغییرات ذرات مؤثر در واکنش‌های سیمان و پوزولانی تولیدشده از ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ناچیز بوده است. با این حال، از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار CaO و SiO₂ به ترتیب از ۱۱ و ۴۳ درصد به ۱۸ و ۴۹ درصد افزایش یافته است. بنابراین، دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌عنوان دمای بهینه در نظر گرفته شده و تمام لجن‌ها در این دما سوزانده شده‌اند. با بررسی دقیق‌تر اطلاعات ارائه‌شده در جدول ۳ برای نمونه‌ی سوخته‌شده‌ی لجن در دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که مقدار CaO حدود ۱۸٪ است و امکان انجام واکنش‌های سیمانی و در نتیجه تشکیل محصولات C-S-H را دارد. همچنین، به دلیل وجود SiO₂ و Al₂O₃، می‌توان انتظار داشت که واکنش‌های پوزولانی وابسته به زمان در مخلوط رخ دهد، که باعث بهبود خواص مقاومتی خاک رس می‌شود. در این راستا، در شکل ۵، منحنی آزمون طیف‌سنجی پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) مشاهده می‌شود. قله‌های نمودار مربوط به ژل C-S-H بوده و با افزایش دما، مقادیر C-S-H موجود در SPA، که محصولات سیمانی در جهت افزایش مقاومت است، بیشتر شده است.

۲.۲. طرح اختلاط

استفاده از SPA به‌عنوان جایگزین بخشی از خاک لس منجر به واکنش‌های شیمیایی می‌شود. اگر زمان عمل‌آوری در نظر گرفته شود، روش SPA مؤثر خواهد بود. ترکیب‌های شیمیایی SPA (ذرات SiO₂، Al₂O₃، و CaO) باعث توسعه‌ی فعالیت پوزولانی می‌شوند. تمام پارامترهای در نظر گرفته‌شده در فرایند نمونه‌سازی و آزمون‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن، درصد



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک لس.



شکل ۴. نتایج تراکم خاک پایه.

روانی ۲۱٪ و شاخص خمیری ۶۷٪ است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های اخیر، طبقه‌بندی خاک پایه با توجه به روش متحد، طبق استاندارد ASTM D۲۴۸۷^[۱۹] رس و لای با حالت خمیری کم (CL-ML) بوده است.

آزمون تراکم پروکتور استاندارد به روش A براساس استاندارد ASTM D۶۹۸^[۲۰] جهت حصول منحنی تراکم نمونه‌ی خاک لس و تعیین درصد رطوبت بهینه و مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک استفاده‌شده در آزمون انجام پذیرفته است. نتایج آزمون تراکم استاندارد خاک پایه (لس) انجام‌شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود. درصد رطوبت بهینه ۱۸٪ و مقدار تراکم بیشینه‌ی خشک آن ۱۶/۷۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب به‌دست آمده است.

• خاکستر لجن گرگان

در شکل (۲-ب)، لجن خلیج گرگان جمع‌آوری‌شده مشاهده می‌شود. یکی از اهداف مطالعه‌ی حاضر، تعیین دمای بهینه‌ای است که بیشتر محصولات فرعی سیمانی حاصل از سوختن مواد معدنی و آلی را تولید می‌کند. بنابراین لجن گرفته‌شده از محل خلیج گرگان، ابتدا در هوای آزاد خشک و سپس در کوره‌ی صنعتی در دماهای مختلف ۱۰۰، ۵۰۰، و ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد سوزانده شده است. برای سوزاندن نمونه‌های لجن از یک کوره‌ی صنعتی ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مجهز به کنترل دمای کوره (شکل ۲-پ) استفاده شده است. پس از خنک‌شدن لجن سوزانده‌شده، SPA در یک کیسه‌ی پلاستیکی دو زیپ قرار گرفت تا از تبادل رطوبت با محیط جلوگیری شود. ذرات SPA کوچک‌تر از الک ۲۰۰ بودند و طبق سیستم طبقه‌بندی یکپارچه‌ی ASTM D۲۴۸۷^[۱۹] به‌عنوان لای با خاصیت خمیری کم (ML) طبقه‌بندی شده‌اند.

با استفاده از تجزیه‌وتحلیل طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF)، اجزاء شیمیایی ذرات بررسی‌شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن،

است. در انتها، بیشینه‌ی تنش فشاری اعمال شده به نمونه، به‌عنوان مقاومت فشاری محصورنشده تعیین شده است.

• برش مستقیم

آزمون برش مستقیم از جمله آزمون‌هایی است که برای تعیین پارامترهای موردنیاز طراحی پی‌های سطحی، تعیین مقاومت برشی منابع قرضه‌ی مصالح، بررسی لغزش، و پایداری شیروانی‌ها، و طراحی دیوارهای حائل می‌توان از نتایج آن بهره گرفت. در آزمون برش مستقیم از لحاظ تئوری، برای به‌دست‌آوردن زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی، از مدل موهر-کلمب استفاده می‌شود. همچنین، با چند ساده‌سازی، به‌عنوان معیار گسیختگی برای خاک‌ها استفاده می‌شود.

جهت انجام آزمون برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D3080^[۲۲]، پس از اشباع‌سازی، نمونه‌ها به مدت دست‌کم ۲۴ ساعت تحت اثر سربار نرمال ۵۰، ۱۰۰، و ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و نیروی افقی به‌صورت آهسته و با سرعت ثابت ۰/۰۰۷ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه‌ها اعمال شده است.

• تحکیم یک‌بعدی

در هنگام بارگذاری خاک اشباع، تمام بار وارده به‌وسیله‌ی آب حفره‌ای تحمل می‌شود، که سبب افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. اما به مرور زمان، حجم خاک به‌دلیل زائل‌شدن فشار آب حفره‌ای، حجم خاک کاهش می‌یابد. مقدار این تغییر حجم خاک در اثر بارگذاری به پارامتر نفوذپذیری خاک مرتبط است، که به همین دلیل عموماً آزمون تحکیم بر خاک‌های ریزدانه، که نفوذپذیری کمتری نسبت به سایر خاک‌ها دارند، انجام می‌پذیرد. آزمون مذکور، روشی برای به‌دست‌آوردن و ارزیابی پارامترهای تحکیم تک‌بعدی ترزاقی، مانند نشانه‌ی فشردگی (C_c) و بازفشردگی (C_s) انجام می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که پتانسیل فروریزی خاک لس در پژوهش حاضر مطالعه نشده است؛ زیرا SPA به روش اختلاط مکانیکی با خاک لس مخلوط می‌شود و ساختار خاک فروریزی لس در اثر اختلاط و تراکم از بین می‌رود.

برای آزمون تحکیم براساس استاندارد ASTM D2435^[۲۳]، نمونه بین دو لایه سنگ متخلخل در استوانه‌ی اشباع قرار گرفته و درون آن از آب پر شده است. پس از اشباع‌سازی نمونه‌ها درون استوانه، دستگاه تحت بارگذاری‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۶۰۰ و باربرداری‌های ۴۰۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت، که تغییر حجم‌های حاصل در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ... دقیقه تا ۲۴ ساعت قرائت شده است.

۳. بحث و نتایج

نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌های متراکم‌شده با انرژی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. بر این اساس، استحکام نمونه‌ها با افزایش رطوبت کاهش یافته است. میزان رطوبت خاک کمتر از رطوبت بهینه‌ی نمونه را می‌توان به غیراشباع‌بودن خاک و پتانسیل ماتریکی خاک نسبت داد، که باعث افزایش مقاومت نمونه در خاک‌های رسی می‌شود. شایان ذکر است که براساس مطالعات قبلی پسرکلو و همکاران (۲۰۲۴)، محدوده‌ی درصد رطوبت بهینه‌ی حاصل از آزمون تراکم استاندارد، محدوده‌ی ۱۸ تا ۲۱ درصد است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۶، کاهش مشاهده‌شده در مقاومت فشاری محصورنشده با افزایش رطوبت با مطالعات پیشین خاک رسی توسط سنگ و

جدول ۴. مشخصات پارامترهای اندازه‌گیری‌شده.

Parameter	Values
SPA	0, 2, 4, 6, 8 & 10%
Water content	16, 18.5, 21, 23.5 & 26%
Processing time	56 days
Laboratory test	Unconfined compressive strength, direct shear and consolidation
Dimensions of the intact samples resulting from the compaction of the samples in the Proctor mold	Unconfined compressive strength (38 mm diameter and 76 mm height), direct shear (100 x 100 mm by 20 mm height) and consolidation (50 mm diameter and 20 mm height)
Processing conditions	Controlled at 24 degrees

SPA ها ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد متغیر و درصدهای رطوبت نمونه‌ها از ۱۶ تا ۲۶ درصد بوده است، که مطابق با مطالعات پیشین پسرکلو و همکاران ۲۰۲۴^[۱۶]، مد نظر قرار گرفته است. همچنین شایان ذکر است که مطابق ادبیات فنی، بهترین زمان عمل‌آوری محصولات حاوی SPA، بین ۱۴ تا ۵۶ روز، بسته به درصد اختلاط و شرایط عمل‌آوری، متغیر است.^[۱۶، ۱۱] بنابراین برای اطمینان از اتمام فعالیت‌های پوزولانی، زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه ملاک قرار گرفته است.

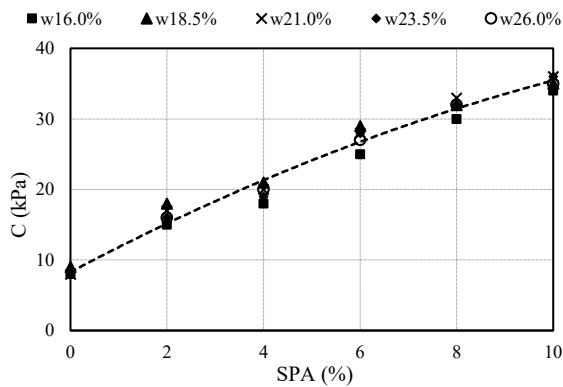
۳.۲. روش ساخت نمونه

برای تولید نمونه‌های همگن، خاک طبیعی به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک و سپس از الک شماره ۴ عبور داده شده است. خاک خشک‌شده طبق طرح اختلاط ذکرشده در جدول ۴ با آب و SPA مخلوط شده است، تا نمونه‌ای یکنواخت از نظر رنگ به‌دست آید. در پژوهش حاضر فرض بر این است که انرژی تراکم نمونه‌ها یکسان بوده است. بنابراین، تمام نمونه‌ها در قالب یک آزمون پروکتور استاندارد مطابق با انرژی آزمون اشاره‌شده متراکم شده‌اند (شکل ۲-ت). نمونه‌ها چند بار با چسب ۵ سانتی‌متری پیچیده و در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شده‌اند (شکل ۲-ث). نمونه‌های دست‌نخورده با مشخصات اشاره‌شده در جدول ۴، برای هر آزمون پس از زمان عمل‌آوری مشخص‌شده گرفته شده‌اند.

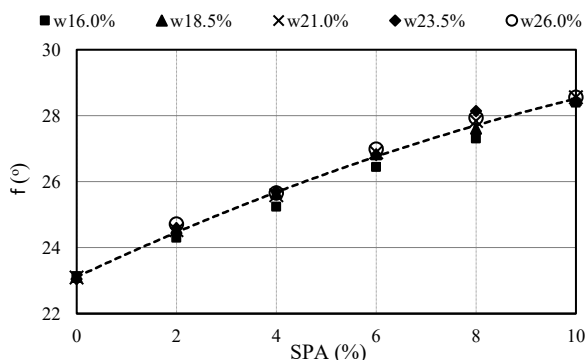
۴.۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

• مقاومت فشاری محصورنشده

آزمون مقاومت فشاری ذکرشده براساس استاندارد ASTM D2166^[۲۱] انجام شده است، که نوع خصوصی از آزمون سه‌محوری است و هدف از آن، تعیین مقاومت فشاری نمونه تحت فشار همه‌جانبه‌ی صفر است. سرعت بارگذاری در آزمون اخیر به‌گونه‌ای تنظیم شده است که در هر دقیقه، ۱٪ کرنش محوری در نمونه ایجاد شود. به‌ازاء تغییر شکل‌های معین، مقدار نیروی وارده یادداشت شده است. بارگذاری نیز تا زمانی که کرنش نمونه، به ۱۵٪ برسد، ادامه یافته



شکل ۹. تغییرات چسبندگی در ازاء SPA های مختلف.

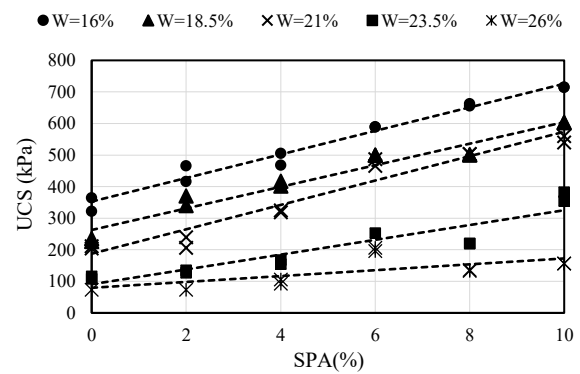


شکل ۱۰. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در ازاء SPA های مختلف.

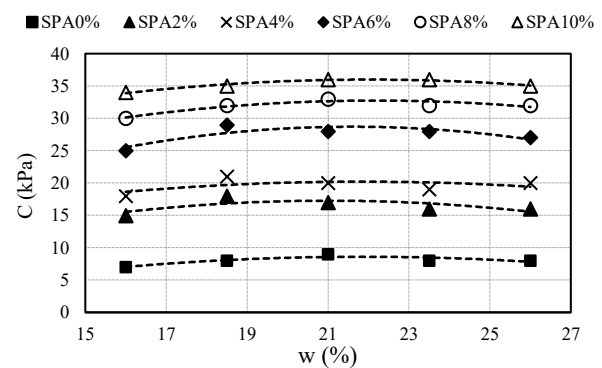
چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با درصد رطوبت محسوس نیست، که مزید بر علت آن مقاومت یکسان پیوندهای تشکیل شده در درصد رطوبت‌های متفاوت به واسطه‌ی اشباع‌سازی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون بوده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نیز تغییرات مقادیر C و f نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف SPA مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که افزایش مقدار SPA مسبب به‌وجود آمدن روندی افزایشی در مقدار C نمونه‌های تثبیت‌شده بوده است. با ارزیابی شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که تغییرات پارامتر f در نمونه‌های تثبیت‌شده، روندی مشابه تغییرات پارامتر C از خود نشان داده‌اند، اما شدت تغییرات اخیر به‌مراتب کمتر از پارامتر C بوده است رفتار مشابه روند افزایشی در پارامترهای C و f با افزودن مواد پوزولانی خاکستر سبوس برنج و ضایعات کریدکلسیم به خاک رس در پژوهش بابو^۳ و همکارانش (۲۰۲۳)^[۲۶] نیز مشاهده شده است. افزایش مقادیر پارامترهای C و f با افزودن و افزایش در مقدار SPA پس از عمل‌آوری به‌دلیل تولید ژل‌های C-S-H در فرایند هیدراتاسیون و افزایش مقدار آن به نسبت افزایش مقدار افزودنی مذکور است.

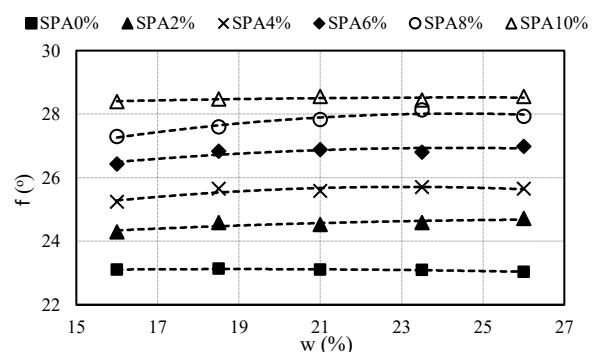
همچنین در شکل ۱۱، تغییرات زاویه‌ی اتساع، که حاصل تفاضل زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و حالت بحرانی است، مشاهده می‌شود. به‌عبارت دیگر، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی، از تنش برشی مربوط به گام‌های آخر بارگذاری در آزمون برش مستقیم (جایی که تقریباً ضمن اعمال کرنش ثابت، تنش برشی مقداری تقریباً ثابت دارد) تعیین شده است. مطابق شکل ۱۱ مشخص است که با افزایش درصد SPA، مقدار زاویه‌ی اتساع افزایش یافته است، که نشانگر رفتار ترد و شکننده‌ی نمونه‌هاست. به بیانی دیگر، با افزایش میزان SPA، هم زاویه‌ی



شکل ۶. مقاومت فشاری محصورنشده‌ی لس به‌سازی‌شده با SPA در درصد رطوبت‌های متفاوت.



شکل ۷. تغییرات چسبندگی در ازاء درصد رطوبت‌های مختلف.



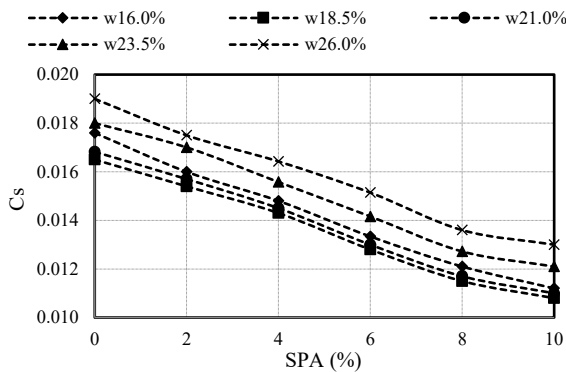
شکل ۸. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در ازاء رطوبت‌های مختلف.

تاناکا^۲ (۲۰۱۲)، مطابقت دارد.^[۲۴] همچنین همان‌طور که خواجه و همکاران (۲۰۲۳) توضیح داده‌اند، در رطوبت کمتر از حد رطوبت بهینه، مکش ماتریک خاک باعث افزایش تنش‌های تماس بین ذرات می‌شود، که باعث افزایش استحکام نیز می‌شود.^[۲۵] همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش SPA، مقاومت فشاری محصورنشده افزایش یافته است، که حاکی از تولید محصولات سیمانی و ایجاد پیوندهای سیمانی است.

آزمون برش مستقیم از رایج‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومتی از جمله: چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ذرات خاک (f) است. در شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی براساس تغییرات رطوبت مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها، تغییرات

³ Babu

² Seng & Tanaka



شکل ۱۳. تغییرات شاخص بازفشرده‌گی با درصد SPA.

تثبیت‌شده با SPA کاهش یافته است. کاهش اخیر با افزایش مقدار SPA شدت بیشتری از خود نشان داده است.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به بررسی تأثیر استفاده از ماده‌ی بازیافتی خاکستر لجن به‌دست‌آمده از خلیج گرگان به‌عنوان جایگزین بخشی از خاک پایه در بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک لس گرگان پرداخته شده است. استفاده از ماده‌ی آهکی خاکستر لجن سبب کاهش مصرف سیمان در طرح‌های بهسازی خاک‌های لسی می‌شود، که هم از لحاظ زیست‌محیطی و هم از جنبه‌ی اقتصادی حائز اهمیت است. جهت بررسی آثار جایگزینی خاکستر لجن در رفتار ژئوتکنیکی خاک لس فروریزی از آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم استفاده شده است. در ادامه، نتایج حاصل از آزمون‌های اخیر ارائه شده‌اند:

- با افزایش درصد رطوبت، مقاومت فشاری محصورنشده‌ی نمونه کاهش یافته است.

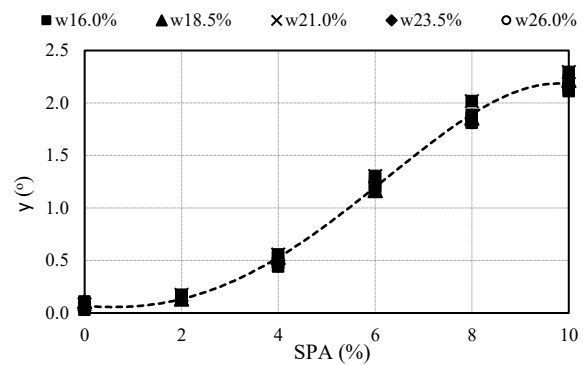
- افزایش افزودنی تا ۱۰٪ سبب بروز روند افزایشی محسوس در مقدار C پس از ۵۶ روز عمل‌آوری شده است.

- زاویه‌ی اصطکاک داخلی در این نمونه‌ها نیز روندی مشابه تغییرات پارامتر چسبندگی در زمان‌های عمل‌آوری ۵۶ روزه از خود نشان داده است، اما شدت تغییرات آن کمتر از چسبندگی بوده است.

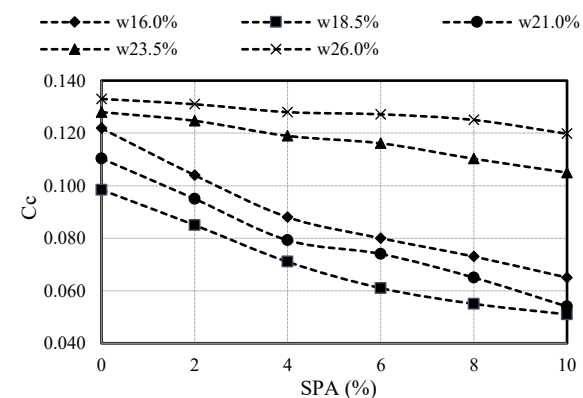
- افزایش ماده‌ی افزودنی در خاک لس سبب کاهش محسوس در مقادیر Cc و CS نمونه‌ها پس از ۵۶ روز عمل‌آوری شده است.

- در مقایسه با نمونه‌ی پایه، به‌طور کلی حضور خاکستر لجن خلیج گرگان در ترکیب، سبب کاهش مشهود شاخص فشرده‌گی شده است.

- در انتها، انجام سایر آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی مقاومتی، از جمله سه‌محوری و برش ساده برای بررسی دقیق‌تر اثر افزودن SPA به خاک لسی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۱. تغییرات زاویه‌ی اتساع در برابر مقادیر مختلف SPA.



شکل ۱۲. تغییرات شاخص فشرده‌گی با درصد SPA.

اصطکاک بیشینه و هم زاویه‌ی اصطکاک حالت بحرانی افزایش یافته‌اند، ولی سرعت افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی بیشینه نسبت به حالت بحرانی بیشتر بوده است. همچنین باید اضافه کرد که درصد رطوبت، پارامتر بسیار تعیین‌کننده‌ای در رفتار اتساعی خاک تثبیت‌شده با SPA نیست.

از آزمون تحکیم، جهت ارزیابی پارامترهای سختی و سرعت نشست سازه‌ها استفاده می‌شود. این نتایج تابعی از مقدار بارگذاری و چگونگی گام‌های آن و تداوم زمانی بارگذاری‌ها می‌م‌شود. در شکل ۱۲، تغییرات شاخص فشرده‌گی (Cc) برحسب تغییرات SPA و مقدار درصد رطوبت‌های گوناگون مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن ۲٪ SPA به خاک لس سبب کاهش محسوس در مقدار Cc نمونه‌ی تحت آزمون پس از عمل‌آوری شده است. افزایش مقدار SPA تا مقدار ۱۰٪ سبب کاهش بیشتر مقدار Cc در نمونه‌ها شده است. خواجه و همکارانش (۲۰۲۵) [۲۵] نیز کاهش شاخص فشرده‌گی در خاک رس نرم تثبیت‌شده با سیمان را گزارش کرده‌اند. در پژوهش ایشان، افزایش مقدار سیمان نیز سبب کاهش بیشتر شاخص فشرده‌گی شده است.

در شکل ۱۳، تغییرات شاخص تورم (Cs) نمونه‌های تثبیت‌شده با SPA و درصد رطوبت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، پارامتر CS در نمونه‌های

References- منابع

1. Kalantari, B., 2013. Foundations on collapsible soils: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering*, 166(2), pp. 57-63.
<https://doi.org/10.1680/feng.12.00016>
2. Haeri, S. M., Akbari Garakani, A., Roohparvar, H. R., Desai, C. S., Seyed Ghafouri, S. M. H., and Salemi Kouchesfahani, K., 2019. *Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. 1:*

- experimental investigations. *International journal of geomechanics*, 19(4), pp. 04019006.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001364)
3. Angelova, R.N., 2007. Loess-cement long-term strength-a facilitating factor for loess improvement applications. *Geologica Balcanica*, 36(3-4), pp.21-24.
<https://doi.org/10.52321/GeolBalc.36.3-4.21>
4. Zhang, C.L., Jiang, G.L., Su, L.J. and Zhou, G.D., 2017. Effect of cement on the stabilization of loess. *Journal of Mountain Science*, 14(11), pp.2325-2336.
<https://doi.org/10.1007/s11629-017-4365-4>
5. Vakili, A.H., Selamat, M.R. and Moayed, H., 2013. Effects of using pozzolan and portland cement in the treatment of dispersive clay. *The Scientific World Journal*.
<https://doi.org/10.1155/2013/547615>
6. Kajaste, R., Hurme, M., 2016. Cement industry greenhouse gas emissions management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, Volume 112, Part 5, pp 4041-4052.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
7. Ke, J., McNeil, M., Price, L., Khanna, N.Z. and Zhou, N., 2013. Estimation of CO₂ emissions from China's cement production: methodologies and uncertainties. *Energy Policy* 57: pp.172–181.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.028>
8. Amato, I., 2013. Green cement: Concrete solutions. *Nature*. 494 (7437): pp.300–301.
<https://doi.org/10.1038/494300a>
9. Alijani Shirvani, R. and Noorzad, R., 2019. Effectiveness of sludge ash of wood and paper mill as nontraditional additive for clayey soil treatment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019230.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002877](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002877)
10. Kumar, A. and Gupta, D., 2016. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), pp.466-474.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.010>
11. Gupta, D. and Kumar, A., 2017. Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ash-clay mixture as a highway construction material. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(1), pp.159-169.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>
12. Arora, S. and Kumar, A., 2019. Bearing capacity of square footing resting on fibre-reinforced pond ash overlying soft clay. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, pp.1-11.
<https://doi.org/10.1007/s40891-019-0155-0>
13. Gupta, D., Kumar, A., Kumar, V., Priyadarshini, A. and Sharma, V., 2019. Performance of pond ash and rice husk ash in clay: a comparative study. In *Recycled Waste Materials: Proceedings of EGRWSE 2018*, pp.145-153. Springer Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-7017-5_17
14. Gupta, G., Sood, H. and Gupta, P., 2020. Performance evaluation of pavement geomaterials stabilized with pond ash and brick kiln dust using advanced cyclic triaxial testing. *Materials*, 13(3), p.553.
<https://doi.org/10.3390/ma13030553>
15. Mogili, S., Mudavath, H. and Gonavaram, K.K., 2021. Effect of Stabilization on Geomechanical Properties of Pond Ash for Pavement Subbase Application. In *Transportation, Water and Environmental Geotechnics: Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020 Volume 4*, pp.177-187. Springer Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-2260-1_17
16. Pesarakloo, V., Lajevardi, S.H., MolaAbasi, H. and Mirhosseini, S.M., 2024. Potential application of sludge pond ash as a novel additive for clay stabilization. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 133, p.103534.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103534>
17. ASTM D422., 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils.
<https://doi.org/10.1520/D0422-63R07>
18. ASTM D4318-10., 2005. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
<https://doi.org/10.1520/D4318-10>
19. ASTM D2487-17., 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
<https://doi.org/10.1520/D2487-17>
20. ASTM D698-12., 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
<https://doi.org/10.1520/D0698-12>

21. ASTM D2166-06., 2006, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
<https://doi.org/10.1520/D2166-06>
22. ASTM D3080-04., 2004. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
<https://doi.org/10.1520/D3080-04>
23. ASTM D2435., 2004. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. <https://doi.org/10.1520/D2435-04>
24. Seng, S. and Tanaka, H., 2012. Properties of very soft clays: A study of thixotropic hardening and behavior under low consolidation pressure. *Soils and Foundations*, 52(2), pp.335-345.
25. Khajeh, A., Chenari, R.J., Payan, M. and MolaAbasi, H., 2023. Assessing the effect of lime-zeolite on geotechnical properties and microstructure of reconstituted clay used as a subgrade soil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 132, p.103501.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103501>
26. Babu, J.S., Timothy, R.S.W., Shantharam, Y., Arun, M. and Sivakumar, T., 2023. Enhancing the compaction properties of frictional-cohesive soil by adding the industrial ash products. *In AIP Conference Proceedings (Vol. 2782, No. 1)*. AIP Publishing.
<https://doi.org/10.1063/5.0155191>

راهنمای نگارش مقالات مجله‌ی علمی و پژوهشی

شریف

مجله‌ی علمی و پژوهشی «شریف»، از انتشارات دانشگاه صنعتی شریف است که هدف آن فراهم آوردن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی، فنی و تخصصی در میان استادان و دانشمندان و اعتلای سطح دانش نظری و علمی آنان و نیز تهیه‌ی مجموعه‌ی مفید است. چاپ مقالات در مجله‌ی شریف منوط به دارا بودن یکی از ویژگی‌های زیر است:

۱. مقالاتی که حاوی مطالب بدیع در زمینه‌های علمی و فنی بوده و در مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده باشند؛ مقاله‌های ارائه شده در کنفرانس، از این امر مستثنی هستند و مانند سایر مقالات، ارزیابی شده و در صورت تایید به چاپ می‌رسند.

۲. مقالات مبتنی بر تحقیقات نظری و علمی پیشرفته، دارای یکی از مشخصات زیر:

۱.۲. با نقد و بررسی در موضوعات فنی و مهندسی، به طرح نظرهای جدیدی پرداخته و به نتایج تازه‌ی دست یافته باشند.

۲.۲. به اختصار و در زمینه‌های فنی، صنعتی و پژوهشی تدوین شده باشند.

۳.۲. پژوهش، تلخیص و استنتاج از برخی آثار برجسته‌ی علمی و فنی باشند.

* مشخصات مقالات ارسالی:

مقاله به صورت دوتونی (طول سطر ۸/۵ سانت) در قالب نرم افزار Word با قلم نازنین پوینت ۱۲ با فاصله سطر مناسب (تمامی معادلات، علائم ریاضی، رابطه‌ها الزاماً فقط در محیط Mathtype ارائه شود) و منضم به نامه معرفی مقاله از سوی استاد راهنما به نشانی سایت مجله <http://journal.sharif.ir> به دفتر مجله ارسال شود.

* ضمن معرفی نویسنده مسئول مقاله، نشانی پست الکترونیکی کلیه نویسندگان قید شود.

* صفحه عنوان شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج آخرین درجه علمی کلیه نویسندگان، نشانی پست الکترونیکی ایشان، چکیده فارسی بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ کلمه، چکیده انگلیسی در حد یک صفحه A4 کامل (قلم Times فونت ۱۲) و کلمات کلیدی فارسی و انگلیسی ارائه شود.

* سایر اجزای اصلی مقاله، نظیر مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی و زیربخش‌ها، نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد، حجم مقاله نیز بین ۷ - ۱۵ صفحه -- با احتساب شکل و نمودار -- باشد.

* کلیه‌ی عبارات، اصطلاحات و اعداد و ارقام در جداول، نمودارها و شکل‌ها باید به فارسی باشد و موضوع جداول در بالای آنها و موضوع شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها درج شود.

نکته: از آنجا که مطالب مجله در ستون‌های ۸/۵ سانتی‌متری آراسته می‌شوند، لازم است اصل (اورژینال) شکل و نمودار در عرض ۸ یا ۱۶ سانتی‌متر با ضخامت کادر ۸px و خط نمودار ۶ px تهیه شوند. پذیرش اصل شکل‌ها و نمودارها فقط در محیط فتوشاپ با Resolution 600 یا پسوند JPG یا Tif امکان‌پذیر است.

* از به کار بردن کلمات و اصطلاحات لاتین که دارای معادل متداول فارسی می‌باشند، اجتناب شود. در صورت ضرورت استفاده از واژه‌ی لاتین، معادل انگلیسی آن نیز داده شود.

یادآوری مهم و ضروری: با توجه به یکسان سازی شکل‌های کلیه مقالات در محیط فتوشاپ، لازم است اعداد تصاویری که دارای راهنمای رنگی و کانتور (فشار، سرعت، تنش و...) هستند، با فرمت جنرال (عدد معمولی) ارائه شود (طبق شکل‌های نمونه) و از آوردن اعداد به صورت نماد علمی و سایر نمادها جدا خودداری شود.

* کلیه‌ی منابع مورد استفاده، شماره‌بندی (از شماره یک و به‌طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی ارائه شود. با توجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. (مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی (In Persian) داخل پرانتز قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند).

Examples:

Journals:

Mirghafoori, S.H., Sadeghi Arani, Z. and Jafarnejad, A. "Forecasting success of commercialization of innovative ideas using artificial neural networks; the case of inventors and innovations in Yazd province", *Journal of Science and Technology Policy*, **4**(1), pp. 63-76 (In Persian) (2011).

Journals:

Johnson, W. and Mamalis, A.G. "The preformation of circular plat with four sided pyramidally - headed square-section punches", *Int. J. of Mech. Sci.*, **20** (3), pp.801-820 (1990).

Books:

Hindmarsh, J. "The electrical-circuit viewpoint", *In Electrical Machines and their Applications*, P. Hammond, Ed., 4th Edn., pp. 57-130, Pergamon Press, Oxford, UK (1975).

Proceedings and reports:

Walker, L.K. and Morgan, J.R. "Field performance of firm silty clay", *9th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 1, Tokyo, Japan, pp.341-346 (1977).

Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns", Report SCEGIT 83-10, Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, submitted to Fed. Highway Admin (1983).

Bhandari, R.K.M. "Behavior of tank founded on soil reinforced with stone columns", *VIII European Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Helsinki (1983).

Civil Engineering

Sharif

2

**Summer
2025**

Editor-in-Chief: Mirmosadegh Jamali

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published quarterly in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, ``**Sharif**'' publishes original papers focusing on issues of specific concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN

Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983

Web: <http://journal.sharif.ir/>

<http://www.globalsciencejournals.com>

E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

- 1 Experimental Study of the Yield Surface of Saturated Silty Tailings**
Amirabbas RiyahiKhoo and Ali Akhtarpour
- 13 Analysis of Plane Multi-Span Frames with the Analytical Method of Force-Displacement Combination**
Amirhosein Bahreini, Ali Asgari, Alireza Khabiri and Reza Taghipour
- 28 Mathematical Modeling of Uncertainty in River Cross-Sections on Hydrodynamic Parameters of Steady Flow**
Raziyeh Valizadeh, Mahdi Mazaheri and Jamal Mohammad Vali Samani
- 42 Investigation of Liquefiable Sandy Soil Improvement by Ordinary and Geotextile-Reinforced Stone Columns Using a Small-Scale Shaking Table**
Parna Yarbakhti and Ali Akbar Golshani
- 58 An Integrated Approach for Simulation of Two-Phase Flows in Naturally Fractured Reservoirs Using Embedded Discrete Fracture Model and Aerial Image Processing**
Ali Heshmati and Mehrdad T. Manzari

Review Article:

- 70 Decentralized Urban Runoff Management with Emphasis Upon On-Site Runoff Pollution Reduction: A Systematic Review**
Farkhondeh Khorashadi Zadeh, Mohadeseh Shafiei, Ali Asadi, Leila Mosleh, Mohammad Reza Jabedari and Alireza Moghaddam Nia

Research Notes:

- 90 A Review of the Physics of Debris Flows and the Significance of Employing the Unsaturated Soil Conditions in Estimating the Erosion Volume**
Anahita Aghagoli and Hamed Sadeghi
- 104 Providing a Pricing Model for Shuttle Taxi Services in Isfahan City**
Aamin Najafi, Amir Masoud Rahimi and Mohsen Aboutalebi Isfahani
- 114 Investigating the Effect of Gorgan Bay's Sludge Ash on the Mechanical Parameters of Gorgan Loess Soil at Different Moisture Content and the Same Compaction Energy**
Vahid Pesarakloo, Seyed Hamid Lajevardi, Hosein MolaAbasi and Seyed Mohammad Mirhoseini