

افزایش دقت رویکرد پردازش تصویر دو بُعدی جهت تخمین منحنی های تنش - کرنش در آزمایش های سه محوری

حسین جهان خواه* (دانشیار)

سپهر نظری (کارشناسی ارشد)

جواد جلیلی (استادیار)

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۱ (ص. ۳۸-۳۵، شماره ۲/۳، ص. ۶۵-۵۵، پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر، با پردازش تصاویر نمونه‌ی سه محوری در حین آزمایش، تغییرات قطر و حجم آن با دقت مناسب برآورد شده و جهت راستی‌آزمایی روش پیشنهادی، مقایسه‌ی میان نتایج آن با نتایج ثبت شده از طریق اندازه‌گیری‌های متداول آزمایشگاهی انجام پذیرفته است. مقایسه‌ی اخیر نشان داد که نتایج آزمایش‌های سه محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده بر روی نمونه‌های خاک اشباع در هر دو روش ذکر شده، تطابق قابل قبولی داشتند. دستاورد نخست پژوهش حاضر، دستیابی به دقت تخمین تغییرات حجم، در حد رویکردهای پردازش تصویر سه بُعدی، علیرغم استفاده از پردازش تصویر دو بُعدی است. به گونه‌ی که تا کرنش ۱۰ درصد، میزان خطای رویکرد پردازش تصویر، در محاسبه‌ی تغییرات حجم نمونه، نسبت به رویکرد متداول در محدوده‌ی ۱/۰۰ تا ۲/۰۰ بوده است. برای کرنش‌های بالاتر تا ۲۰ درصد، در بیشتر آزمایش‌ها، خطای رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول تا محدوده‌ی ۵/۰۰ نیز رسیده است. دستاورد دوم، حذف فرایندهای واسنجی پیچیده از مراحل برداشت بوده است که روش مذکور را کاربردی می‌سازد. در نهایت، دستاورد سوم، امکان بررسی رفتارهای درون المانی با دقت مناسب بوده است.

واژگان کلیدی: پردازش تصویر، آزمایش سه محوری، تغییرات حجم نمونه، منحنی تنش - کرنش، تغییرات قطر نمونه.

۱. مقدمه

در طبیعت، خاک‌هایی که در معرض ساخت و سازهای عمرانی واقع می‌شوند و خصوصیات مهندسی آنها باید شناسایی شود، لزوماً در شرایط اشباع قرار ندارند. با توجه به تأثیر رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ی خاک در رفتار آن، لازم است که در آزمایشگاه نیز همان شرایط طبیعی خاک شبیه‌سازی شود. یکی از چالش‌های عمده‌ی غیراشباع بودن نمونه‌ی خاک در آزمایشگاه، بالا بودن هزینه‌ی تجهیزات اندازه‌گیری تغییرات قطر نمونه در طول بارگذاری است. میزان تغییر حجم ناشی از بارگذاری در خاک‌های غیراشباع به دلیل وجود هوا برابر با میزان آب خروجی نخواهد بود و تجهیزات متداول از برآورد آن عاجزند.^[۱] نیاز به دانش تخصصی پیشرفته جهت تفسیر رفتار خاک‌های غیراشباع نیز از دیگر عوامل چشم‌پوشی از انجام آزمایش‌های غیراشباع و اقبال آزمایشگاه‌ها به اشباع ساختن نمونه‌ها در هر حال است. این در حالی است که وجود هوا در خاک غیراشباع باعث به وجود آمدن مکش بافتی می‌شود و با اشباع کردن

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۲/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۴/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۴/۲۹

DOI:10.24200/J30.2022.60142.3089

h.jahankhah@iiees.ac.ir
sepehr.nazari@stu.iiees.ac.ir
jalili@iiees.ac.ir

خاک غیراشباع، نیروی مذکور نادیده گرفته می‌شود و مشخصات به دست آمده از آزمایش اشباع شده با مقدار واقعی آن (خاک غیراشباع) متفاوت خواهد بود.^[۲-۴] به همین دلیل برای ارزیابی رفتار خاک غیراشباع و یا اشباع، روش‌هایی اقتصادی‌تر از روش‌های اندازه‌گیری مکانیکی و بر مبنای پردازش تصویر ارائه شده است. مجموعه‌ی مطالعاتی که در زمینه‌ی آزمایش‌های سه محوری با استفاده از پردازش تصویر صورت گرفته است را می‌توان به سه بخش: پردازش تصویر با استفاده از اشعه‌ی ایکس، پردازش تصویر به صورت سه بُعدی و پردازش تصویر به صورت دو بُعدی تقسیم‌بندی کرد. در ادامه، ادبیات فنی مربوط به هر سه بخشی که بیشتر به آن‌ها اشاره شده است؛ به صورت گذرا ارائه شده است. جهت رعایت اختصار، در هر بخش از میان مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگران، به ۵ نمونه‌ی پژوهش اشاره شده است. لنویر^۱ و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از رویکرد اشعه‌ی ایکس توانستند نحوه‌ی تشکیل باند برشی یا خط گسیختگی را در طول بارگذاری نمونه اندازه‌گیری کنند.^[۵] اوتانی^۲ و همکاران (۲۰۰۵) و هیگو^۳ و همکاران (۲۰۱۲) نیز با استفاده از رویکرد اشعه‌ی ایکس، نحوه‌ی تشکیل خط گسیختگی در طول نمونه، تغییرات

شکل موضعی و تغییرات حجم موضعی در طول بارگذاری را محاسبه کردند.^[۷۶] کرمی^۴ و همکارانش (۲۰۱۵)، نیز توانستند نحوه تشکیل باند برشی، نحوه مترام شدن نمونه ماسه‌بی، اتساع و شکستگی دانه‌ها را در تنش‌های تحکیمی بالا توسط تصویربرداری با اشعه ایکس بررسی کنند.^[۸] چنگ^۵ و همکارانش (۲۰۲۰)، با توسعه یک دستگاه سه‌محوری و روش‌های پیشرفته‌ی اشعه ایکس، رفتار دینامیکی دانه‌های خاک را در مقیاس میکرو بررسی کردند.^[۹] ژنگ^۶ و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از چندین دوربین در موقعیت‌ها و جهت‌گیری‌های متفاوت نسبت به نمونه و دستگاه سه‌محوری، با استفاده از یک صفحه‌ی کالیبراسیون مش‌بندی شده‌ی دقیق برای تبدیل واحد پیکسل به میلی‌متر، حجم کل و تغییرات حجم نمونه‌ی غیراشباع در طول بارگذاری را به صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری کردند.^[۱۰]

ریچماچر^۷ (۲۰۰۹) و ونگ^۸ و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعات مشابه با استفاده از دو دوربین، صفحات واسنجی شطرنجی و استوانه‌یی، تغییرات حجم و تغییرات تنش نمونه در طول بارگذاری را به صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری کردند.^[۱۱] لین^۹ و همکارانش (۲۰۲۱)، تغییرات غیریکنواخت نمونه را که یکی از چالش‌های اساسی پژوهشگران است، با استفاده از نقاط دایره‌یی شکل ماتریسی که بر روی غشاء قرار گرفته و یک نرم‌افزار مخصوص در پردازش تصاویر سه‌بعدی، اندازه‌گیری کردند.^[۱۲] فایک^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از عکس‌برداری در جهت‌های مختلف نمونه و صفحه‌ی مش‌بندی شده با نقاط مشکی‌رنگ به فاصله‌ی مشخص از هم، که بر روی غشاء نمونه قرار گرفته بود، حجم مطابق نمونه در طول بارگذاری را اندازه‌گیری کردند.^[۱۳]

میکری^{۱۱} و همکاران (۱۹۹۷)، با استفاده از یک دوربین در فاصله‌ی معین از نمونه و دستگاه سه‌محوری، تغییرات حجم نمونه را به صورت دوبعدی اندازه‌گیری کردند.^[۱۴] باقریه^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از روش لبه‌یابی، با یک دوربین در فاصله‌ی معین از نمونه و دستگاه سه‌محوری و استفاده از ۴ استوانه به اندازه‌های مختلف در بخش واسنجی، تغییرات حجم نمونه تحت حالت اشباع را اندازه‌گیری کردند.^[۱۵] در جدیدترین مطالعات با رویکردهای دوبعدی، تغییرشکل‌های خاک‌های ماسه‌بی اشباع توسط کوزکی^{۱۳} (۲۰۱۸)، با روش پردازش تصویر مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری شده است.^[۱۶] ساچان^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از یک دوربین در فاصله‌ی معین از نمونه و صفحه‌ی مش‌بندی شده با نقاط دایره‌یی شکل، معادله‌ی خط باند برشی نمونه که ناشی از تغییرشکل نمونه در طول بارگذاری فشاری است، را با استفاده از روش پردازش تصویر به صورت دوبعدی اندازه‌گیری و مشخصاتی شامل: زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک موردنظر را استخراج کردند.^[۱۷] دانگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از یک دوربین و صفحه‌ی مش‌بندی شده با قطعات مربعی شکل، تغییرات تنش - کرنش نمونه در طول بارگذاری را اندازه‌گیری کردند.^[۱۸]

مطابق جمع‌بندی حاصل از مطالعات ارائه شده در بخش ادبیات فنی، هر چه فرایند استفاده شده در تصویربرداری، شامل: روش تصویربرداری، تعداد ادوات ثبت تصویر همزمان، نحوه‌ی نورپردازی و نحوه‌ی کالیبراسیون به سمت سادگی سوق داده شده است، از دقت نتایج حاصل کاسته شده است. به گونه‌یی که نتایج گزارش شده در رویکرد تصویربرداری دوبعدی با یک دوربین، کمترین دقت را در پی داشته است. همچنین در رویکردهای دوبعدی مطرح شده، فرایند واسنجی به گونه‌یی بوده است که امکان پیاده‌سازی آن در آزمایشگاه‌های موجود در صنعت ساختمان، به سختی امکان‌پذیر است. این امر امکان بهره‌مندی از مزایای رویکرد پردازش تصویر در فرایندهای متداول صنعتی را با دشواری مواجه ساخته و رویکرد مذکور عملاً در صنعت جایگاه خود را نیافته است. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه‌ی راهکاری

است که با حفظ دقت و حذف یا کاهش مشکلات پیش گفته، امکان پیاده‌سازی در صنعت را داشته باشد. برای این منظور در نظر است ضمن حفظ سادگی استفاده از رویکرد پردازش تصویر دوبعدی، دقت آن در برآورد تغییرات حجم نمونه در حد رویکردهای سه‌بعدی افزایش یابد.

در پژوهش حاضر، با استفاده از یک دوربین از نمونه‌های متفاوت خاک در دستگاه آزمایش سه‌محوری در حین بارگذاری، تصویربرداری انجام شده و ۶ نمونه‌ی خاک اشباع به صورت زهکشی شده در دستگاه سه‌محوری متداول (فاقد تجهیزات مکانیکی اندازه‌گیری خصوصیات خاک غیراشباع) آزمایش تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده قرار گرفته‌اند. با انجام آزمایش زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع، امکان اندازه‌گیری تغییر حجم نمونه از طریق ادوات مکانیکی دستگاه نیز امکان‌پذیر است. در هر ۶ نمونه، که بیشتر به آن اشاره شده است، ۳ نمونه با چگالی نسبی بالا و ۳ نمونه با چگالی نسبی متوسط در نظر گرفته شده‌اند. هر نمونه به صورت جداگانه بارگذاری و اطلاعات مربوط به تغییرات حجم و قطر آن، هم از طریق تجهیزات مکانیکی دستگاه و هم با پردازش تصویر به روش ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر، استخراج و مقایسه شده است. همچنین از اطلاعات به دست آمده، منحنی تنش کل - کرنش با دقت مناسب به دست آمده است. هر چند نوشتار حاضر به بیان نتایج آزمون‌های صورت گرفته بر نمونه‌های اشباع جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی بسنده کرده است، لیکن روش مذکور بر روی نمونه‌های غیراشباع نیز قابل استفاده است. با توجه به پیش نیازهای محاسبات تنش مؤثر و عدم فراهم بودن آن‌ها در بسیاری از موارد، کماکان محاسبات تنش کل در تعیین رفتار خاک‌های غیراشباع، کاربرد مهندسی فراوانی دارند. در حال حاضر با امکانات موجود بسیاری از آزمایشگاه‌های فنی و مهندسی، امکان اندازه‌گیری دقیق منحنی رفتاری تنش کل برای خاک غیراشباع بکرو وجود ندارد، که ناشی از صعوبت اندازه‌گیری تغییرات دقیق قطر این‌گونه نمونه‌هاست. یکی از کاربردهای اصلی چارچوب پیشنهادی نوشتار حاضر، رفع مشکل اخیر با فراهم ساختن امکان همسان‌سازی رفتار مدل‌های رایانه‌یی با رفتار نمونه‌های خاک است. با استفاده از منحنی‌های رفتاری تنش کل حاصل از روش پیشنهادی، پارامترهای تغییرشکلی و مقاومتی متناظر با وضعیت خاک با دقت مناسب واسنجی خواهند شد. با به‌کارگیری پارامترهای تنش کل مذکور، می‌توان در نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی همچون محاسبات تعادل حدی پایداری شیب و محاسبات عددی، مدل‌های رفتاری متناظر با رفتار تنش کل را واسنجی کرد. در واقع روش پیشنهادی قادر خواهد بود تغییرات حجم و تغییرات منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی هرگونه خاکی را تحت شرایط بکر و اولیه‌ی خودش و با روشی آسان، اقتصادی، و با دقت قابل قبول محاسبه کند. متناسب با هدف پژوهش حاضر، که در عنوان نیز به آن اشاره شده است، جهت افزایش سهولت و دقت برداشت نسبت به روش‌های متداول پردازش تصویر دوبعدی، گام‌هایی در پیش گرفته شده است که نوآوری‌های پژوهش حاضر را شکل می‌دهد.

نخست، استفاده از ارتفاع ثبت شده توسط ال‌وی‌دی‌تی^{۱۶} دستگاه، در مراحل بارگذاری، به جای محاسبه‌ی آن از پردازش تصویر است. این امر موجب می‌شود خطاهای محاسباتی پردازش تصویر فقط به محاسبه‌ی قطر منحصر و ارتفاع با خطای کمتری برآورد شود. دوم آنکه، در محاسبه‌ی حجم اولیه، به‌جای محاسبه از پردازش تصویر، مقدار به دست آمده از اندازه‌گیری قبل از آزمایش مبنا قرار گرفته است که این امر نقطه‌ی شروع نمودارها را بر هم منطبق می‌کند. سوم آنکه، در فرایند واسنجی از اندازه‌گیری‌های قبل از آزمایش که با روابط آیین‌نامه‌ی ASTM-DV۱۸۱ تصحیحات مربوط به فرایندهای اشباع و تحکیم روی آن‌ها انجام شده، استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی، ضرایب واسنجی، که مربوط به تعیین مقیاس هر پیکسل

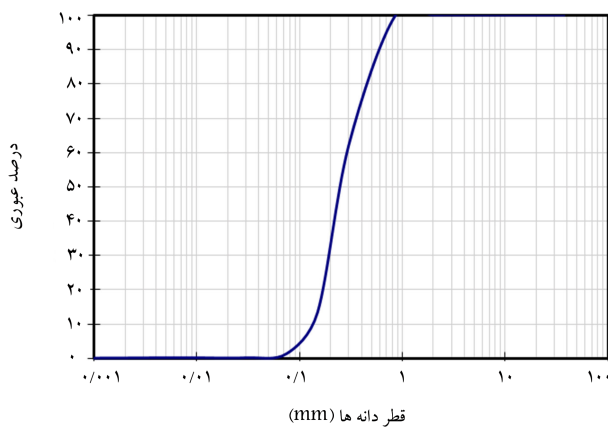
شده است. ضرایب C_c و C_u برای ماسه‌ی S۱۶۱، مطابق جدول ۱، به ترتیب برابر $0/88$ و $1/87$ بوده و چگالی ویژه‌ی دانه‌ها مقداری برابر با $2/64$ داشته است. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی فیروزکوه در شکل ۲ مشاهده می‌شود که مطابق آن، چون ضریب انحناء خاک موردنظر کوچک‌تر از ۱ بوده است، دانه‌بندی به صورت یکنواخت و بد است.^[۲۰]

۳.۲. دوربین

دوربین استفاده شده در آزمایش کنونی از نوع کانن (D ۶۵۰) با وضوح ۲۰ مگاپیکسل و بزرگ‌نمایی ۳ بوده است. عکس‌برداری هر ۱۵ ثانیه یک‌بار با فاصله‌ی کانونی ۵۵ میلی‌متر و قاب عکس‌برداری 5184×3456 پیکسل صورت گرفته است. دوربین مذکور از طریق کابل‌های USB ۱.۷ به رایانه متصل و پس از قرارگیری دوربین بر روی سه پایه و ثابت کردن محل قرارگیری آن، دوربین نسبت به دستگاه سه‌محوری تراز شده است. برای عکس‌برداری خودکار از نمونه حین بارگذاری، یک زمان‌سنج رقومی بر روی دوربین تجهیز شده است. در آزمایش‌های پژوهش حاضر، بعد از تنظیم زمان بین دستگاه داده‌بردار و زمان‌سنج دوربین، بارگذاری و عکس‌برداری با نرخ کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

۴.۲. نورپردازی

در پژوهش حاضر، برای ایجاد یک نورپردازی مناسب از ساده‌ترین ابزار (یک چراغ مطالعه) در پشت دوربین استفاده شده است. در ابتدا، دوربین بر روی سه پایه جای‌گذاری شد. این مجموعه باید تا حد امکان به دستگاه سه‌محوری و نمونه نزدیک



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی فیروزکوه.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی فیروزکوه.

| | |
|---------|---|
| ۲/۶۴ | چگالی نسبی دانه‌های جامد G_s |
| ۰/۸۸ | ضریب انحناء C_c |
| ۱/۸۷ | ضریب یکنواختی C_u |
| ۰/۸۳ | نسبت تخلخل بیشینه e_{max} |
| ۰/۵۲ | نسبت تخلخل کمینه e_{min} |
| ۰/۲۳ mm | بزرگترین قطری که ۵۰ درصد ذرات خاک از آن ریزتر هستند (D_{50}). |

بر حسب میلی‌متر است، را با دقت مناسبی به دست می‌دهد، بدون اینکه نیازی به فرایندهای پیچیده‌ی واسنجی باشد. در ادامه، به ترتیب به معرفی دستگاه سه‌محوری، مصالح آزمایش، دوربین، نورپردازی، فرایند آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش، نرم افزارهای استفاده شده در رویکرد پردازش تصویر پرداخته و در آخر، نتایج حاصل از روش پردازش تصویر پیشنهادی با نتایج حاصل از رویکرد متداول یا سنتی در برآورد منحنی‌های تنش - کرنش مقایسه شده است.

۲. تصویربرداری از آزمایش‌های سه‌محوری

۱.۲. دستگاه سه‌محوری

دستگاه سه‌محوری، خصوصیات تغییرشکل و مقاومت برشی خاک را در حالت‌های مختلف زهکشی اندازه‌گیری می‌کند. نمونه‌ی استوانه‌ی شکل خاک در دستگاه سه‌محوری، ابتدا با فشار همه‌جانبه‌ی محفظه که معمولاً به واسطه‌ی سیالی چون آب به نمونه منتقل می‌شود، به شرایط تنش اولیه در محل نزدیک می‌شود. سپس نمونه با اهرم بارگذاری قائم تحت فشار محوری واقع می‌شود. تنش فشاری، موجب شکل‌گیری تنش برشی و گسترش آن در درون نمونه می‌شود.^[۲۱] در دستگاه‌های مخصوص انجام آزمایش سه‌محوری، با توجه به ظرفیت بارگذاری دستگاه و نوع خاک موردآزمایش، امکان افزایش بارگذاری و بررسی تغییرشکل تا لحظه‌ی شکل‌گیری ناحیه‌ی لغزش در نمونه (باند برشی) وجود دارد. نمونه‌ی سه‌محوری معمولاً درون یک غشاء لاستیکی قرار داده می‌شود تا بتوان تغییر رطوبت و زهکشی آن را با شیرهای دو انتهای نمونه کنترل کرد. اندازه‌گیری‌های مکانیکی متداول در دستگاه سه‌محوری، شامل ثبت تغییرات ارتفاعی نمونه و تغییرات حجم آن در صورت اشباع بودن نمونه است.^[۲۱] در شکل ۱، دستگاه سه‌محوری استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر مشاهده می‌شود. مقدار تغییر ارتفاع نمونه توسط جابه‌جایی‌سنج قائم آنالوگ با دقت $0/01$ میلی‌متر و مقدار تغییر حجم آن توسط لوله‌ی مدرج حاوی حسگر اندازه‌گیری فشار سربرآب داخل لوله‌ی مدرج با دقت $0/01$ سی‌سی اندازه‌گیری می‌شود.

۲.۲. مصالح موردآزمایش

خاک استفاده شده در آزمایش‌ها، ماسه‌ی استاندارد فیروزکوه S۱۶۱ بوده است، که دانه‌بندی یکنواختی داشته و از نوع شکسته‌ی سیلیسی بوده است که به شکل صنعتی و توسط سنگ‌شکن در شمال کشور تولید می‌شود. ماسه‌ی S۱۶۱، رنگ زرد طلایی دارد و آزمایش دانه‌بندی آن بر مبنای استاندارد ASTM D ۴۲۲ انجام



شکل ۱. دستگاه سه‌محوری و تجهیزات آن.

باشد تا کیفیت عکس‌ها افزایش یابد. بعد از این مرحله، چراغ مطالعه طوری در پشت دوربین تنظیم شد که لبه‌های اطراف نمونه به خوبی توسط دوربین قابل‌رؤیت باشند.

۵.۲. روند انجام آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، مجموعاً ۶ آزمایش زهکشی شده بر روی نمونه‌های اشباع صورت گرفته است، که ۳ نمونه با چگالی نسبی ۰.۸۵٪ و وزن مخصوص خشک ۱/۶۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب و ۳ نمونه با چگالی نسبی ۰.۵٪ و وزن مخصوص خشک ۱/۵۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب آماده و همگی در ۵ لایه با ضربات چکش متراکم شدند. حجم لایه‌ها با ترسیم خطوط تقسیم‌کننده‌ی غشاء به ۵ قسمت مساوی کنترل شد، به نحوی که تراکم هر لایه تا تطبیق سطح کوبیده شده با مرز لایه ادامه یافته است. وزن ماسه‌ی خشک با توجه به چگالی نسبی هدف محاسبه و تعیین شده است. برای اشباع نمونه، پس از نیم ساعت عبور CO₂ از نمونه، به مدت نیم ساعت نیز آب هوازدایی شده از نمونه عبور داده شد. سپس فشار ۱۰۰ کیلوپاسکالی از دو طرف به نمونه اعمال شد تا ضریب فشار آب حفره‌ی اسکیمتون برابر با ۰.۹۵/۱۰۰ درصد و یا بیشتر شود. نمونه‌های مذکور پس از ساخت و اشباع شدن، با فشار محدودکننده‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال تحکیم یافتند و سپس تحت بار فشاری محوری با نرخ کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. برای جلوگیری از تغییر شکل‌های ناهمگن و غیرمتقارن، در دو سوی نمونه از آلان‌های ضد اصطکاک استفاده شده است. بدین منظور در هر انتهای نمونه از دو غشاء سوراخ‌دار با سطح مقطع برابر با نمونه که بین آنها به گریس آغشته بود، استفاده شده است. ارتفاع و قطر اسمی نمونه‌ی ساخته شده ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر بوده است. قطر دقیق نمونه با استفاده از کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر در ۲۰ رقوم ارتفاعی متفاوت در دو جهت و ارتفاع نمونه با استفاده از خط‌کش در ۵ قسمت مختلف اندازه‌گیری شده است. برای مشخص شدن قسمت فوقانی و انتهایی نمونه در عکس‌های گرفته شده توسط دوربین، همانند شکل ۳، از چسب‌های نواری مشکی رنگ استفاده شده است، که باید به صورت دقیق بین حد فاصل سنگ متخلخل و نمونه قرار گیرند.

۳. پردازش تصاویر

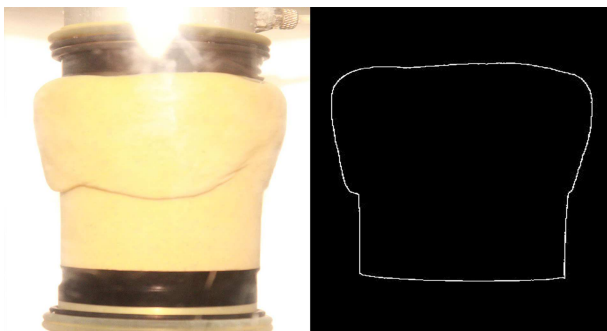
پس از عکس‌برداری از آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزارهای فتوشاپ^{۱۸} و متلب^{۱۹}، مراحل ویرایش و تحلیل تصاویر صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، با استفاده از الگوریتم لبه‌یابی سعی شده است تا تغییرات قطری نمونه در طول بارگذاری برآورد شود. این تغییرات برای برآورد صحیح از منحنی تغییرات تنش - کرنش نمونه در طول بارگذاری ضروری‌اند. در ادامه، به معرفی نرم‌افزارهای استفاده‌شده و روند تحلیلی نوشتار حاضر اشاره شده است.

۱.۳. نرم‌افزارهای متلب و فتوشاپ

پردازش تصاویر با استفاده از امکانات پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. تبدیل تصاویر به نوع مقیاس خاکستری، اولین مرحله‌ی پردازش تصویر است. کد تهیه شده در نرم‌افزار متلب، تصویر خاکستری را به‌عنوان یک ماتریس دو‌بعدی ذخیره می‌کند، جایی که هر عنصر ماتریس مربوط به یک پیکسل تصویر است. عناصر موجود در ماتریس، سطوح مختلف خاکستری را نشان می‌دهند. کمینه و بیشینه‌ی سطوح روشنایی در تصاویر ۰ و ۲۵۵ است که به ترتیب سیاه و سفید را نشان می‌دهند. با استفاده از کدنویسی، تصاویر خاکستری به تصاویر باینری^{۲۰} تبدیل شدند. سپس برای افزایش دقت در انجام محاسبات، دستوری برای حذف اغتشاش‌ها در تصاویر در نظر گرفته شده است. پس از تبدیل تصویر رنگی به تصویر باینری، برای تشکیل لبه‌های اطراف نمونه، سطحی از روشنایی در تصویر تعریف و در ادامه، لبه‌ی اطراف نمونه تشخیص داده شد. در کنار نرم‌افزار متلب از نرم‌افزار فتوشاپ نیز برای ویرایش عکس‌ها و تشخیص ناحیه‌ی متمایز در تصاویر استفاده شده است. نمونه‌یی از آلان لبه‌یابی شده با استفاده از تصاویر برداشتی در انتهای آزمایش در شکل ۴ ارائه شده است.

۲.۳. کالیبراسیون

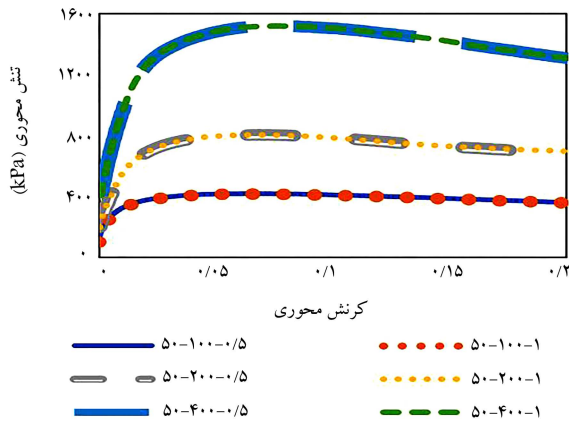
برای تبدیل واحد پیکسل به میلی‌متر، در پژوهش حاضر از یک روش ترکیبی استفاده شده است. تغییرات ارتفاع در زمان آماده‌سازی نمونه، شامل مراحل: اشباع‌سازی، تحکیم، و بارگذاری محوری توسط جابه‌جایی‌سنج‌های مکانیکی اندازه‌گیری و توسط داده‌بردار ثبت شده است. به همین دلیل برای افزایش دقت در محاسبات، تغییرات ارتفاع از ثبات دقیق مکانیکی قرانت و از پردازش تصویر فقط برای رصد تغییرات قطر استفاده شده است. این رویکرد ترکیبی در ادامه باعث کاهش خطاها شده است. زیرا از میان متغیرهای موردنیاز در تخمین حجم، یعنی ارتفاع و قطر، خطاهای پردازش تصویر فقط در محاسبه‌ی قطر وارد محاسبات شده و برآورد ارتفاع با دقت بسیار بالاتری صورت گرفته است. این رویکرد، از جوه تمایز چارچوب پیشنهادی نوشتار حاضر با سایر رویکردهای پردازش تصویر دو‌بعدی است که منجر به کاهش خطای برآورد حجم در حد رویکردهای سه‌بعدی شده است. همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، قطر نمونه‌ی موردنظر بعد از آماده‌سازی، توسط کولیس در ۱۵ الی ۲۰ رقوم ارتفاعی مختلف اندازه‌گیری شده است. از میان قطرهای اندازه‌گیری شده، یک قطر میانگین برای شرایط اولیه‌ی نمونه در نظر گرفته شد. بلافاصله بعد از مشخص شدن قطر میانگین نمونه، دوربین و تجهیزات مرتبط در فاصله‌ی معین از دستگاه سه‌محوری و نمونه مستقر شدند. سپس از نمونه تحت شرایط اولیه عکس‌برداری و براساس الگوریتم لبه‌یابی پیشنهادی، لبه‌های اطراف نمونه توسط نرم‌افزار متلب مشخص شدند. بعد از تشخیص لبه‌های اطراف



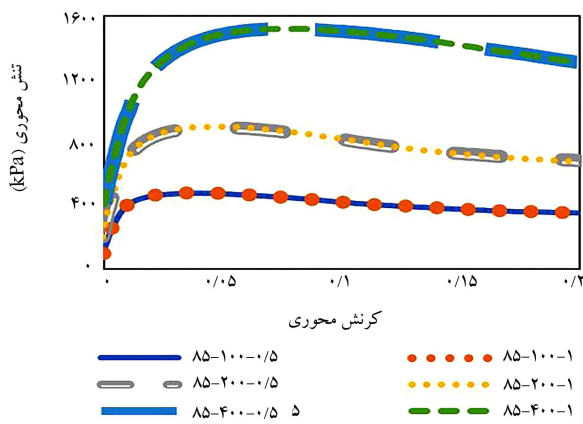
شکل ۴. تشخیص لبه‌ی اطراف نمونه با استفاده از نرم‌افزار متلب.



شکل ۳. نوار چسب‌های مشکی رنگ در بالا و پایین نمونه.



شکل ۵. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع با چگالی نسبی ۵۰٪ در فشارهای تحکیمی ۴۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۶. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع با چگالی نسبی ۸۵٪ در فشارهای تحکیمی ۴۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال.

نسبی ۵۰ و ۸۵ درصد مشاهده می‌شوند. تغییرات حجمی اخیر، هم توسط رویکرد پردازش تصویر و هم مستقیماً توسط بورت مدرج (رویکرد متداول) اندازه‌گیری شده‌اند. چنانچه در تمامی نمودارها و از طریق هر دو رویکرد مشاهده می‌شود، هر چند رفتار حجمی تمامی نمونه‌ها در کرنش‌های کوچک ابتدایی اتساعی بوده است، لیکن پس از آن، رفتار حجمی به سمت انقباض پیش رفته و تا کرنش محوری ۲۰٪ نیز بر همین منوال باقی مانده است. مشاهده‌ی منحنی‌های ذکر شده در کنار منحنی‌های تنش - کرنش در شکل‌های ۵ و ۶، گویای رفتار نمونه‌های با چگالی نسبی بالا در ادبیات فنی رایج است.^[۲۱]

در هر دو شکل ۷ و ۸، در فشار تحکیمی ۲۰۰ کیلو پاسکال، از کرنش محوری ۱۰٪ به بعد، بین دو رویکرد برآورد پردازش تصویری و اندازه‌گیری مستقیم، تفاوت بارزی رخ داده است. در چگالی نسبی ۵۰٪، نمونه از کرنش ۱۰٪ به بعد در رویکرد پردازش تصویر شروع به اتساع کرده است، حال آنکه روال اندازه‌گیری مستقیم بر روال کاهش حجم ادامه یافته است. در چگالی نسبی ۸۵٪ نیز تفاوت رفتارها از کرنش ۱۰٪ آغاز و روال کاهش حجم با مقادیری متفاوت در دو رویکرد دنبال شده است. منشأ این تفاوت رفتاری، تغییرشکل‌هایی است که در پردازش تصویر به صورت دوبعدی رصد می‌شوند، لیکن جهت محاسبه‌ی تغییرشکل‌های سه‌بعدی

نمونه، تعداد پیکسل‌های قرارگرفته بین دو لبه محاسبه شد و یک قطر پیکسلی میانگین به دست آمد. بدین ترتیب قطر میانگین نمونه قبل از اشباع و تحکیم توسط کولیس و همچنین به صورت پیکسلی توسط نرم‌افزار متلب اندازه‌گیری شده است. از نسبت قطر میانگین میلی‌متری به قطر میانگین پیکسلی، یک ضریب تبدیل واحد پیکسل به میلی‌متر به دست آمده است؛ که در طول بارگذاری، تغییرات قطر پیکسلی که توسط نرم‌افزار محاسبه شده است، با استفاده از ضریب مذکور به میلی‌متر تبدیل شده است.

۴. راستی آزمایی روش پیشنهادی با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها

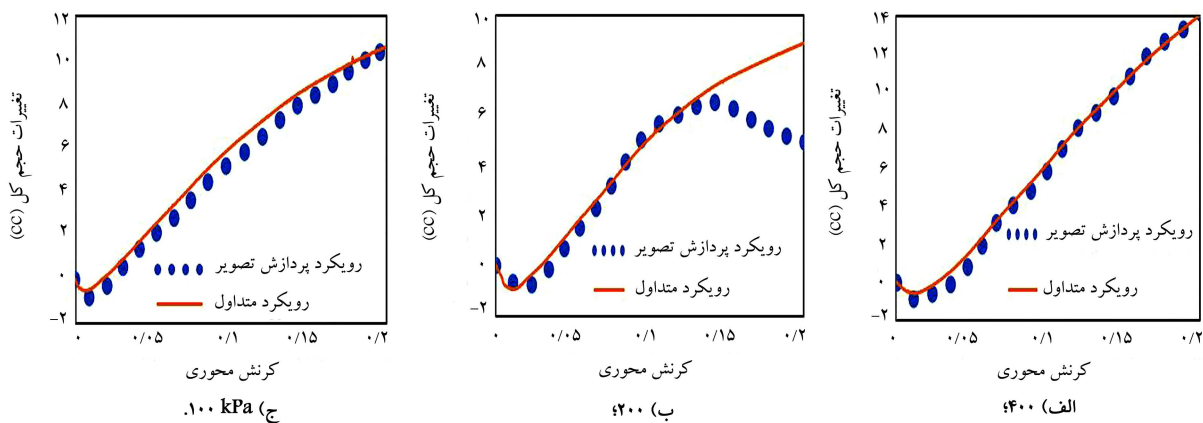
پس از انجام آزمایش‌های شرح داده شده در بخش ۲ نوشتار حاضر، میزان تغییر قطر نمونه در حین بارگذاری به دو روش به دست آمده است: (۱) از طریق اندازه‌گیری تغییر حجم با لوله‌ی مدرج و تغییر ارتفاع با جابه‌جایی سنج قائم و محاسبه‌ی تغییر قطر از تغییرات اخیر که در اینجا به آن رویکرد متداول اطلاق شده است؛ و (۲) به کمک پردازش تصویر. منحنی‌های تنش - کرنش با هر یک از دو رویکرد مذکور در ادامه مقایسه شده‌اند. همچنین تغییرات حجم حاصل از رویکرد پردازش تصویر با استفاده‌ی همزمان از تغییرات ارتفاعی اندازه‌گیری شده توسط جابه‌جایی سنج و تغییرات قطر از طریق پردازش تصویر محاسبه و با اندازه‌گیری مستقیم توسط بورت دستگاه سه محوری (رویکرد متداول) مقایسه شده است. در نهایت، مشتق منحنی تنش - کرنش که گویای تغییرات مدول تغییرشکل مماسی نمونه است، برای هر دو رویکرد متداول و پردازش تصویر ارائه شده است. همچنین پارامتر اخیر، در بیشتر مدل‌های رفتاری استفاده می‌شود.

۴.۱. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش حاصل از رویکرد پردازش تصویر با رویکرد متداول

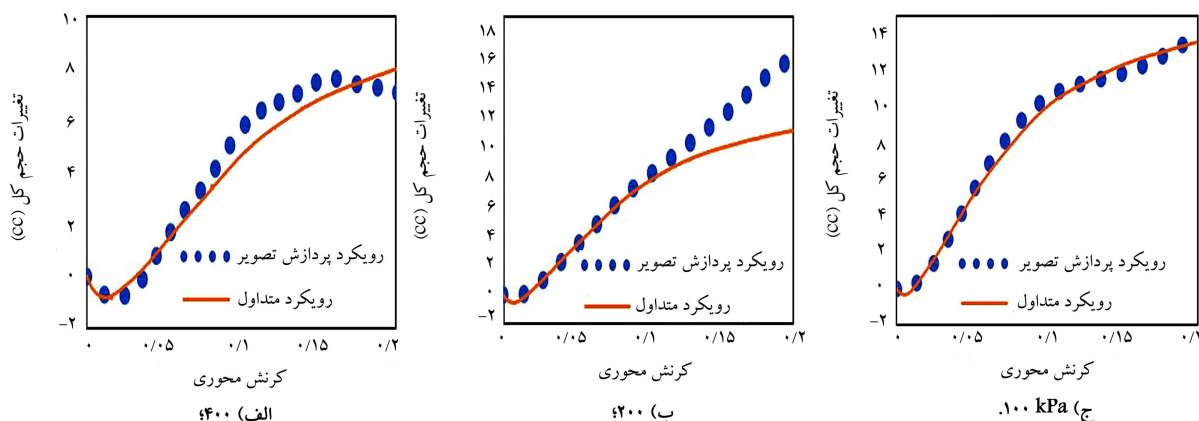
در شکل‌های ۵ و ۶، نمودارهای مربوط به مقایسه‌ی تغییرات منحنی تنش - کرنش با دو رویکرد پردازش تصویر و رویکرد متداول برای چگالی‌های نسبی به ترتیب ۵۰ و ۸۵ درصد مشاهده می‌شوند. چنانچه انتظار میرفت، با افزایش تنش تحکیمی، مقدار مقاومت برشی نمونه افزایش یافته است. همچنین از مقایسه‌ی دو شکل ۵ و ۶ مشخص است که در تنش تحکیمی یکسان نیز، مقاومت برشی بیشینه‌ی خاک با چگالی نسبی ۸۵٪، بیش از مقدار مشابه آن در خاک با چگالی نسبی ۵۰٪ است. در شکل‌های ۵ و ۶، هر نمودار با سه عدد مشخص شده است. عدد اول از سمت چپ، معرف چگالی نسبی، عدد دوم مربوط به فشار تحکیمی و عدد سوم نیز رویکرد متداول (۵/۰) یا رویکرد پردازش تصویر ۱ را نمایش می‌دهد. به عنوان مثال، نمودار ۵/۰ - ۱۰۰ - ۵۰ مربوط به آزمایش با چگالی نسبی ۵۰٪، فشار تحکیمی ۱۰۰ کیلو پاسکال و مربوط به نتایج رویکرد متداول است. مطابق شکل‌های ۵ و ۶، در هر دو چگالی نسبی ۵۰ و ۸۵ درصد، رویکرد پردازش تصویر با خطایی قابل قبول در محدوده‌ی ۴/۰ درصد نسبت به رویکرد متداول قرار گرفته است. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که رویکرد پردازش تصویر با دقت مناسب، امکان تفسیر خروجی آزمایش و به تبع آن، رسم منحنی تنش محوری - کرنش محوری در آزمایش سه محوری را فراهم ساخته است.

۴.۲. مقایسه‌ی تغییرات حجم برآورد شده از رویکرد پردازش تصویر با تغییرات حجم اندازه‌گیری شده (از رویکرد متداول)

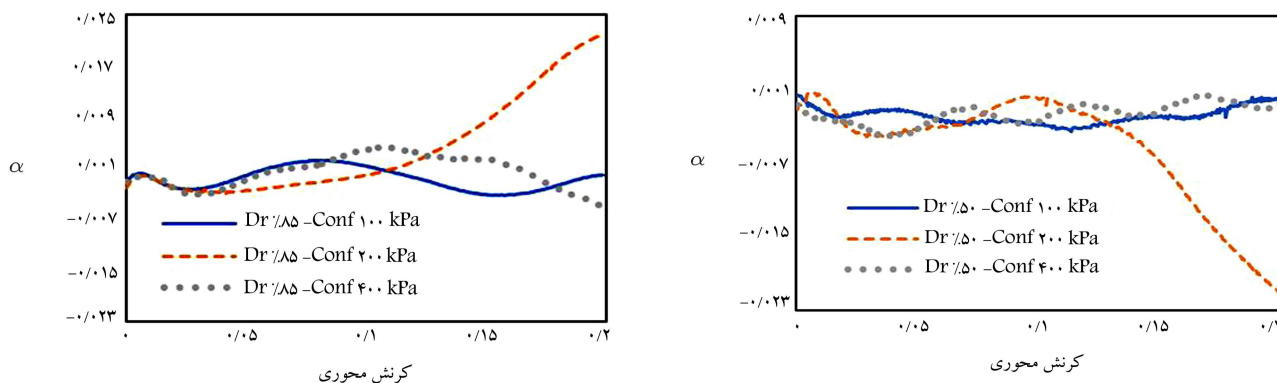
در شکل‌های ۷ و ۸، نمودارهای تغییرات حجم کل نمونه‌ی مورد آزمایش در چگالی‌های



شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی حجم کل آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع با چگالی نسبی ۵۰٪ در فشار تحکیمی.



شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی حجم کل آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع با چگالی نسبی ۸۵٪ در فشار تحکیمی.



شکل ۹. اختلاف تغییرات حجم کل رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول با چگالی نسبی ۵۰٪ در فشارهای تحکیمی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال.

شکل ۹. اختلاف تغییرات حجم کل رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول با چگالی نسبی ۵۰٪ در فشارهای تحکیمی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال.

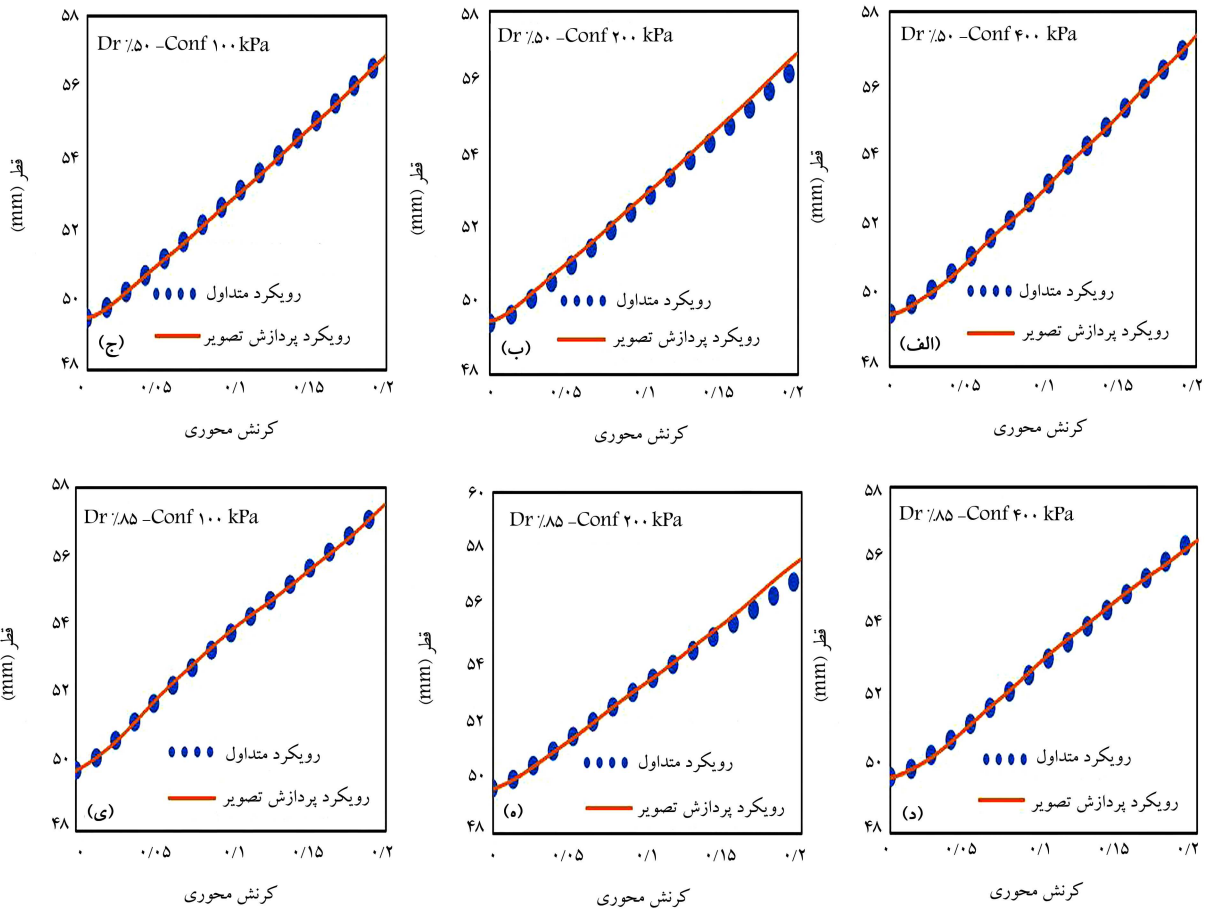
محاسبات مبتنی بر دو رویکرد متفاوت، پارامتر آلفا مطابق با رابطه‌ی ۱ تعریف شده است.

استفاده می‌شوند. در این میان تغییر قطر به دست آمده از حجم آب خروجی به بورت دستگاه، به دلیل اشباع بودن خاک، برآورد دقیق‌تری از تغییر حجم کل را به دست می‌دهد (شکل ۴). هر چند تفاوت محاسبه‌ی قطر مذکور در مقدار تنش محوری نیز تأثیرگذار است؛ لیکن این تفاوت، اثر چندانی در منحنی‌های تنش - کرنش نمایش داده شده در شکل‌های ۵ و ۶ نگذاشته است. لازم به ذکر است تفاوت مشاهده شده در دو رویکرد ذکر شده برای فشارهای محصورکننده‌ی ۱۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بسیار خفیف‌تر ظاهر شده است. جهت بررسی میزان خطای

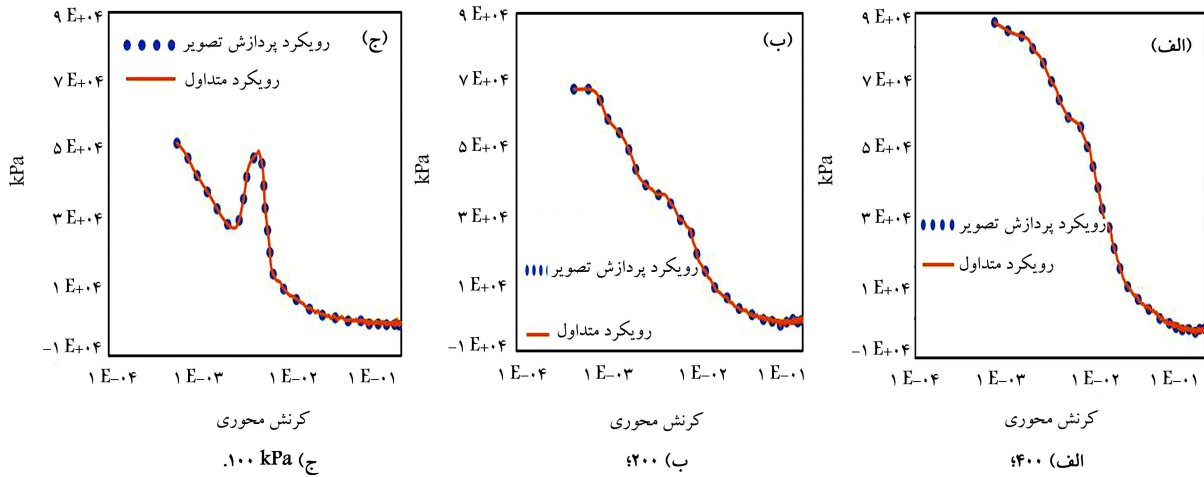
$$\alpha = (V_s - V_m) / (V_m) \quad (1)$$

که در آن، V_s حجم کل رویکرد پردازش تصویر، و V_m حجم کل رویکرد متداول هستند. در شکل‌های ۹ و ۱۰، تغییرات پارامتر آلفا با کرنش محوری برای فشارهای تحکیمی و چگالی‌های نسبی مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، تا کرنش ۱۰٪

استفاده می‌شوند. در این میان تغییر قطر به دست آمده از حجم آب خروجی به بورت دستگاه، به دلیل اشباع بودن خاک، برآورد دقیق‌تری از تغییر حجم کل را به دست می‌دهد (شکل ۴). هر چند تفاوت محاسبه‌ی قطر مذکور در مقدار تنش محوری نیز تأثیرگذار است؛ لیکن این تفاوت، اثر چندانی در منحنی‌های تنش - کرنش نمایش داده شده در شکل‌های ۵ و ۶ نگذاشته است. لازم به ذکر است تفاوت مشاهده شده در دو رویکرد ذکر شده برای فشارهای محصورکننده‌ی ۱۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بسیار خفیف‌تر ظاهر شده است. جهت بررسی میزان خطای



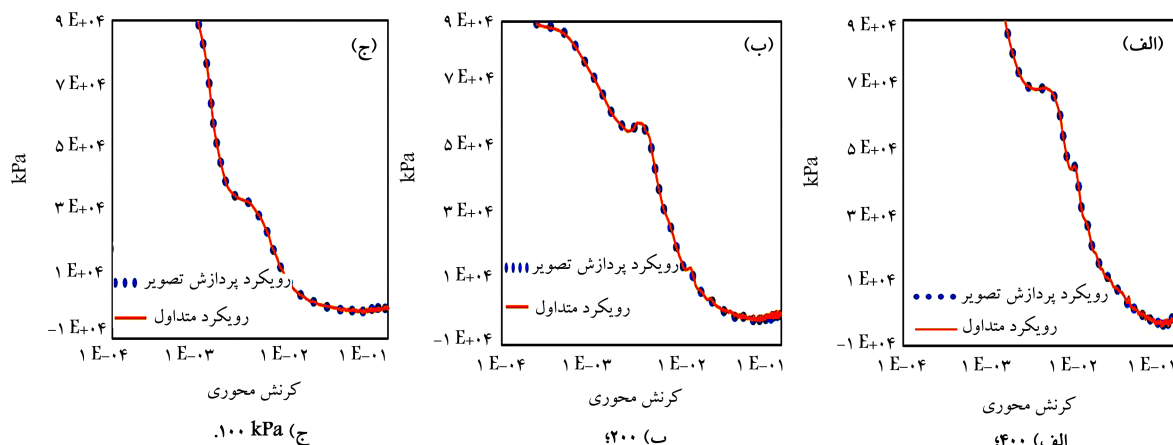
شکل ۱۱. مقایسه‌ی منحنی تغییرات قطر میانگین رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول.



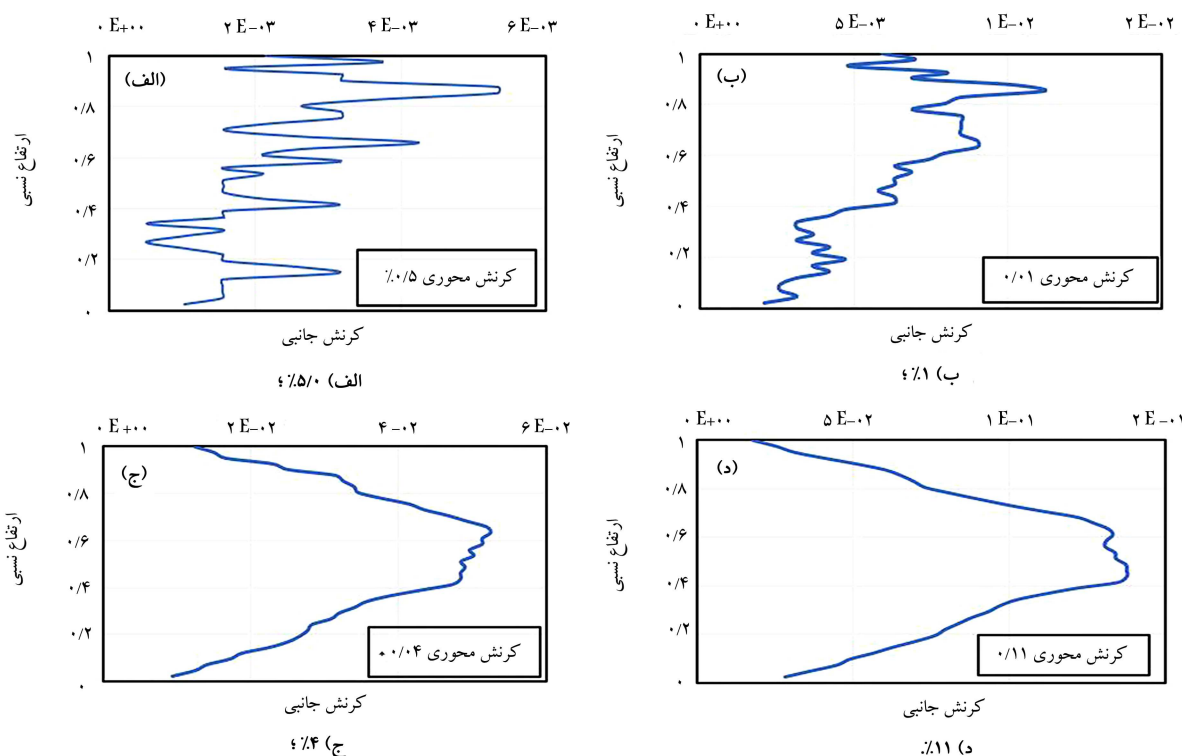
شکل ۱۲. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش آزمایش زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع با چگالی نسبی ۵۰٪ در فشارهای تحکیمی.

دیگر بوده است. لازم به ذکر است خطای ۲٪ تا ۳٪ درصد رویکرد پردازش تصویر دوبعدی نسبت به رویکرد متداول که در پژوهش حاضر به دست آمده است، در حد خطای رویکردهای پردازش تصویر سه‌بعدی است، که بیشتر در ادبیات فنی به آن اشاره شده است.^[۱۰] دستیابی به این سطح از دقت به عنوان یکی از دستاوردهای پژوهش حاضر محسوب می‌شود که متأثر از روش ترکیبی استفاده شده است.

در تمامی آزمایش‌ها، میزان خطای رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول، ۲٪ تا ۳٪ درصد بوده و در آزمایش‌های با فشار تحکیمی ۲۰ کیلوپاسکال، در کرنش‌های بالاتر از ۱۰٪، این میزان اختلاف به مقدار ۲٪ نیز افزایش پیدا کرده است؛ که دلیل آن، تشدید تغییرشکل‌های غیرمتقارن در کرنش‌های بالاست، که تقریب تصویربرداری دوبعدی را افزایش می‌دهد. در پژوهش حاضر، تغییرشکل‌های غیرمتقارن در نمونه‌های دارای فشار همه‌جانبه‌ی ۲۰ کیلوپاسکال بیشتر از حالت‌های



شکل ۱۳. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش آزمایش زهکشی شده بر روی نمونه‌ی اشباع با چگالی نسبی ۸۵٪ در فشارهای تحکیمی.



شکل ۱۴. تغییرات کرنش جانبی با ارتفاع نسبی نمونه‌ی سه‌محوری در کرنش محوری.

استفاده شده در تخمین قطر کمتر از خطای تخمین تغییرات حجم بوده است. دلیل این امر متوسط‌گیری در ارتفاع نمونه جهت تخمین قطر بوده است که موجب شده است خطاها کاهش یابند.

۴.۴. مقایسه‌ی مشتق منحنی تنش - کرنش حاصل از رویکرد

پردازش تصویر با رویکرد متداول

شیب تغییرات منحنی تنش - کرنش، که بیانگر تغییرات مدول ماسی ۲۱ نمونه‌ی آزمایشی با کرنش محوری است، برای چگالی‌های نسبی ۵۰ و ۸۵ درصد در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، در هر دو چگالی نسبی ۵۰ و ۸۵ درصد، در محاسبه‌ی مدول تغییرشکل نیز رویکرد پردازش تصویر دوبعدی

۳.۴. مقایسه‌ی تغییرات قطر میانگین در دو رویکرد متداول و

پردازش تصویر

در شکل ۱۱ (الف تا ی)، مقایسه‌ی تغییرات قطر اندازه‌گیری شده توسط رویکرد پردازش تصویر با رویکرد متداول برای فشارهای تحکیمی و چگالی‌های نسبی ۵۰ و ۸۵ درصد مشاهده می‌شود. در مجموع ۶ آزمایش زهکشی شده‌ی اشباع تا کرنش ۱۰٪، میزان خطای رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول در محدوده‌ی ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲ بوده است. از کرنش ۱۰ تا ۲۰ درصد در بیشتر آزمایش‌ها، خطای رویکرد پردازش تصویر نسبت به رویکرد متداول تا محدوده‌ی ۰/۰۰۵ نیز رسیده است. در تحکیم ۲۰۰ کیلوپاسکال، چنانچه در بررسی منحنی‌های تغییر حجم اشاره شد، از کرنش ۱۰ تا ۲۰ درصد، این میزان تغییرات به مقدار ۱ رویکرد

با خطایی قابل قبول نسبت به رویکرد متداول قابل انکاست. روند تغییرات مدول تغییرشکل با تغییر کرنش، مطابق با ادبیات فنی مرتبط است.^[۲۲]

۵.۴. امکان بررسی رفتار نمونه در مقیاس درون المانی

یکی از مزایای پردازش تصویر در آزمایش‌های سهمحوری مطالعه‌ی حاضر، امکان بررسی رفتار نمونه در مقیاس کوچک‌تر از مقیاس کلی نمونه است. در تفسیر نتایج آزمایش بر روی المانی از خاک، فرض بر یکنواختی توزیع تنش و کرنش در نمونه است؛ حال آنکه در واقع چنین نیست. در آزمایش‌های مطالعه‌ی حاضر نیز با وجود اینکه در هر دو سوی نمونه از المان ضداصلطکاک استفاده شده است تا نمونه در دو انتها، حتی‌الامکان با فک‌های دستگاه سهمحوری دچار اصطکاک و تحمل تنش برشی ناشی از آن نشود، باز هم از تصاویر پردازش‌شده پیداست که توزیع کرنش در نمونه به صورت ایده‌آل یکنواخت نشده است.

به عنوان نمونه، در شکل ۱۴، توزیع کرنش جانبی (در امتداد قطر نمونه‌ی سهمحوری و عمود بر محور طولی نمونه‌ی استوانه‌یی شکل) در ارتفاع نمونه، برای ۴ سطح کرنش محوری در حین آزمایش زهکشی شده‌ی اشباع با چگالی نسبی ۰/۸۵ و فشار تحکیمی ۱۰۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود. کرنش‌های جانبی اخیر براساس تغییر قطر به قطر اولیه در همان تراز محاسبه شده‌اند. مطابق شکل ۱۴، در کرنش‌های ابتدایی تا حدودی توزیع کرنش در سرتاسر نمونه یکنواخت است، لیکن از کرنش محوری ۱٪ به بعد، وضوح در دو انتهای نمونه و تفاوت رفتار با قسمت میانی نمونه مشاهده می‌شود. گویی بخشی از نمونه، درگیر فک‌های دو انتهای دستگاه است و قسمتی از طول میانی نمونه، آزادانه‌تر تغییرشکل می‌دهد؛ به نحوی که در کرنش‌های محوری ۴ و ۱۱ درصد، نسبت کرنش جانبی در میانه‌ی ارتفاع نمونه به ترتیب ۵ و ۷ برابر کرنش جانبی در دو انتهای نمونه است. اینکه چه بخشی از رفتار ذکر شده به واسطه‌ی گیرداری دو انتها و چه بخشی به دلیل تغییرشکل‌های نسبتاً زیاد نمونه است، خود محل تأمل است؛ لیکن در هر حال تشخیص طول مؤثر نمونه می‌تواند به تفسیر متفاوتی از نتایج منجر شود.^[۲۲،۲۳] لازم به ذکر است که نوشتار حاضر در پی تفسیر رفتار نیست و تفسیر مذکور خود مطالعه‌ی جداگانه‌یی می‌طلبد؛ هدف از بخش کنونی از نوشتار حاضر، معرفی امکانی است که به واسطه‌ی رویکرد پردازش تصویر پیشنهادی در رصد کرنش‌های موضعی نمونه به دست می‌آید.

۵. نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی حاضر بر آن بوده است که در آزمایش سهمحوری، با استفاده از روش لبه‌یابی در پردازش تصویر، برآورد دقیقی از میزان تغییرات حجم و قطر نمونه ارائه دهد. بدین منظور با ارائه‌ی یک روش بر مبنای پردازش تصویر دو بُعدی، بستری

ساده و دقیق جهت برآورد منحنی تنش - کرنش نمونه‌های خاک تحت شرایط بکر به دست آورده است.

- روش ارائه شده در پژوهش حاضر، که بر مبنای پردازش تصاویر دو بُعدی بوده است، با آزمایش‌های اشباع راستی‌آزمایی شده است.
- در غالب موارد، میزان خطا در تعیین تغییرات حجم و قطر نمونه و نیز تخمین منحنی تنش - کرنش قابل قبول بوده است.
- خطای محاسبه شده در اندازه‌گیری منحنی تنش - کرنش نمونه بین رویکرد پردازش تصویر و رویکرد متداول تا کرنش ۰/۱٪، در بیشتر آزمایش‌های مطالعه‌ی حاضر، حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ بوده است. از کرنش ۰/۱ تا ۰/۲، خطا در برخی از آزمایش‌ها افزایش پیدا کرده و تا بیشینه‌ی ۰/۱ نیز رسیده است.
- در کل، خطای اندازه‌گیری شده با استفاده از روش دو بُعدی ارائه شده در پژوهش حاضر در محدوده‌ی خطاهای اندازه‌گیری شده با استفاده از روش‌های پردازش تصویر سه بُعدی بوده است که این یافته از دستاوردهای اصلی پژوهش حاضر است.
- تمایز مهم دیگر روش پیشنهادی با رویکردهای پیشین در پردازش تصویر، سهولت و اسنجی آن با اندازه‌گیری ابعاد نمونه پیش از آغاز آزمایش است. بدین ترتیب مراحل پیچیده‌ی تهیه و تعبیه‌ی صفحات و اسنجی از فرایند آزمایش حذف شده است.
- ایجاد توانمندی بررسی رفتار دقیق‌تر نمونه در مقیاس درون المانی از دیگر دستاوردهای پژوهش حاضر بوده است.
- دستاورد بعدی استفاده از ارتفاع ثبت شده توسط LVDT دستگاه، در مراحل بارگذاری، به جای محاسبه‌ی آن از پردازش تصویر است. این امر موجب می‌شود خطاهای محاسباتی پردازش تصویر فقط به محاسبه‌ی قطر منحصر شود و ارتفاع با خطای کمتری برآورد شود.
- در محاسبه‌ی حجم اولیه، به جای محاسبه از پردازش تصویر، مقدار به دست آمده از اندازه‌گیری با ابزارهای دقیق، قبل از آزمایش مبنای قرار گرفته است، که این امر نقطه‌ی شروع نمودارها را بر هم منطبق کرده است.
- در فرایند و اسنجی از اندازه‌گیری‌های قبل از آزمایش که با روابط آیین‌نامه‌ی ASTM-D۷۱۸۱، تصحیحات مربوط به فرایندهای اشباع و تحکیم روی آن‌ها انجام شده است، استفاده شده است و باعث شده است رویکرد ضرایب و اسنجی که مربوط به تعیین مقیاس هر پیکسل بر حسب میلی‌متر است، با دقت مناسبی به دست آید، بدون اینکه نیازی به فرایندهای پیچیده‌ی و اسنجی باشد.
- دستاوردهای مطالعه‌ی حاضر، که به آن‌ها اشاره شده است، ورود رویکرد پردازش تصویر به آزمایشگاه‌های مهندسی ژئوتکنیک در پروژه‌های صنعتی را تسهیل می‌سازد.

پانویس‌ها

1. Lenoir

2. Otani
3. Higo
4. Karami

5. Cheng
6. Zhang
7. Rechenmacher
8. Wang
9. Li
10. Fayek
11. Macary
12. Bagherieh
13. Koseki
14. Sachan
15. Dong
16. LVDT
17. universal serial bus
18. Photoshop
19. Matlab
20. Binary
21. tangent modulus

منابع (References)

1. Maleki, M., Bayat, M. and Mirzaie, A. "Effect of matric suction on the mechanical behavior of sandy soil mixed with silt and clay at low confinement pressures", *Modares Civil Engineering Journal*, **12**(3), pp. 77-89 (In Persian) (2011).
2. Fredlund, D.G. "Unsaturated soil mechanics in engineering practice", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(3), pp. 286-321 (2006).
3. Johari, A., Javadi, A.A. and Habibagahi, G. "Modelling the mechanical behaviour of unsaturated soils using a genetic algorithm-based neural network", *Computers and Geotechnics*, **38**(1), pp. 2-13 (2011).
4. Javadi, A.A., Ahangar-Asr, A., Johari, A. and et al. "Modelling stress-strain and volume change behaviour of unsaturated soils using an evolutionary based data mining technique, an incremental approach", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **25**(5), pp. 926-933 (2012).
5. Lenoir, N., Bornert, M., Desrues, J. "Volumetric digital image correlation applied to X-ray microtomography images from triaxial compression tests on argillaceous rock", *Strain*, **43**(3), pp. 193-205 (2007).
6. Otani, J., Mukunoki, T. and Sugawara, K. "Evaluation of particle crushing in soils using X-ray CT data", *Soils and Foundations*, **45**(1), pp. 99-108 (2005).
7. Yosuke, H., Oka, F., Sato, T., Matsushima, Y. and et al. "Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression using micro-focus X-ray CT with digital image correlation", *Soils and Foundations*, **53**(2), pp. 181-198 (2013).
8. Alikarami, R. and et al. "Strain localisation and grain breakage in sand under shearing at high mean stress: Insights from in situ X-ray tomography", *Acta Geotechnica*, **10**(1), pp. 15-30 (2015).
9. Cheng, Zh. and et al. "A miniature triaxial apparatus for investigating the micromechanics of granular soils with in situ X-ray micro-tomography scanning", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **14**(2), pp. 357-373 (2020).
10. Zhang, X., Li, L., Chen, G. and et al. "Photogrammetry-based method to measure volume changes of Unsaturated soil specimens during triaxial testing", *Acta Geotechnica*, **10**(1), pp. 55-82 (2015).
11. Rechenmacher, A.L. "Grain-scale processes governing shear band initiation and evolution in sands", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **54**(1), pp. 22-45 (2006).
12. Wang, P., Guo, X., Sang, Y. and et al. "Measurement of local and volumetric deformation in geotechnical triaxial testing using 3D-digital image correlation and a subpixel edge detection algorithm", *Acta Geotechnica*, **15**, pp. 2891-2904 (2020).
13. Li, L., Li, P., Cai, Y. and et al. "Visualization of non-uniform soil deformation during triaxial testing", *Acta Geotechnica*, **16**(11), pp. 3439-3454 (2021).
14. Fayek, S., Xia, X., Li, L. and et al. "Photogrammetry-based method to determine the absolute volume of soil specimen during triaxial testing", *Transportation Research Record*, **2674**(8), pp. 206-218 (2020).
15. Macari, E.J., Parker, J.K. and Costes, N.C. "Measurement of volume changes in triaxial tests using digital imaging techniques", *Geotech Test J*, **20**(1), pp. 103-109 (1997).
16. Bagherieh, A.R., Habibagahi, G. and Ghahramani, A. "A Novel approach to measure the volume change of triaxial soil samples based on image processing", *Journal of Applied Sciences*, **8**(13), pp. 2387-2395 (2008,a).
17. Koseki, J., Hoshino, R., Miyashita, Y. and et al. "Direct and indirect observations of local deformation properties of saturated sand specimens in undrained cyclic triaxial tests", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, **4**(3), pp.36-39 (2016).
18. Sachan, A. and Penumadu, D. "Strain localization in solid cylindrical clay specimens using digital image analysis (DIA) technique", *Soils and Foundations*, **47**(1), pp. 67-78 (2007).
19. Dong, J. and Shao, L. "Experimental study on deformation properties of unsaturated compacted soil based on digital image measurement", *Engineering Review*, **34**(3), pp. 217-222 (2014).
20. ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, "Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils", ASTM International (2015).
21. Briaud, J.L. "Geotechnical engineering: Unsaturated and saturated soils", John Wiley & Sons (2013).
22. Kramer, S.L. "Geotechnical earthquake engineering", Pearson Education India (1996).
23. Wang, P., Guo, X., Sang, Y. and et al. "Measurement of local and volumetric deformation in geotechnical triaxial testing using 3D-digital image correlation and a subpixel edge detection algorithm", *Acta Geotechnica*, **15**(10), pp. 2891-2904 (2020).
24. Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S. and et al. "Study of strain localization and microstructural changes in partially saturated sand during triaxial tests using microfocus X-ray CT", *Soils and Foundations*, **51**(1), pp. 95-111 (2011).

مراحل گام به گام انجام مقدمات تصویربرداری، فرایند پردازش تصویر و تهیه‌ی منحنی تنش - کرنش:

۱. آماده‌سازی نمونه‌ی موردنظر و الصاق نوار چسب مشک‌رنگ در قسمت‌های فوقانی و تحتانی نمونه، حد فاصل سنگ متخلخل و نمونه‌ی خاکی، برای تشخیص بهتر نمونه در پردازش تصویر.
۲. نورپردازی نمونه که می‌تواند توسط یک چراغ مطالعه در مقابل دستگاه سه‌محوری انجام پذیرد.
۳. قرارگیری دوربین بر روی سه پایه و تنظیم فاصله‌ی آن تا نمونه‌ی موردنظر به منظور رؤیت پذیر کردن مناسب لبه‌های اطراف نمونه در تصاویر.
۴. نصب یک زمان‌سنج دیجیتال بر روی دوربین و تنظیم زمان عکس‌برداری در فواصل زمانی ۱۵ ثانیه، در طول بارگذاری صورت خودکار.
۵. ویرایش عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ از لحاظ شدت روشنایی جهت افزایش وضوح لبه‌های اطراف نمونه در پایان هر آزمایش.
۶. تشخیص نمونه‌ی حد واسط دو چسب مشک‌رنگ با استفاده از جعبه‌ی ابزار پیشرفته‌ی فتوشاپ و رنگ‌آمیزی آن به رنگ آبی.
۷. انتقال عکس‌های رنگ‌آمیزی شده به نرم‌افزار متلب و استخراج بخش آبی‌رنگ و لبه‌یابی آن از طریق کد نویسی و استفاده از روش لبه‌یابی cany.
۸. حذف نویزهای داخل عکس با استفاده از دستور medfilt. نویزهای مذکور

شامل حباب‌های آب یا خط و خش‌های ایجاد شده بر روی محفظه‌ی شیشه‌یی می‌شوند.

۹. تعیین یک آستانه‌ی شدت روشنایی و تبدیل عکس خاکستری به یک عکس باینری (لبه‌های اطراف نمونه‌ی سفیدرنگ و بقیه‌ی قسمت‌ها به رنگ سیاه تبدیل شدند).
۱۰. در هر رقوم ارتفاعی نمونه، تعداد پیکسل‌های قرارگرفته بین دو پیکسل سفیدرنگ که لبه‌های اطراف نمونه هستند، محاسبه می‌شود و قطر پیکسلی در رقوم مرتبط را تشکیل می‌دهد. از میانگین‌گیری قطرهای محاسبه‌شده در ارتفاع، قطر پیکسلی میانگین به دست می‌آید.
۱۱. مقیاس و معیار تبدیل واحد پیکسل به میلی‌متر، عکس اول است. زیرا ابعاد نمونه پیش از بارگذاری مشخص است و به تبع آن، قطر میانگین نیز بر حسب میلی‌متر، در ابتدای آزمایش در دست خواهد بود. با برابر قراردادن قطر میانگین میلی‌متری با قطر پیکسلی به دست آمده از بند ۱۰، مقیاس پیکسل به میلی‌متر تعیین می‌شود.
۱۲. پس از مشخص شدن ضریب تبدیل پیکسل به میلی‌متر در عکس اول، قطرهای معادل عکس‌ها و گام بعدی محاسبه می‌شوند.
۱۳. ارتفاع نمونه در هر گام از حس‌گر آنالوگ دستگاه قرائت می‌شود.
۱۴. قطر معادل حاصل از بند ۱۲ در محاسبه‌ی تنش و تغییرات ارتفاع نمونه جهت محاسبه‌ی کرنش استفاده می‌شود. بدین ترتیب نمودار تنش - کرنش قابل استخراج است.