

تأثیر انعطاف‌پذیری خاک در طرح بهینه‌ی شبکه‌ی قطری با ویژه‌سازی الگوریتم شاهین‌ها

محسن شهروزی* (استادیار)

ندا خوانین‌زاده (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۷۴-۶۱

شبکه‌های قطری از جمله سیستم‌های مقاوم جانبی هستند، که در سال‌های اخیر به کارایی آنها در ساختمان‌های بلند بسیار توجه شده است. در پژوهش حاضر به بررسی اثر اندرکنش ایستای خاک از طریق اعمال فنرهای معادل پرداخته و از بهینه‌یابی ابعادی برای غربال‌گری شبکه‌ی قطری استفاده شده است. در این راستا، یکی از الگوریتم‌های نوین و مؤثر فراابتکاری به نام بهینه‌یابی شاهین‌های شکاری برای مسئله‌ی مذکور با لحاظ شماره‌ی مقاطع به عنوان متغیرهای طرح گسسته، ویژه‌سازی شده است. سپس طرح‌های بهینه‌ی شبکه‌ی قطری نمونه با تابع هدف کاهش وزن فولاد مصرفی تحت قیود تنش و تغییرمکان آیین‌نامه در برابر بارگذاری هم‌زمان ثقلی و باد در دو حالت تکیه‌گاه صلب و انعطاف‌پذیر به دست آمده‌اند. در نهایت، با بررسی مدل‌های حاصل طی تحلیل ظرفیتی، مقایسه‌ی شاخص‌های مختلف برای شبکه‌ی قطری ارائه شده است، که مرزها و ملزومات تأثیر انعطاف‌پذیری خاک را نه فقط از دیدگاه کاهش هزینه، بلکه طی برآورد شاخص‌های رفتاری مذکور نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی قطری، الگوریتم فراابتکاری، بهینه‌یابی ابعادی، اندرکنش خاک و سازه، بارگذاری باد.

shahruz@khu.ac.ir
khned92@gmail.com

۱. مقدمه

بهینه‌سازی کاربرد گسترده‌ی در مسائل دنیای واقعی دارد. کمیته‌سازی (یا بهینه‌سازی) یک تابع هدف تحت مجموعه‌ی از قیود، فقط یکی از کاربردهای آن است. یک کاربرد مهم دیگر، غربال‌گری طرح‌های مختلف در چارچوب مسئله‌ی بهینه‌یابی است. در هنگام بررسی رفتار سازه‌ها، اطلاق حکم کلی با اکتفا به چند مثال، که بدون شیوه‌ی خاصی طرح شده باشند، پسندیده و قابل قبول نیست. این امر لزوم غربال‌گری قبل از بررسی‌های بعدی را آشکار می‌سازد.

برآورد قیودی، مانند: تنش‌ها، تغییرمکان‌ها، گریز و سایر شاخص‌های پاسخ، نیازمند تحلیل سازه است؛ که در اغلب موارد واقعی با روش‌های عددی انجام می‌شود. به عبارت دیگر، قیود مذکور در تابع هدف جریمه شده به صورت تحلیلی به دست نمی‌آیند، تا قابل مشتق‌گیری باشند. پس برای بهینه‌یابی چنین مسائلی، کاربرد روش‌های مستقل از مشتق‌گیری اجتناب‌ناپذیر است.

طبیعت، فراابتکاری خوانده می‌شوند.^[۳] تاکنون روش‌های فراابتکاری متعددی ابداع و استفاده شده‌اند، که مشهورترین آنها عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک،^[۴] الگوریتم تکامل تفاضلی،^[۵] دسته‌ی ذرات بهینه‌یاب،^[۶] شیوه‌ی اتفاق مورچگان،^[۷] جستجوی هماهنگی،^[۸] و الگوریتم ذرات به هم کوفته.^[۹] برخی از جدیدترین روش‌های فراابتکاری نیز عبارت‌اند از: الگوریتم چندجهانی،^[۱۰] الگوریتم دسته‌ی عروس دریایی،^[۱۱] الگوریتم تبخیر آب،^[۱۲] الگوریتم انتقال حرارت،^[۱۳] الگوریتم ذرات مرتعش^[۱۴] از جمله الگوریتم‌ها، می‌توان دسته‌ی شاهین شکاری،^[۱۵] را نام برد، که در سال ۲۰۱۹، ابداع و در نوشتار حاضر برای طراحی بهینه‌ی ابعادی سازه‌ی شبکه‌ی قطری ویژه‌سازی شده است.

برآورد قیودی، مانند: تنش‌ها، تغییرمکان‌ها، گریز و سایر شاخص‌های پاسخ، نیازمند تحلیل سازه است؛ که در اغلب موارد واقعی با روش‌های عددی انجام می‌شود. به عبارت دیگر، قیود مذکور در تابع هدف جریمه شده به صورت تحلیلی به دست نمی‌آیند، تا قابل مشتق‌گیری باشند. پس برای بهینه‌یابی چنین مسائلی، کاربرد روش‌های مستقل از مشتق‌گیری اجتناب‌ناپذیر است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۲۹/۱۳۹۸، اصلاحیه ۵/۱/۱۳۹۹، پذیرش ۲۷/۵/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55188.2710

برای هر شاهین، تابع هزینه (OF) برآورد می‌شود رابطه‌ی ۴:

$$OF = \begin{bmatrix} of_1 \\ \vdots \\ of_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

سپس، بهترین موقعیت یافت شده در بردار g_{best} ذخیره و برای هر شاهین، بهترین موقعیت فردی آن به عنوان x_{best} تعیین می‌شود. این بردارها برای ایجاد موقعیت‌های جدید با توجه به منطق قوانین حرکتی طبق آستانه‌ی احتمال آگاهی طعمه و شیرجه‌ی شاهین کاربرد دارند.

گام ۴. ایجاد موقعیت‌های جدید و به روزرسانی موقعیت شاهین‌ها

رفتار شکاری شاهین در سه مرحله‌ی: (۱) جستجو و دنبال کردن طعمه، (۲) تنظیم شیرجه و (۳) اجرای شیرجه؛ به این شرح شبیه‌سازی شده است. برای مقایسه با ثابت‌های آستانه‌ی احتمال آگاهی و شیرجه (AP, DP)، دو عدد تصادفی (PAP, PDP) با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ برای هر شاهین تولید می‌شود. سپس اگر PAP از AP کمتر باشد، شاهین مطابق تجربه‌ی خود و تجربه‌ی دیگر شاهین‌ها، مرحله‌ی جستجوی طعمه را طبق رابطه‌ی ۵ انجام می‌دهد:

$$x_{iter} = x_{iter-1} + v_{iter-1} + r_{c_c}(x_{best,iter-1} - x_{iter-1}) + r_{s_c}(g_{best,iter-1} - x_{iter-1}) \quad (5)$$

که در آن، x_{iter-1} و v_{iter-1} به ترتیب موقعیت فعلی و سرعت شاهین هستند. در صورتی که PAP از AP بالاتر باشد، احتمال شیرجه با DP مقایسه می‌شود. اگر PDP از DP بالاتر بود، شاهین یک عضو جمعیت را به تصادف به عنوان طعمه‌ی منتخب (x_{chosen})، هدف قرار می‌دهد و مرحله‌ی تنظیم شیرجه را با رابطه‌ی ۶ اجرا می‌کند:

$$x_{iter} = x_{iter-1} + |x_{chosen} - x_{iter-1}| \exp(bt) \cos(2\pi t) \quad (6)$$

که در آن، ثابت b شکل ماریپیج لگاریتمی را نشان می‌دهد و t عددی تصادفی در محدوده‌ی $[-1, 1]$ است. اگر PAP از AP کمتر باشد، مرحله‌ی اجرای شیرجه فرا می‌رسد. در این حال شیرجه به شرطی با رابطه‌ی ۷ اجرا می‌شود، که از دید تابع هدف، موقعیت طعمه بهتر از موقعیت فعلی شاهین باشد و گزینه طبق رابطه‌ی ۸، شاهین از شیرجه منصرف می‌شود و به سوی موقعیت قبلی خود بر می‌گردد.

$$x_{iter} = x_{iter-1} + v_{iter-1} + f_c r(x_{chosen} - x_{iter-1}) \quad (7)$$

$$x_{iter} = x_{iter-1} + v_{iter-1} + C_c r(x_{best,iter-1} - x_{iter-1}) \quad (8)$$

موقعیت جدید حاصل از سه مرحله‌ی اخیر برای هر شاهین برای رعایت سرعت بیشینه و حدود متغیرها اصلاح و سپس تابع هدف آن برآورد می‌شود. متعاقباً مقادیر g_{best} و x_{best} به هنگام می‌شوند.

در مراحل توصیف شده طی گام ۴، پدیده‌ی طعمه‌ربایی بین شاهین‌ها ضمن انتخاب بردار شبیه‌سازی شده است.

گام ۵. کنترل هم‌گرایی

اگر شماره‌ی تکرار از مقدار پیش فرض ($iter_{max}$) کمتر باشد، روند مذکور با برگشت به گام ۴ تکرار می‌شود، وگرنه با خروج از حلقه، نتیجه‌ی بهینه‌یابی اعلام می‌شود.

منظور، ابتدا انواع ممکن طراحی مجاز، برای مثال شبکه‌ی قطری در دو حالت بی‌صلب و انعطاف‌پذیر، با استفاده از بهینه‌یابی غربال شدند. سپس طرح‌های بهینه‌ی حاصل با استفاده از تحلیل ظرفیتی بارافزون بررسی و رفتار آنها با شاخص‌های مختلف پاسخ بیان و مقایسه شده‌اند، تا اهمیت مدل‌سازی انعطاف‌پذیری خاک زیر پی در سازه‌های مورد مطالعه، چه از دید صرفه‌ی اقتصادی و چه از دید ایمنی، آشکار شود.

۲. معرفی الگوریتم بهینه‌یابی شاهین

الگوریتم بهینه‌یابی شاهین با به اختصار FOA^۱، یکی از جدیدترین الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت در رسته‌ی الگوریتم‌های فراابتکاری در رابطه با شبیه‌سازی رفتار پرندگان شکاری است.^[۱۵] شاهین‌ها زندگی انفرادی دارند و راهبرد شکار آنها بر اساس نیازشان و با پیروی از الگوهای پروازی است. طبق پژوهش‌ها، پرندگان شکاری از جمله شاهین برای رسیدن به طعمه‌ی خود، مسیرهای مشخص منحنی دارند،^[۱۹] که دو بخش دارد: اول، یک ماریپیج لگاریتمی است، که در طی آن شاهین سر خود را صاف نگه می‌دارد، در حالی که در طرفین به دنبال طعمه، با بیشترین حد بینایی است؛ دوم، یک مسیر مستقیم است، که در طی آن شاهین مستقیماً به سمت طعمه پرواز می‌کند و وقتی به اندازه‌ی کافی نزدیک باشد که طعمه را با دید دو چشمی مشاهده کند، به سمت آن شیرجه می‌زند.^[۲۰] بنابراین، حرکت شکاری شاهین‌ها به ۳ مرحله تقسیم می‌شود: (۱) جستجوی طعمه، (۲) ماریپیج لگاریتمی برای تنظیم شیرجه و (۳) انجام شیرجه. اگر شیرجه به گرفتن طعمه منجر نشود، شاهین با مانور پروازی بر اساس تجربیات خود از این حرکت باز می‌گردد. به علاوه، پدیده‌ی ربودن طعمه از پرنده‌ی دیگر در بین پرندگان شکاری متداول است. لذا در این گام‌ها، با شبیه‌سازی رفتار شکاری شاهین‌ها، الگوریتم بهینه‌یابی شاهین معرفی شده است:

گام ۱. مقداردهی اولیه‌ی پارامترهای کنترلی

فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی، شامل متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها اعمال می‌شود. سپس، پارامترهای کنترلی FOA از قبیل تعداد شاهین‌ها (NP)، نسبت سرعت بیشینه‌ی مجاز به حدود (α)، ضرایب شناختی (C_c)، اجتماعی (S_c)، پیروی (f_c) و آستانه‌ی احتمال آگاهی (AP) و احتمال شیرجه (DP) تنظیم می‌شوند.

گام ۲. تعیین موقعیت و سرعت اولیه‌ی شاهین‌ها

ماتریس جمعیت اولیه‌ی شاهین‌ها در فضای D بعدی به کمک مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده‌ی متغیرهای طرح ایجاد می‌شوند رابطه‌ی ۹:

$$x = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,D} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{NP,1} & \dots & x_{NP,D} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن، هر بردار سطری x موقعیت یک شاهین است. همچنین سرعت آنها به طور تصادفی بین محدودیت‌های و مقداردهی می‌شوند روابط ۲ و ۳:

$$v_{max} = \alpha \cdot ub \quad (2)$$

$$v_{min} = -v_{max} \quad (3)$$

که در آنها، ub بردار حد بالا برای متغیر طرح و شامل D بعد است.

گام ۳. ارزیابی بهترین جواب و پیدا کردن بهترین موقعیت‌های سراسری و فردی

جدول ۱. پارامترهای کنترلی الگوریتم‌های استفاده شده علاوه بر $NP = 70^\circ$ و $NI = 100^\circ$.

الگوریتم	پارامترهای کنترلی غیرمشترک
[۱۵],FOA	$f_c = c_c = s_c = 2/0^\circ, b = 1/0^\circ, \alpha = 0/1, DP = 0/8, AP = 0/1$
[۴],GA	$P_c = 0/8, P_m = 0/1$
[۶],PSO	$C_w = C_c = C_s = 2/0^\circ$
[۵],DE	$x = 0^\circ, y = 1, z = 0^\circ, F = 1, CR = 0/5$
[۲۲],JA	-
[۲۳],WOA	-

که در آنها، σ تنش اعضا، d جابه‌جایی گره‌ها، N_n تعداد گره‌ها و λ لاغری اعضاست. برای اجرای الگوریتم فراابتکاری دسته‌ی شاهین، تابع جریمه‌ی رابطه‌ی ۱۴ در نظر گرفته می‌شود، که در آن، k_p ضریب جریمه و w همان وزن خام (جریمه نشده) اسکلت سازه است.

$$\text{Minimize : } q(x) = w \left(1 + k_p \sum \max(g(x), 0) \right) \quad (14)$$

۴. ارزیابی کارایی الگوریتم با مثال‌های مسائل مهندسی

اعتبارسنجی الگوریتم شاهین‌ها در حل مسائل توابع آزمون مختلف در ادبیات فنی ارائه شده است. [۱۵] در بخش حاضر، کارایی الگوریتم شاهین شکاری با روش‌های شناخته شده‌ی فراابتکاری به کمک چند مسئله‌ی مهندسی مقید مقایسه شده است. بدین منظور از همان فرم تابع جریمه رابطه‌ی ۱۴ استفاده شده است، با این تفاوت که به جای وزن سازه، تابع هزینه‌ی هر مسئله قرار گرفته است.

روش‌های بررسی شده علاوه بر الگوریتم شاهین FOA عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک GA، [۴] دسته‌ی ذرات بهینه‌یاب PSO، [۶] تکامل تفاضلی DE، [۵] الگوریتم جایا JA، [۲۲] و الگوریتم بهینه‌یابی نهنگ WOA، [۲۳] برای مقایسه‌ی صحیح روش‌ها در هر مسئله، شروع هر یک از اجراهای مستقل الگوریتم‌ها، با ایجاد تصادفی جمعیت اولیه‌ی یکسانی انجام گرفته است. در همه‌ی روش‌ها به طور مشترک تعداد اعضا جمعیت $NP = 70^\circ$ و تعداد تکرار $NI = 100^\circ$ فرض شده‌اند. در جدول ۱، سایر پارامترهای کنترلی به کار رفته در هر الگوریتم ارائه شده است. تعاریف پارامترهای هر روش را در مرجع متناظر مذکور در جدول ۱، می‌توان یافت و در این‌جا به جهت اختصار از تکرار آنها خودداری شده است. پارامترهای کنترلی غیرمشترک الگوریتم شاهین، نیز که بی‌بُعد هستند، مشابه نوشتار واسکونسولو^۳ و همکاران (۲۰۱۹)، [۱۵] انتخاب شده‌اند.

۱.۴. طراحی ستون جدار نازک

مسئله‌ی حاضر توسط راتو^۴ (۲۰۰۹) معرفی [۲۴] و سپس در ادبیات فنی به عنوان یک مسئله‌ی مهندسی با دو متغیر طرح مطرح شده است. متغیرهای مذکور عبارت‌اند از: قطر متوسط و ضخامت لوله در مقطع ستون جدار نازک، که نیروی فشاری $P = 2500 \text{ kgf}$ را طبق شکل ۱ تحمل می‌کند. چگالی مصالح $\rho = 25 \text{ kgf/cm}^3$ طول لوله 2.5 m ، مدول کشسانی $E = 500 \text{ kgf/cm}^2$ و تنش تسلیم برابر 10^6 kgf/cm^2 است. هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی ساخت و مصالح ستون با لحاظ قیدهای تنش نرمال و کمناشی اولر طبق فرمول‌بندی ارائه شده در نوشتار راتو (۲۰۰۹)، [۲۴] در روابط ۱۵ الی ۱۸ است.

۳. طرح مسئله‌ی بهینه‌یابی و ویژه‌سازی الگوریتم

در مسئله‌ی بهینه‌یابی حاضر، هدف کمینه‌سازی وزن فولاد مصرفی ضمن ارضاء محدودیت‌های آیین‌نامه‌ی، تنش اعضا و جابه‌جایی گره‌ی است. علاوه بر تنش، محدودیت‌های رفتاری متعددی نیز وجود دارد، که باید طبق آیین‌نامه‌ی طراحی ارزیابی شوند، [۲۱] که این یک عملیات دست و پاگیر عددی است؛ به ویژه برای سازه‌های بزرگ، وقتی که هیچ روش تحلیلی نمی‌تواند مستقیماً اعمال شود. از طرفی دیگر، پروفیل‌های ساختاری موجود عملاً به یک فهرست گسسته‌ی خاص محدود می‌شوند، که عموماً باعث می‌شود بهینه‌سازی گسسته، پیچیده‌تر از حالت پیوسته شود.

از آن‌جا که مقاطع اعضاء سازه‌ی مورد نظر، هم سطح مقطع و هم مشخصات دیگر مورد نیاز طراحی، از قبیل: ممان اینرسی و شعاع ژیراسیون حول محورهای اصلی و فرعی را دارند، نمی‌توان همانند مسائل خرپا، متغیر طرح را سطح مقطع پیوسته در نظر گرفت. بدین منظور مسئله با متغیرهای گسسته، یعنی شماره‌ی مقطع اعضاء قاب، ویژه‌سازی و در محیط متلب^۲ برنامه‌نویسی شده است. مقادیر پیوسته‌ی که احیاناً طی اجرا پدید آیند، قبل از تحلیل سازه به متغیرهای صحیح گرد و رمرگشایی می‌شوند. بردار متغیرهای طرح برای سازه‌ی با m گروه عضوی طبق رابطه‌ی ۹ داده می‌شود:

$$x = \langle I_i \rangle, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

سپس حجم سازه از ضرب داخلی بردار طول اعضا L در سطح مقطع آنها A محاسبه و بهینه‌یابی وزن اسکلت با چگالی ρ تحت قیود به کمک رابطه‌ی ۱۰ فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } w(x) &= \rho L' \times A(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

تابع‌های $g_i(x)$ شامل محدودیت‌های تنش و جابه‌جایی مجاز به صورت روابط ۱۱ الی ۱۳ ارائه می‌شوند:

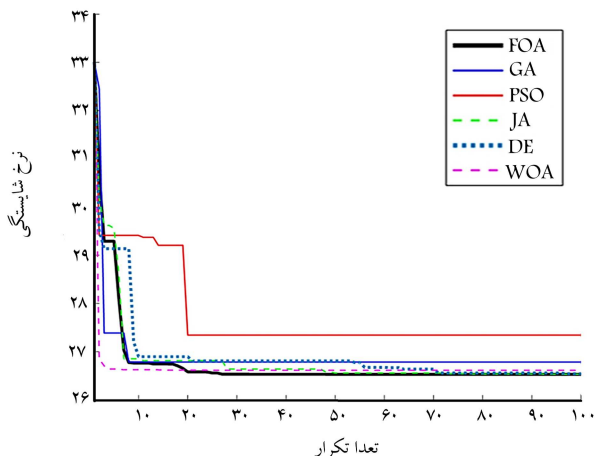
$$g_\sigma^k(x) = \frac{\sigma_k}{(\sigma_k)_{\text{allowable}}} - 1 \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad (11)$$

$$g_d^n(x) = \frac{d_n}{(d_n)_{\text{allowable}}} - 1 \leq 0 \quad n = 1, 2, \dots, N_n \quad (12)$$

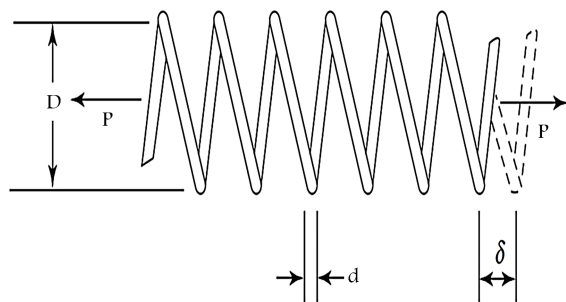
$$g_\lambda^k(x) = \frac{\lambda_k}{(\lambda_k)_{\text{allowable}}} - 1 \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad (13)$$

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج در طراحی ستون جدارنازک.

الگوریتم	انحراف معیار	میانگین	بهترین
FOA	۰/۰۰۰	۲۶/۵۳۱	۲۶/۵۳۱
GA	۰/۲۲۶	۲۷/۰۷۲	۲۶/۷۸۶
PSO	۰/۲۷۲	۲۶/۹۸۴	۲۶/۵۸۸
JA	۰/۰۰۲	۲۶/۵۳۴	۲۶/۵۳۱
DE	۰/۰۱۳	۲۶/۵۵۰	۲۶/۵۳۴
WOA	۰/۹۶۲	۲۷/۶۳۷	۲۶/۵۴۱



شکل ۳. مقایسه‌ی بهترین هم‌گرایی تابع هزینه در طرح ستون جدارنازک.



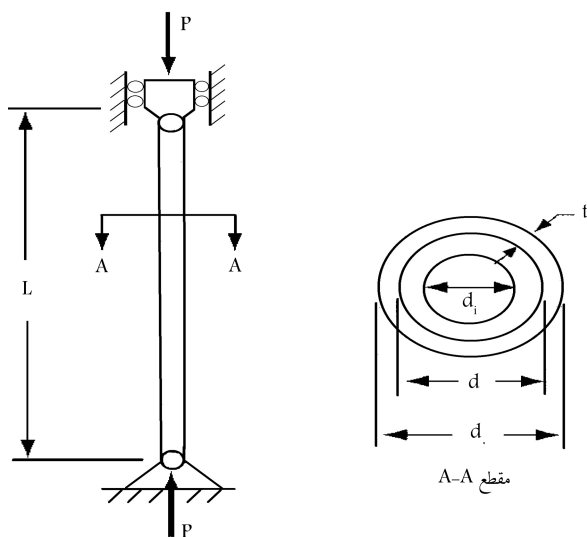
شکل ۴. فنر مارپیچ تحت بار محوری. [۲۵]

روش‌های دیگر از دام بهینه‌ی محلی عبور کرده و به کمترین تابع هزینه دست یافته است.

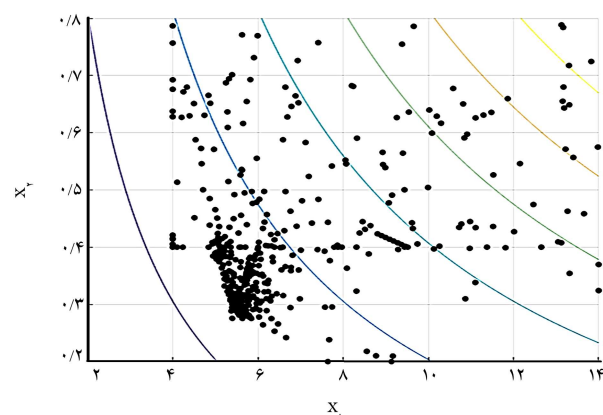
۲.۴. طراحی فنر مارپیچ

به عنوان یکی از متداول‌ترین مسائل کلاسیک، طراحی یک فنر مارپیچ بررسی شده است. شکل ۴، که هدف از آن دست‌یابی به کمترین حجم مصالح فنر در تعداد مشخصی از دورهای مفتول سازنده‌ی آن است؛ با این شرط که قیود مسئله، شامل: محدودیت‌های ابعادی، کمینه‌ی نرمی فنر یا تغییر طول آن تحت بار مفروض، بیشینه‌ی تنش برشی مصالح فنر و کمینه‌ی بسامد سرج^۵ در فنر ارضاء شوند.

متغیرهای طرح عبارت‌اند از: ضخامت $x_1 = d$ ، قطر متوسط $x_2 = D$ و تعداد مؤثر دورهای مفتول سازنده‌ی فنر یعنی x_3 . در هر انتهای فنر، یک دور مفتول (جمعاً دو دور) غیرمؤثر فرض می‌شود. تنش برشی در فنر بر حسب ضریب تمرکز تنش k طبق روابط ۱۹ و ۲۰ و بسامد ω طبق رابطه‌ی ۲۱ محاسبه می‌شوند، که در



شکل ۱. مشخصات ستون لوله‌یی تحت بار فشاری. [۲۴]



شکل ۲. تاریخچه‌ی هم‌گرایی الگوریتم شاهین در طراحی ستون جدارنازک.

$$\min f(X) = 5\pi x_1 x_2 + 2x_1 = 9.82x_1 x_2 + 2x_1 \quad (15)$$

$$s.t. \quad \frac{\sigma}{\sigma_Y} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_b} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

$$2 \leq x_1 \leq 14, 0.2 \leq x_2 \leq 0.7 \text{ cm} \quad (18)$$

انتخاب مسئله‌ی حاضر از آن جهت بوده است که حل دقیق آن طبق مرجع اخیر در محل تقاطع دو قید تنش تسلیم و کماتش بوده و منجر به تابع هدف $f^* = 26/531$ شده است.

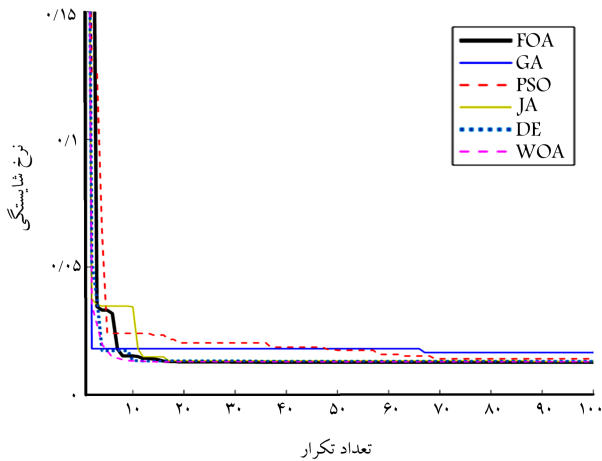
تاریخچه‌ی حرکت ۷۰ شاهین مجازی در مسئله‌ی دو متغیره‌ی کمونی در کنار خطوط تراز تابع هدف در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که مطابق آن الگوریتم شاهین توانسته است بیشتر نقاط جستجو را در حول نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری $x^* = (5/4, 0/3)$ متمرکز کند، تا نهایتاً به آن دست یابد. نتیجه‌ی اجرای روش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در میان روش‌های استفاده شده، فقط الگوریتم شاهین شکاری و نیز روش جایا توانسته‌اند به بهینه‌ی سراسری دست یابند، با این تفاوت که الگوریتم شاهین با انحراف معیار ناچیز $10^{-6} \times 1/8$ بر سایرین برتری داشته است. در شکل ۳، نیز نمودارهای هم‌گرایی مقایسه شده‌اند، که مؤید برتری الگوریتم شاهین است. مشاهده می‌شود که الگوریتم شاهین برخلاف برخی

جدول ۳. نتایج پژوهش حاضر در طراحی فنر مارپیچ.

الگوریتم	انحراف معیار	میانگین	بهترین
FOA	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۷۷۲۹	۰/۰۱۲۶۶۶
GA	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۴۴۸۵	۰/۰۱۲۸۱۶
PSO	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۲۸۲۷	۰/۰۱۲۸۲۷
JA	۰/۰۰۷۶	۰/۰۱۵۵۳۴	۰/۰۱۲۸۲۱
DE	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۳۳۴۲	۰/۰۱۲۷۲۸
WOA	۰/۰۰۱۰	۰/۰۱۳۴۷۰	۰/۰۱۲۷۳۰

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج روش‌ها در طراحی فنر مارپیچ.

الگوریتم	x_1	x_2	x_3	مقدار تابع هدف	تعداد فراخوانی تابع هدف
FOA	۰/۰۵۱۴۹۲	۰/۳۵۲۰۰۲	۱۱/۵۷۰۸۵	۰/۰۱۲۶۶۶	۷۰۰۰
[۲۶] ES	۰/۰۵۱۹۸۹	۰/۳۶۳۹۵۳	۱۰/۸۹۵۲۲	۰/۰۱۲۷۴۲	۳۰۰۰۰
[۲۷] CSA	۰/۰۵۱۶۸۹	۰/۳۵۶۷۱۶	۱۱/۲۸۹۰۱۱	۰/۰۱۲۶۶۵	۸۰۰۰۰
[۲۸] CopSo	۰/۰۵۱۷۲۸	۰/۳۵۷۶۴۴	۱۱/۲۴۴۵۴۳	۰/۰۱۲۶۷۵	۲۰۰۰۰



شکل ۵. مقایسه‌ی هم‌گرایی تابع هزینه‌ی جریمه شده در طرح فنر مارپیچ.

در جدول ۴، نتیجه‌ی الگوریتم شاهین در پژوهش حاضر با نتایج ادبیات فنی مقایسه شده است، که البته با نقاط شروع متفاوتی اجرا شده‌اند. در مثال کنونی، نتیجه‌ی الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها CSA در ازاا صرف چند برابر هزینه‌ی محاسباتی بیشتر نسبت به الگوریتم شاهین، فقط حدود ۱٪ بهتر از آن است. جدول ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم شاهین در میان روش‌های ادبیات فنی مذکور نیز جایگاه مناسبی داشته است.

۳.۴. طراحی مخزن تحت فشار

در مسئله‌ی کلاسیک حاضر، هدف عبارت از کاهش هزینه‌ی ساخت یک مخزن تحت فشار با متغیرهای طرح است (شکل ۶). متغیرهای مذکور به ترتیب، شامل: ضخامت جداره‌ی استوانه $x_1 = T_s$ ، ضخامت جداره‌ی درپوش‌ها $x_2 = T_h$ ، قطر داخلی R و طول بخش استوانه‌یی مخزن L هستند. تابع هزینه‌ی کل، شامل هزینه‌ی مصالح فلزی جداره‌ی مخزن و شکل دادن

آنها، بار محوری، مدول برشی G و چگالی مصالح ρ معرفی می‌شوند.

$$\tau = \frac{8kPD}{\pi d^3} \quad (19)$$

$$k = \frac{(4D - d)}{4(D - d)} + \frac{0.615d}{D} \quad (20)$$

$$\omega = \frac{d}{\sqrt{2}x_2 D^2} \sqrt{\frac{G}{2\rho}} \quad (21)$$

پس از ساده‌سازی روابط ادبیات فنی، [۲۵] فرمول‌بندی مسئله به صورت روابط ۲۲ الی ۲۷ ارائه شده است:

$$\min f(X) = (2 + x_2)x_2x_1^2 \quad (22)$$

$$s.t.: \quad g_1(x) = 1 - \left(\frac{x_1^2 x_2}{71.785 x_1^2} \right) \leq 0 \quad (23)$$

$$g_2(x) = 4x_1^2 - \frac{x_1 x_2}{12.066(x_1^2 x_2 - x_1^2)} + \left(\frac{1}{51.08 x_1^2} \right) - 1 \leq 0 \quad (24)$$

$$g_3(x) = 1 - \left(\frac{14.045 x_1}{x_1^2 x_2} \right) \leq 0 \quad (25)$$

$$g_4(x) = \frac{x_1 + x_2}{1.5} - 1 \leq 0 \quad (26)$$

$$0.05 \leq x_1 \leq 2.00, 0.25 \leq x_2 \leq 1.30, 2.00 \leq x_3 \leq 15.00 \quad (27)$$

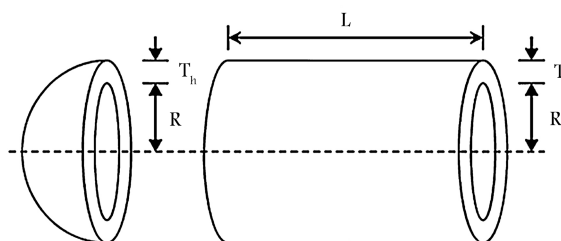
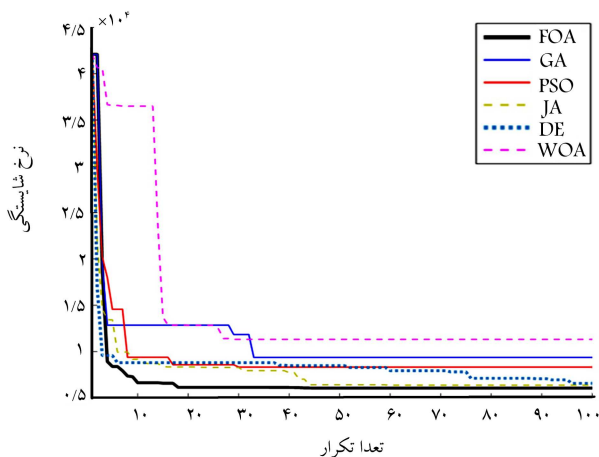
نتایج حاکی از آن است که الگوریتم شاهین طی ۱۰۰ تکرار، ضمن ارضاء قیود مسئله به کمترین مقدار تابع هزینه، یعنی ۰/۰۱۲۶۶۵۹۴، در میان سایر روش‌ها با اجرای هم‌زمان در پژوهش حاضر دست یافته است. به علاوه میانگین و انحراف معیار آن در مقایسه با سایر روش‌ها طبق جدول ۳ در رتبه‌ی قابل قبولی قرار دارد. طبق شکل ۵، در مثال کنونی نیز الگوریتم شاهین، هم‌گرایی بهتری نسبت به سایرین به نمایش گذاشته است.

جدول ۵. نتایج پژوهش حاضر در طرح مخزن تحت فشار (فرمول بندی اول).

الگوریتم	انحراف معیار	میانگین	بهترین
FOA	۳۸۹	۶۳۴۵/۹۹۳	۶۰۵۹/۷۱۸
GA	۵۳۶	۹۳۳۷/۷۴	۸۴۷۳/۰۱۲
PSO	۹۴۹	۷۷۸۹/۵۶۶	۶۴۴۹/۱۳۴
JA	۴۰۹	۶۶۴۲/۴۶۹	۶۲۶۹/۱۱۱
DE	۵۹۲	۷۳۲۸/۳۵۴	۶۵۷۸/۳۸۵
WOA	۲۵۷۵	۱۰۵۷۹/۹۰۶	۷۰۷۸/۶۴۷

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج روش‌ها در طرح مخزن تحت فشار (فرمول بندی اول).

الگوریتم	x_1	x_2	x_3	x_4	مقدار تابع هدف	تعداد فراخوانی تابع هدف
FOA	۰/۸۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۴۲/۰۹۸۴	۱۷۶/۶۳۶۹	۶۰۵۹/۷۱۸	۷۰۰۰
[۲۶] ES	۰/۸۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۴۲/۰۸۹۱	۱۷۶/۶۴۰۵	۶۰۵۹/۷۴۵	۲۵۰۰۰
[۲۸] CopSo	۰/۸۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۴۲/۰۹۱۲	۱۷۶/۷۴۶۵	۶۰۶۱/۰۷۷	۲۰۰۰۰۰
[۲۷] CSA	۰/۸۱۲۵	۰/۴۳۷۵	۴۲/۰۹۸۴	۱۷۶/۶۳۶۵	۶۰۵۹/۷۱۴	۲۵۰۰۰۰



شکل ۶. نمایش مخزن تحت فشار استوانه‌ای و یکی از دو درپوش آن. [۳۲]

و جوشکاری آن است. فرمول بندی مسئله به صورت ترکیبی گسسته - پیوسته با روابط ۲۸ الی ۳۳ بیان می‌شود، که طبق آن ضخامت‌ها باید مضارب‌ی گسسته از $۰/۰۶۲۵$ اینچ باشند. [۲۹]

$$\min f(X) = ۰/۶۲۲۴x_1x_2x_3 + ۱/۷۷۸۱x_1^2x_2 + ۳/۱۶۶۱x_1^2x_3 + ۱۹/۸۴x_2x_3^2 \quad (۲۸)$$

$$s.t. \quad g_1(x) = ۰/۰۱۹۳x_2 - x_1 \leq ۰ \quad (۲۹)$$

$$g_2(x) = ۰/۰۰۹۵۴x_2 - x_2 \leq ۰ \quad (۳۰)$$

$$g_3(x) = ۱۲۹۶۰۰۰ - \pi x_1^2x_2 - \frac{4}{3}\pi x_1^3 \leq ۰ \quad (۳۱)$$

$$g_4(x) = x_2 - ۲۴۰ \leq ۰ \quad (۳۲)$$

$$x_1, x_2 \in \{1, \dots, 99\} \times ۰/۰۶۲۵, ۱۰ \leq x_3 \leq ۲۰۰, ۱۰ \leq x_4 \leq ۲۰۰ \quad (۳۳)$$

شکل ۷. مقایسه‌ی هم‌گرایی روش‌ها در طرح مخزن تحت فشار (فرمول بندی اول).

شاهین را در حل مسئله‌ی حاضر نشان می‌دهد. برخی از پژوهشگران مسئله را تماماً با متغیرهای پیوسته حل کرده‌اند و لذا فرمول بندی دوم طی جایگزینی رابطه‌ی ۳۳ و ۳۴ به دست آمده است:

$$۰ \leq x_1, x_2 \leq ۱۰, ۱۰ \leq x_3 \leq ۲۰۰, ۱۰ \leq x_4 \leq ۲۰۰ \quad (۳۴)$$

مثال مخزن تحت فشار بار دیگر با فرمول بندی دوم حل شده است، که نتایج آن را در جدول‌های ۷ و ۸ می‌توان مشاهده کرد.

طبق جدول ۷، برتری الگوریتم شاهین بر سایر روش‌های استفاده شده در پژوهش حاضر نه فقط از دید بهترین، بلکه در میانگین نتایج هم مشهود است. الگوریتم شاهین در این حالت که تمام متغیرها پیوسته هستند، توانسته به مقدار بهینه‌ی $۵۸۸۵/۶۸۵$ دست یابد، که کمتر از حالت ترکیبی گسسته - پیوسته (فرمول بندی اول) است. الگوریتم کلونی ویروس درازاء کمتر از $۱/۱$ بهبود نتیجه با جمعیت اولیه‌ی متفاوت، بیش از ۵ برابر حجم محاسباتی صرف کرده است. ضمن بررسی دقیق‌تر با کاربرد جمعیت اولیه‌ی یکسان، برتری هم‌گرایی الگوریتم شاهین بر سایر روش‌های پژوهش حاضر در شکل ۸ آشکار می‌شود. در این حالت، اختلاف بیشتری در نمودارهای هم‌گرایی نسبت به فرمول بندی اول شکل ۷ مشاهده می‌شود.

در جدول ۵، نتایج حل مسئله در فرمول بندی ترکیبی گسسته - پیوسته ارائه شده است، که مطابق آن الگوریتم شاهین نسبت به سایر روش‌ها در اجرای پژوهش حاضر، از دیدگاه بهترین نتیجه، میانگین و انحراف معیار تابع هدف برتری دارد. شکل ۷، مؤید این برتری از دید نمودار هم‌گرایی روش‌هاست. طبق جدول ۶، در ادبیات فنی بهترین نتیجه‌ی این فرمول بندی مسئله برابر $۶۰۵۹/۷۱۴$ است، که کمتر از $۱/۱$ با نتیجه‌ی الگوریتم شاهین در پژوهش حاضر یعنی $۶۰۵۹/۷۱۴$ اختلاف دارد. از آن‌جا که نتیجه‌ی اخیر، طی فقط ۷۰۰۰ برآورد تابع هدف حاصل شده است، کارایی الگوریتم

جدول ۷. نتایج پژوهش حاضر در طرح مخزن تحت فشار (فرمول بندی دوم).

الگوریتم	انحراف معیار	میانگین	بهترین	تعداد فراخوانی تابع هدف
FOA	۷۱۶	۶۷۸۹/۶۸۲	۵۸۸۵/۶۸۵	۷۰۰۰
GA	۴۶۷	۹۶۲۲/۸۲۴	۸۹۴۷/۸۳۹	۷۰۰۰
PSO	۲۰۳۲	۸۸۵۹/۵۴۸	۶۰۳۹/۹۹۸	۷۰۰۰
JA	۱۵۷۱	۷۱۱۰/۰۶۷	۶۱۷۰/۸۰۷	۷۰۰۰
DE	۶۳۴	۷۳۸۱/۲۰۶	۶۴۲۵/۱۱۵	۷۰۰۰
WOA	۳۴۲۲	۱۰۶۶۹/۵۸۸	۶۳۰۰/۵۶۶	۷۰۰۰

جدول ۸. مقایسه‌ی نتایج روش‌ها در طرح مخزن تحت فشار (فرمول بندی دوم).

الگوریتم	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	مقدار تابع هدف	تعداد فراخوانی تابع هدف
FOA	۰/۷۷۸۲	۰/۳۸۴۷	۴۰/۳۲۰۸	۱۹۹/۹۸۳۵	۵۸۸۵/۶۸۵	۷۰۰۰
CBO [۳۰]	۰/۷۷۹۹	۰/۳۸۵۵	۴۰/۴۰۹۰	۱۹۸/۷۶۲۳	۵۸۸۹/۹۱۱	۴۰۰۰
VCS [۳۱]	۰/۷۷۸۱	۰/۳۸۴۶	۴۰/۳۱۹۶	۱۹۹/۹۹۹۹	۵۸۸۵/۳۳۳	۳۶۰۲
MBA [۳۲]	۰/۷۸۰۲	۰/۳۸۵۶	۴۰/۴۲۹۳	۱۹۸/۴۹۶۴	۵۸۸۹/۳۲۲	۷۰۶۵۰

جدول ۹. مشخصات مصالح مصرفی.

F_y	ϑ	E	ρ
۲۴۰۰	۰/۳	۲۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۷۸۹۴

جدول ۱۰. ضرایب ترکیب بار.

شماره‌ی ترکیب بار	بار مرده	بار زنده	بار باد
۱	۱/۴	۰	۰
۲	۱/۲	۱/۶	۰
۳	۱/۲	۰	۰/۷
۴	۱/۲	۱	۱/۴
۵	۰/۹	۰	۱/۴

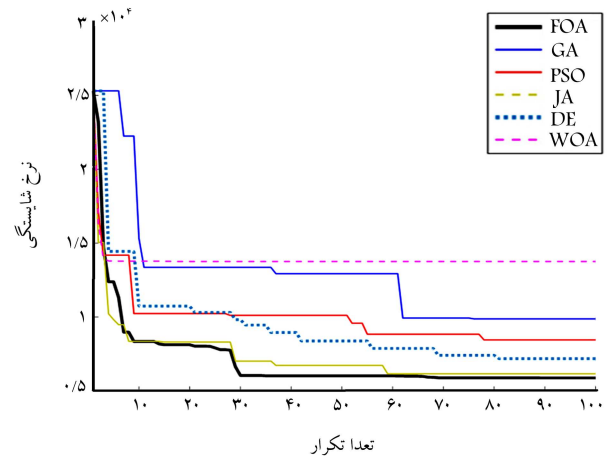
در جدول ۹، مشخصات مصالح مصرفی، شامل: چگالی، مدول سختی، ضریب پواسون و مقاومت تسلیم فولاد در سیستم واحد کیلوگرم - سانتی‌متر برای اسکلت سازی شبکه ارائه شده است.

نیمرخ نیروی سمت باد بر سازه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. در جدول ۱۰، ضرایب ترکیب بار حاکم در تحلیل سازه‌ها و در جدول ۱۱، برآیند بارهای جانبی وارد بر هر تراز طبقه پس از اعمال سطح بارگیر محاسبه و ارائه شده است.

با وجود ۱۵ گروه عضوی و ۲۸ مقطع برای انتخاب در هر یک از آنها طبق جدول ۱۲، ابعاد فضای جستجو در بهینه‌یابی مسئله‌ی حاضر، 28^{15} یعنی بیش از ۵ میلیارد میلیارد گزینه خواهد بود، که پیچیدگی و زمان‌بر بودن حل آن را نشان می‌دهد. ناگزیر از تحلیل‌های خطی ایستا طی بهینه‌یابی استفاده شده و سپس طرح‌های حاصل تحت تحلیل‌های پیشرفته‌تر قرار گرفته‌اند. به منظور مدل‌سازی اثر خاک زیر پی فنرهای روابط سختی در ادبیات فنی داده شده است، که طبق جدول ۱۳ لحاظ شده‌اند.

که در آنها، G مدول برشی؛ ν ضریب پواسون؛ γ_s وزن مخصوص خاک؛ V_s سرعت موج برشی.

بر اساس مقررات ملی و استاندارد ۲۸۰۰ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، سرعت موج برشی برای خاک نوع III بین ۱۷۵ الی ۳۷۵ متر بر ثانیه داده

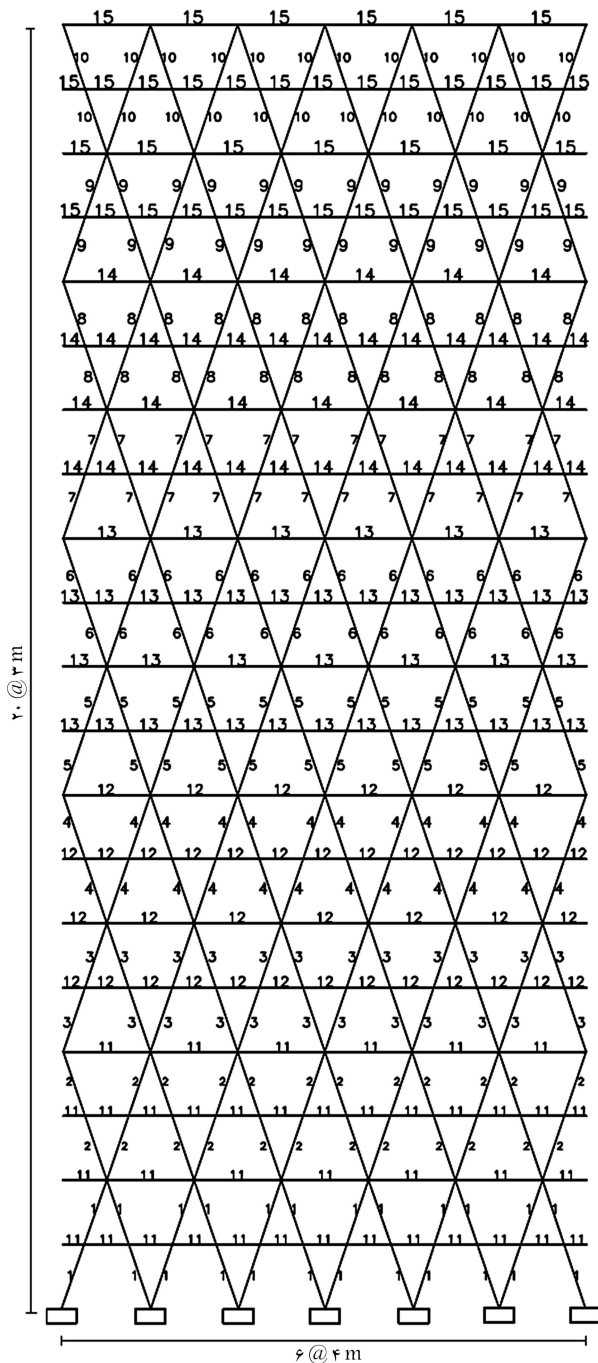
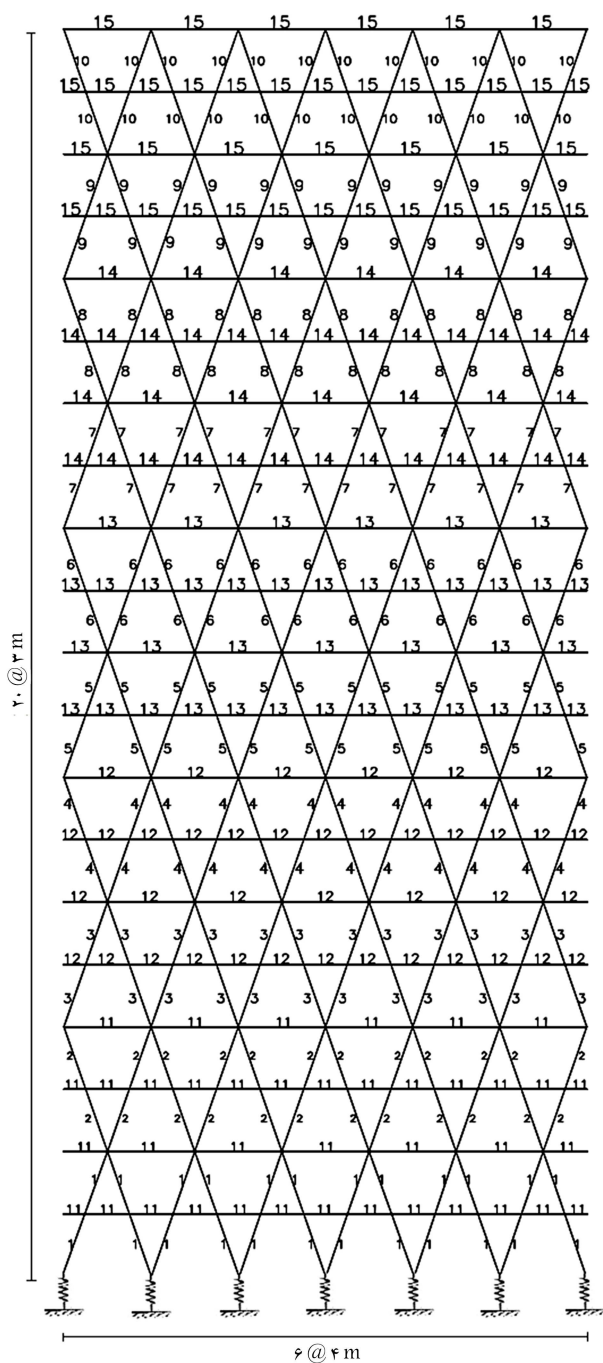


شکل ۸. مقایسه‌ی هم‌گرایی روش‌ها در طرح مخزن تحت فشار (فرمول بندی دوم).

۵. معرفی شبکه‌ی قطری مورد بررسی و بارگذاری آن

یک سازه‌ی شبکه‌ی قطری ۲۰ طبقه تحت بارگذاری باد طبق میجث ششم مقررات ملی ایران برای طرح بهینه و مطالعه‌ی رفتاری مدل‌سازی شده است. [۳۳] قاب مستوی از شبکه‌ی قطری مورد مطالعه، ۴۳۵ عضو داشت. گروه‌بندی شبکه‌ی قطری در حالت پی صلب در شکل ۹ و همچنین گروه‌بندی قاب در حالت پی منعطف (با فنرهای معادل اثر خاک زیر پی) در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. برای بررسی شبکه‌ی قطری ذکر شده، ۵۰ و تعداد ۷۰ شاهین به کار رفته‌اند. بارهای زنده و مرده به ترتیب 15 kg f/cm^2 و 24 kg f/cm^2 بودند. بارگذاری باد طبق آیین‌نامه از طریق رابطه‌ی ۳۵ محاسبه می‌شود:

$$p = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_P \quad (35)$$



شکل ۱۰. گروه بندی اعضاء سازه‌ی شبکه‌ی قطری مورد مطالعه با پایه‌ی فنردار.

شکل ۹. گروه بندی اعضاء سازه‌ی شبکه‌ی قطری مورد مطالعه با پایه‌ی صلب.

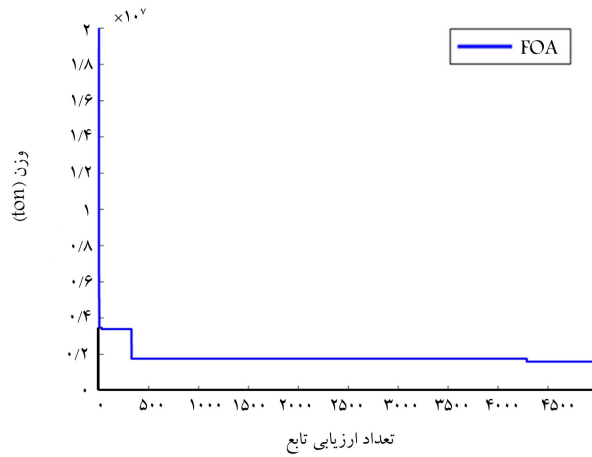
مقدار حاصل در محاسبه‌ی سختی فنرهای معادل خاک زیر پی در جدول ۱۴ ارائه شده است:

شده است، که میانگین آن در پژوهش حاضر به کار رفته است. برای خاک‌های رسی سخت، مقدار ضریب پواسون بین ۰/۲ الی ۰/۳ است و در پژوهش حاضر، مقدار این ضریب ۰/۳ در نظر گرفته شده است. پی مورد نظر مربعی به ابعاد ۲ متر مفروض است. وزن مخصوص خاک در حد معمول و برابر ۲۰ کیلونیوتن بر مترمکعب محاسبه و مدول برشی با رابطه‌ی ۳۶ تعیین شده است:

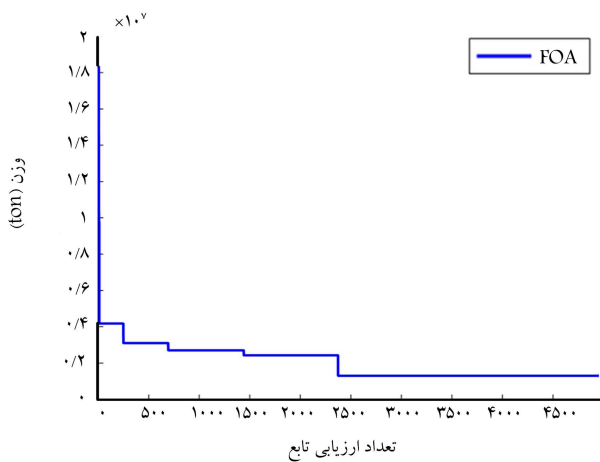
۶. بررسی نتایج حاصل از طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی قطری

مقاطع بهینه‌ی به دست آمده برای گروه‌های عضو مشخص شده با الگوریتم شاهین برای هر دو حالت صلب و دارای اثر خاک زیر پی در جدول ۱۵ ارائه شده‌اند.

$$G = \frac{\gamma_s \times V_s^T}{g} \quad (36)$$



شکل ۱۲. نمودار هم‌گرایی شبکه با پی صلب، وزن جریمه شده در برابر تعداد برآورد تابع هدف.



شکل ۱۳. نمودار هم‌گرایی شبکه با پی انعطاف‌پذیر، وزن جریمه شده در برابر تعداد برآورد تابع هدف.

۱.۷. مقایسه دوره‌ی تناوب^۷ سازه‌ها

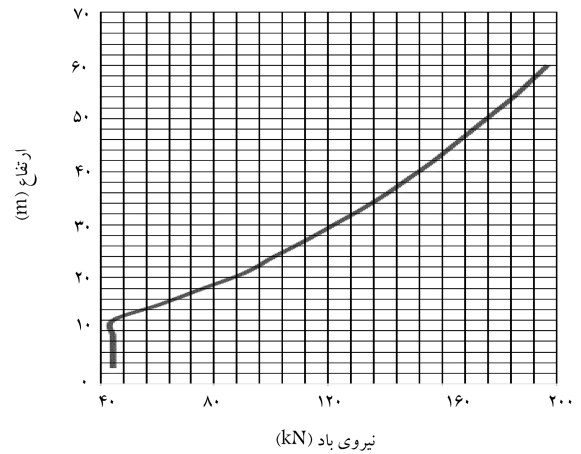
در جدول ۱۶، دوره‌ی تناوب هر دو سازه ارائه شده است، که مطابق آن دوره‌ی تناوب سازه با در نظر گرفتن اثر خاک زیر پی نسبت به حالت صلب حدود ۱۴٪ افزایش داشته است. این افزایش تناوب در سازه با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر (فتر زیر پی) نسبت به حالت صلب، مورد انتظار بوده و تأییدی بر صحت نتایج است.

۲.۷. بیشینه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی بام

در جدول ۱۷، بیشینه‌ی جابه‌جایی در طبقه‌ی بام برای هر دو حالت صلب و با اثر خاک مقایسه شده است. جابه‌جایی بام با لحاظ انعطاف‌پذیری خاک بیشتر از مدل تکیه‌گاه صلب مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، چشم‌پوشی از اثر خاک زیر پی در جهت کم برآورد کردن پاسخ نسبت به حالت واقعی و نامطلوب است.

۳.۷. وزن فولاد مصرفی

به عنوان تابع هدف بهینه‌یابی انجام شده، یکی از شاخص‌های مهم و قابل توجه، وزن سازه است؛ لذا مقایسه‌ی وزن فولاد مصرفی در دو حالت وزن کل سازه، علاوه



شکل ۱۱. نمودار توزیع نیروی ناشی از وزش باد بر سازه.

جدول ۱۱. برآیند بارگذاری جانبی باد وارد بر هر طبقه‌ی سازه.

شماره‌ی طبقه	شماره‌ی طبقه	شماره‌ی طبقه	شماره‌ی طبقه
(kgf)	(kgf)	(kgf)	(kgf)
۱۳۲۱	۱۱	۴۴۴	۱
۱۴۱۰	۱۲	۴۴۴	۲
۱۴۹۳	۱۳	۴۴۴	۳
۱۵۶۹	۱۴	۴۴۴	۴
۱۶۴۵	۱۵	۶۱۲	۵
۱۷۱۳	۱۶	۷۶۰	۶
۱۷۸۵	۱۷	۸۹۶	۷
۱۸۵۳	۱۸	۱۰۱۶	۸
۱۹۱۵	۱۹	۱۱۲۵	۹
۱۹۷۶	۲۰	۱۲۲۶	۱۰

نمودارهای هم‌گرایی شایستگی بهترین جواب از میان ۱۰ اجرای مستقل هر الگوریتم در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شوند. آشکار است که هر دو مدل به هم‌گرایی رسیده‌اند و می‌توان نتایج را به عنوان طرح بهینه قلمداد کرد. مشاهده می‌شود که در کمتر از ۲۵۰۰ فراخوانی، مقدار تابع هزینه‌ی بهترین شاهین بیش از ۱۰ برابر کوچک‌تر شده است. نمودارهای مذکور نشان‌دهنده‌ی توانایی و سرعت هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌یابی شاهین با جستجوی ۵۰۰۰ گزینۀ از میان انبوه گزینۀ‌های ممکن در مسئله‌ی حاضر است.

۷. بررسی پاسخ‌های سازه‌ی مربوط به مقاطع بهینه

بعد از اجرای الگوریتم‌ها و به دست آوردن مقاطع بهینه در هر یک از دو مدل با تکیه‌گاه صلب و فنر قائم، نوبت به بررسی رفتاری مدل‌ها می‌رسد. از آن‌جا که پاسخ‌های سازه در تحلیل‌های گام به گام غیرخطی بسته به تاریخچه‌ی زمانی و محتوای بسامدی زلزله‌ی ورودی متغیر است و نتیجه‌ی واحدی به دست نخواهد داد، در این‌جا برای شناسایی مدل از تحلیل ایستای غیرخطی (بارافزون^۶) استفاده شده است. این نوع تحلیل تحت الگوی بار جانبی مذکور به کمک نرم‌افزار SAP۲۰۰۰، انجام و در ادامه، نتایج حاصل مقایسه شده‌اند.

جدول ۱۲. فهرست مقاطع استفاده شده.

شماره	مقطع	مساحت	شماره	مقطع	مساحت (۱۰ ^{-۴} m ^۲)
۱	W۱۰ × ۹	۳۶/۲۶	۱۵	W۱۲ × ۷۲	۱۳۶/۱۳
۲	W۱۰ × ۳۳	۶۲/۶۵	۱۶	W۱۲ × ۷۲	۱۴۹/۶۸
۳	W۱۰ × ۳۹	۷۴/۱۹	۱۷	W۱۲ × ۸۷	۱۶۵/۱۶
۴	W۱۰ × ۴۹	۹۲/۹	۱۸	W۱۲ × ۹۶	۱۸۱/۹۴
۵	W۱۰ × ۵۴	۱۰/۹۴	۱۹	W۱۴ × ۲۲	۴۱/۸۷
۶	W۱۰ × ۶۰	۱۱۳/۵۲	۲۰	W۱۴ × ۴۳	۸۱/۲۹
۷	W۱۰ × ۷۷	۱۴۵/۸	۲۱	W۶ × ۱۵	۲۸/۵۸
۸	W۱۲ × ۱۹	۳۵/۹۴	۲۲	W۶ × ۲۰	۳۷/۸۷
۹	W۱۲ × ۲۶	۴۹/۳۵	۲۳	W۸ × ۲۴	۴۵/۶۸
۱۰	W۱۲ × ۳۰	۵۶/۷۱	۲۴	W۸ × ۲۸	۵۳/۲۳
۱۱	W۱۲ × ۴۵	۸۵/۱۶	۲۵	W۸ × ۳۱	۵۸/۹
۱۲	W۱۲ × ۵۳	۱۰۰/۶۴	۲۶	W۸ × ۳۵	۶۶/۴۵
۱۳	W۱۲ × ۵۸	۱۰۹/۶۸	۲۷	W۸ × ۴۰	۷۵/۴۸
۱۴	W۱۲ × ۶۵	۱۲۳/۲۳	۲۸	W۸ × ۴۵	۹۰/۹۷

جدول ۱۳. روابط سختی معادل قائم خاک زیر پی. [۳۴]

درجه‌ی آزادی	سختی پی سطحی مربعی معادل شده با دایره به شعاع r	سختی پی سطحی مربعی به عرض B
انتقال افقی	$K_x = \frac{8Gr}{r-\vartheta}$	$K_x = \frac{8GB}{r-\vartheta}$
انتقال قائم	$K_z = \frac{2Gr}{1-\vartheta}$	$K_z = \frac{2.5rGB}{1-\vartheta}$

جدول ۱۴. مقادیر سختی معادل خاک زیر پی kgf/m .

انتقال افقی	انتقال قائم
۸۸۰۱۷۶۰۰	۴۴۴۰۰۰۰۰

جدول ۱۶. مقایسه‌ی دوره‌ی تناوب مدل‌های بهینه‌ی سازه (ثانیه).

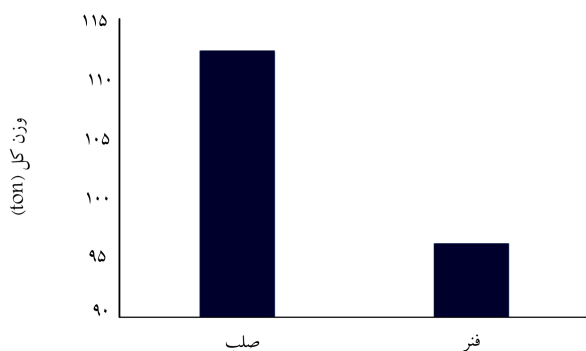
مدل پی صلب	مدل پی انعطاف پذیر
۱/۱۸۰	۱/۳۴۸

جدول ۱۷. مقایسه‌ی جابه‌جایی بام در مدل‌های بهینه‌ی سازه (متر).

مدل پی صلب	مدل پی انعطاف پذیر
۰/۲۸۳۴	۰/۳۰۱۷

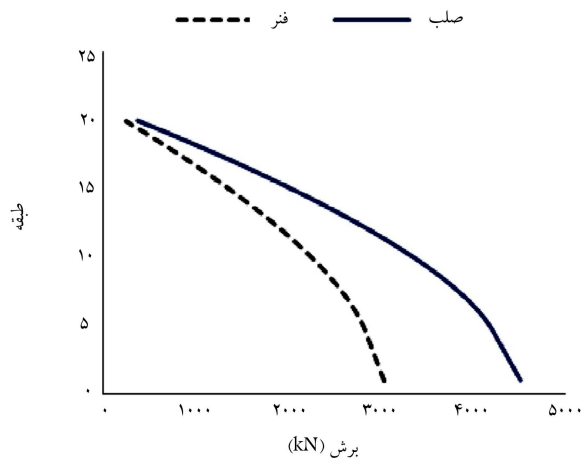
جدول ۱۵. فهرست مقاطع بهینه‌ی تحت الگوریتم شاهین.

شماره‌ی گروه	FOA	
	صلب	با اثر خاک
۱	۱۸	۱۷
۲	۱۶	۱۳
۳	۵	۱۸
۴	۱۴	۷
۵	۲۸	۱۸
۶	۵	۱۷
۷	۱۷	۱۸
۸	۵	۵
۹	۶	۲
۱۰	۵	۵
۱۱	۲	۴
۱۲	۱۱	۲۸
۱۳	۱۶	۱۰
۱۴	۱۵	۲۸
۱۵	۱۲	۲۰
وزن (کیلوگرم)	۱۱۲۷۱۰	۹۶۲۱۰
میانگین (کیلوگرم)	۱۲۲۵۴۰	۱۱۶۳۸۰
انحراف معیار	۶۸۸۶	۱۰۲۹۸

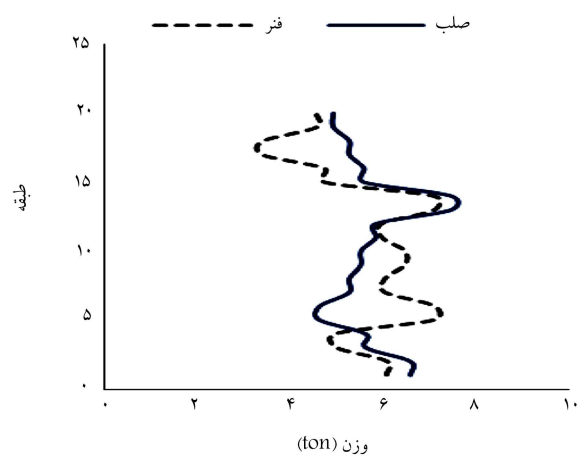


شکل ۱۴. نمودار مقایسه‌ی وزن کل سازه.

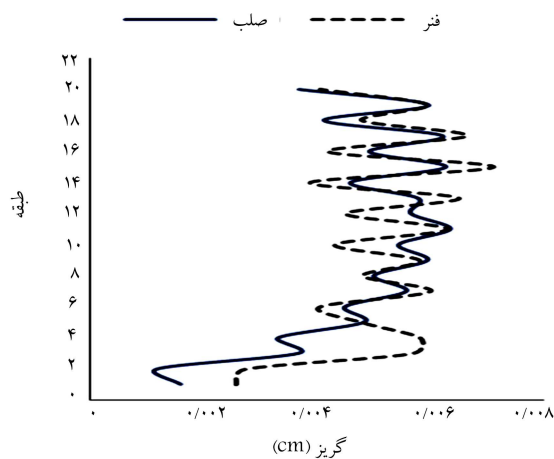
بر جدول ۱۵ در شکل ۱۴ و وزن هر طبقه در شکل ۱۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که وزن فولاد مصرفی سازه در حالتی که اثر خاک در زیر پی در نظر گرفته شده است، کمتر از حالتی است که تکیه‌گاه سازه صلب باشد. در مثال کنونی، اختلاف حدود ۱۶٪ به دست آمده است.



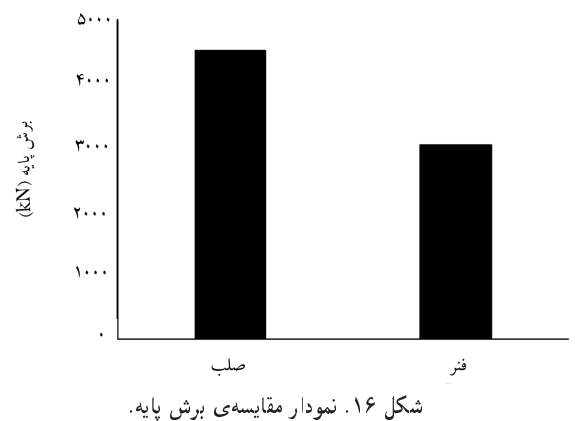
شکل ۱۷. نمودار مقایسه‌ی برش طبقات.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی وزن بهینه‌ی طبقه در دو مدل شبکه‌ی قطری.



شکل ۱۸. نمودار مقایسه‌ی گریز سازه‌ها.



شکل ۱۶. نمودار مقایسه‌ی برش پایه.

مطابق شکل ۱۵، مقدار فولاد مصرفی طبقات پایین‌تر در مدل با اثر انعطاف‌پذیری خاک بیشتر از مدل با پی صلب بوده است. بالعکس، در طبقات بالاتر مشاهده می‌شود که در برخی طبقات بالایی، فولاد مصرفی مدل پی انعطاف‌پذیر کمتر از مدل صلب بوده و در طبقات میانی اختلاف کاهش یافته است. به نظر می‌رسد در طرح بهینه‌ی مدل با پی انعطاف‌پذیر نسبت به سازه با پی صلب، توزیع وزن و فولاد مصرفی طبقه به سمت طبقات پایینی تغییر یافته است، تا کمبود سختی در ناحیه‌ی مذکور تا حدی جبران شود.

۴.۷. بیشینه‌ی برش پایه

در شکل ۱۶، بیشینه‌ی برش پایه برای دو سازه‌ی بهینه مقایسه شده است. بر اساس این نمودار به نظر می‌رسد سازه با پی انعطاف‌پذیر به میزان قابل توجهی زودتر از مدل پی صلب مکانیزم شده است. البته در نتیجه این نتیجه باید در نظر داشت که طبق جدول ۱۵، وزن سازه با پی انعطاف‌پذیر، کمتر از سازه‌ی روی پی صلب است. این مطلب نیز تأییدی بر ضرورت مدل‌سازی اثر خاک زیر پی است.

۵.۷. برش پایه‌ی طبقات

در شکل ۱۷، مقایسه‌ی برش هر طبقه از سازه در مدل تکیه‌گاه صلب با حالت تأثیر خاک مشاهده می‌شود، که مطابق آن در طبقات بالا، اختلاف در برش طبقه کمتر بوده و به سمت محل تکیه‌گاه افزایش یافته است. ضمن این‌که برش طبقه نیز در مدل صلب بیشتر است و البته در پایین‌ترین تراز همان برش پایه را نشان می‌دهد.

۶.۷. گریز^۸ بهینه در طبقات

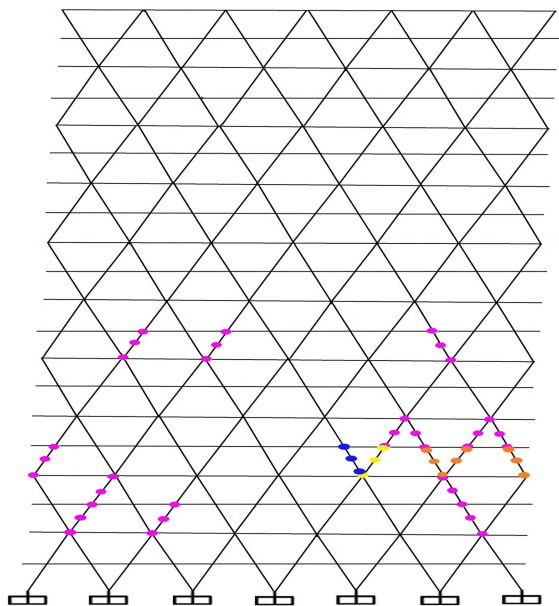
در سازه‌ی شبکه قطری، که در محل تقاطع گره‌های اعضاء مایل بر تیرها تمرکز تنش افزایش می‌یابد و این تیرها مانند کمر بند در رفتار سازه تأثیرگذارند، نمودار گریز سازه در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.

همچنین در حالتی که اثر خاک زیر سازه در نظر گرفته شده است، مقدار تغییرات گریز بیشتر از حالتی مشاهده می‌شود که تکیه‌گاه سازه صلب باشد. از آن‌جا که گریز به عنوان جابه‌جایی نسبی عامل ایجاد تنش‌ها و در کاهش حاشیه‌ی ایمنی سازه مؤثر است، از این دیدگاه نیز اهمیت مدل‌سازی انعطاف‌پذیری خاک مشخص می‌شود.

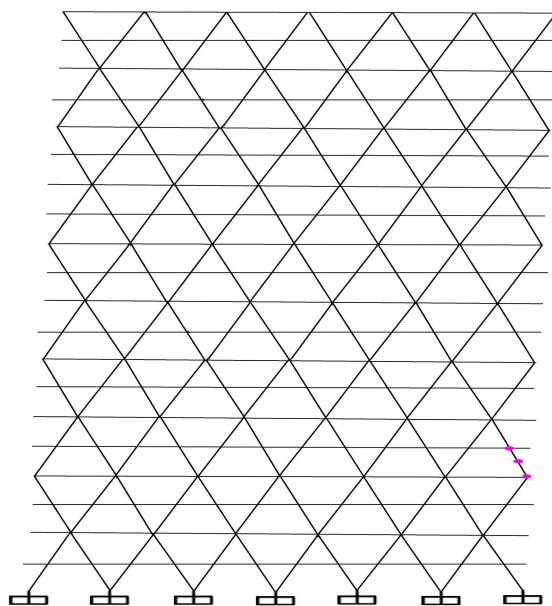
۸. گسترش مفاصل خمیری

در بخش حاضر، نحوه‌ی توزیع مفاصل خمیری در هر دو نوع مدل شبکه‌ی قطری هم در لحظه‌ی (گام) شروع مفاصل و هم در آخرین گام تحلیل بارافزون ارائه شده است. توزیع مفاصل خمیری در مثال‌های بهینه‌شده‌ی طرح شبکه‌ی قطری عمدتاً از گوشه‌ی سازه شروع شده و به سمت مرکز گسترش یافته است. شکل ۱۹، شروع مفاصل در سازه با تکیه‌گاه صلب و شکل ۲۰، در حالت پی روی خاک انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.

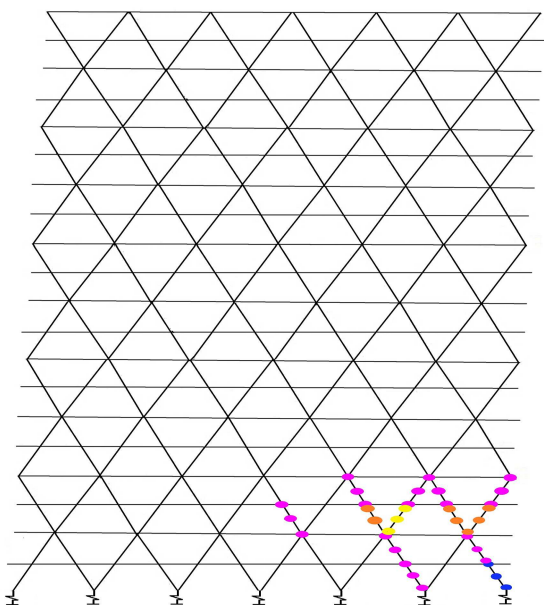
مطابق شکل‌های ۱۹ و ۲۰، ایجاد تشکیل مفاصل در هر دو حالت از یک



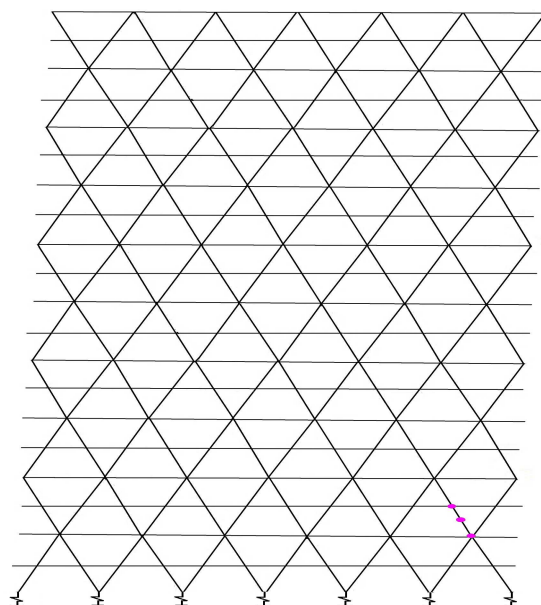
شکل ۲۱. توزیع مفاصل خمیری در آخرین گام بارگذاری سازه با تکیه‌گاه صلب.



شکل ۱۹. شروع توزیع مفاصل خمیری در سازه با تکیه‌گاه صلب.



شکل ۲۲. توزیع مفاصل خمیری در آخرین گام بارگذاری سازه با اثر نرمی خاک.



شکل ۲۰. شروع توزیع مفاصل خمیری در سازه با اثر خاک زیر پی.

مدل انعطاف پذیر، تعداد اعضایی که در آنها مفصل تشکیل می‌شود، نیز کمتر از مدل صلب به دست آمده است.

۹. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، دو سازه‌ی شبکه‌ی قطری ۲۰ طبقه، با بارگذاری ثقلی و باد یکسان تحت مبحث ششم مقررات ملی با و بدون در نظر گرفتن اثر سختی خاک زیر پی تحت بهینه‌یابی بررسی شدند. الگوریتم شاهین‌ها برای غربالگری به طرح‌های بهینه به کار رفته است. سپس پاسخ‌های سازه‌ی مدلی حاصل به کمک تحلیل ظرفیتی بارافزون مقایسه شدند و نتایج نشان دادند که منظور نکردن اثر خاک زیر پی می‌تواند منجر به تفاوت‌هایی در طراحی و رفتار سازه‌ها شود، که اهم آنها به

عضو مورب در کنار سازه شروع شده است. اما در سازه با پایه‌ی صلب در طبقه‌ی بالاتری نسبت به حالت مدل فزنی تشکیل شده است. با ادامه دادن گام‌های تحلیل بارافزون، آخرین حالت تشکیل مفاصل در آستانه‌ی رسیدن به خرابی نهایی در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مشاهده می‌شود. در این حال، مقایسه و بررسی مفاصل در دو مدل سازه‌ی نشان می‌دهد که پراکندگی مفاصل خمیری در شبکه‌ی قطری با تکیه‌گاه صلب بیشتر از مدل با تکیه‌گاه فزنی است.

به عبارت دیگر، چشم‌پوشی از انعطاف‌پذیری خاک برخلاف واقع منجر به نادیده انگاشتن حالت بحرانی‌تری از دیدگاه پایداری سازه می‌شود. چرا که شروع مفاصل خمیری از طبقات پایین ممکن است منجر به خرابی پیش‌رونده و فروریزش کلی سازه شود. وقتی اثر خاک زیر پی سازه لحاظ شود، توزیع مفاصل خمیری به طور متمرکزتر در یک قسمت سازه رخ داده است، هر چند با وجود وزن بهینه‌ی کمتر در

۵. فولاد مصرفی بهینه در حالتی که خاک زیر پی در نظر گرفته شود، تقریباً ۱۶٪ کاهش یافته و همچنین مصرف فولاد در طبقات با در نظر گرفتن اثر خاک زیر پی، یک روند کاهشی داشته است.
 ۶. برش پایه با در نظر گرفتن اثر خاک زیر پی کاهش یافت، که این امر می‌تواند نشان‌دهنده‌ی ظرفیت جذب کمتر نیرو در این حالت با عنایت به تفاوت سختی و وزن سازه نسبت به مدل تکیه‌گاه صلب باشد.
 ۷. مقایسه‌ی برش طبقات نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع تراز و در طبقات بالاتر، اختلاف مذکور کاهش یافته است، ولی تغییرات آن با تغییر تراز به سمت محل تکیه‌گاه افزایشی بوده است.
 ۸. تحلیل بارافزون، روند تشکیل مفاصل خمیری در شبکه‌ی قطری تحت بار جانبی باد را آشکار کرد، چنان‌که از گوشه‌ی شبکه شروع و به سمت میانه‌ی سازه ادامه یافته است. این توزیع در حالت با اثر خاک زیر پی به نسبت حالت تکیه‌گاه صلب، در گوشه متمرکزتر بوده و در تعداد اعضاء کمتری تشکیل شده است.
 ۹. با توجه به موارد مذکور، چشم‌پوشی از انعطاف‌پذیری خاک زیر تکیه‌گاه شبکه‌ی قطری تحت بار جانبی می‌تواند نه در جهت اطمینان و نه از دید کاهش وزن مصالح به صرفه باشد. به عبارت دیگر، پژوهش حاضر اهمیت مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه در طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی قطری تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی را طی نتایج عددی در طرح‌های غربال شده‌ی بهینه آشکار می‌سازد.
- اختصار ذکر شده است. باید توجه داشت که محدوده‌ی اعتبار نتایج پژوهش حاضر در استفاده از بهینه‌یابی ابعادی در غربال‌گری مقاطع مدل‌های صلب و انعطاف‌پذیر از میان حالت‌های متعدد مدل‌هاست.
۱. طی بررسی حاضر، الگوریتم شاهین به نتایج بهینه‌ی مناسبی در مثال‌های محک مسائل مهندسی در مقایسه با مراجع موجود در ادبیات فنی نائل آمد. مقایسه‌ی دقیق‌تر با شروع از جمعیت اولیه‌ی یکسان بین روش الگوریتم شاهین و تعدادی از الگوریتم‌های مشهور انجام شد، که برتری کارایی الگوریتم شاهین را هم در بهترین نتیجه و هم در میانگین آنها نشان داد.
 ۲. بررسی دو فرمول‌بندی پیوسته و گسسته در مثال مخزن تحت فشار نشان داد الگوریتم شاهین در هم‌گرایی به بهینه‌ی پذیرفتنی و توانایی عبور از بهینه‌های محلی به سوی بهینه‌ی سراسری در جایگاه مطلوبی قرار دارد. در ادامه، الگوریتم شاهین توانست در فضای جستجوی گسترده‌ی مسئله‌ی شبکه‌ی قطری با حجم محاسباتی قابل قبول نیز به هم‌گرایی برسد.
 ۳. با توجه به آن‌که عملاً انتخاب مقاطع از یک فهرست در دسترس محدود صورت می‌گیرد، ویژه‌سازی الگوریتم شاهین در پژوهش حاضر برای کار با متغیرهای گسسته‌ی شماری مقاطع منجر به دقیق بودن طرح نهایی برای مقاصد کاربردی شد.
 ۴. در نتایج عددی مثال‌های مورد مطالعه، افزایش بیشینه‌ی جابه‌جایی بام تا ۶٪ در نتیجه‌ی تأثیر انعطاف‌پذیری خاک مشاهده شد.

پانویس‌ها

1. Falcon Optimization Algorithm
2. MATLAB
3. Vasconcelos
4. Rao
5. surge waves frequency
6. pushover analysis
7. period
8. drift

منابع (References)

5. Storn, R. and Price, K. "Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *J. Glob. Optim.*, **11**, pp. 341-359 (1997).
6. Eberhart, R. and Kennedy, J. "A new optimizer using particle swarm theory", *Proc. sixth Int. Symp. micro Mach. Hum. Sci.*, pp.39-43 (1995).
7. Dorigo, M. and Stutzle, T. "The ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications, and advances", *In Handbook of Metaheuristics SE - International Series in Operations Research & Management Science*, **57**, pp. 250-285 (2003).
8. Geem, Z.W. "Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications", *Springer-Verlag: Berlin Heidelberg* (2009).
9. Kaveh, A. and Mahdavi, V.R. "Colliding bodies optimization: Extensions and applications", *Springer International Publishing* (2015).
10. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Hatamlou, A. "Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization", *Neural Comput. Appl.*, **27**, pp. 495-513 (2016).
11. Mirjalili, S., Gandomi, A.H., Mirjalili, S.Z. and et al. "Salp swarm algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems", *Adv. Eng. Softw.*, **114**, pp. 163-191 (2017).
1. Salcedo-Sanz, S. "Modern meta-heuristics based on non-linear physics processes: a review of models and design procedures", *Physics Reports*, **655**, pp. 1-70 (2016).
2. Bäck, T., Eiben, A.E., Van der Vaart, N.A.L. and et al. "A survey of bio inspired optimization algorithms", *Int. J. Soft Comput. Eng.*, **2**, pp. 137-151 (2012).
3. Glover, F. "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Comput. Oper. Res.*, **13**(5), pp. 533-549 (1986).
4. Holland, J. H. "Genetic algorithms", *Sci. Am.*, **267**, pp. 66-72 (1992).

12. Kaveh, A. and Bakhshpoori, T. "A new metaheuristic for continuous structural optimization: water evaporation optimization", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **54**, pp. 23-43 (2016).
13. Degertekin, S.O., Lamberti, L. and Hayalioglu, M.S. "Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures", *Lat. Am. J. Solids Struct.*, **14**(3), pp. 373-397 (2017).
14. Kaveh, A. and Ghazaan, M.I. "A new meta-heuristic algorithm: vibrating particles system", *Sci. Iran.*, **24**(2), pp. 1-32 (2017).
15. Vasconcelos Segundo, E.H. de, Mariani, V.C. and Coelho, L.dos S. "Design of heat exchangers using falcon optimization algorithm", *Appl. Therm. Eng.*, **156**, pp. 119-144 (2019).
16. Connor, J.J., Fernandez, J.E. and Moon, K.S. "Diagrid structural systems for tall buildings: methodology for preliminary design", *Struct. Des. tall Spec. Build.*, **16**(2), pp. 205-230 (2007).
17. Shahrouzi, M. and Azizi, A. "Configuration design of diagrids via module-based optimisation by an enhanced meta-heuristic algorithm", In *5th International Conference on Soft computing and Optimisation in Civil, Structural and Environmental Engineering*, Elsevier: Lake Garda, Italy (2019).
18. Shahrouzi, M., Medhkat-dini, A. and Azizi, A. "Optimal wind resistant design of tall buildings utilizing mine blast algorithm", *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, **5**(2), pp. 137-150 (2014).
19. Tucker, V.A. "Gliding flight: drag and torque of a hawk and a falcon with straight and turned heads, and a lower value for the parasite drag coefficient", *J. Exp. Biol.*, **203**(Pt 24), pp. 3733-3744 (2000).
20. Tucker, V.A. "The deep fovea, sideways vision and spiral flight paths in raptors", *J. Exp. Biol.*, **203**(Pt 24), pp. 3745-3754 (2000).
21. Building and Housing Research Center "INBC: Part-10 Iranian National Building Code, Part-10: Design of Steel Structures", *4th ed., Roads, Housing and Urban Development of Iran: Tehran* (2013).
22. Venkata Rao, R. "Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems", *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, **7**(1), pp. 19-34 (2016).
23. Mirjalili, S. and Lewis, A., "The whale optimization algorithm", *Adv. Eng. Softw.*, **95**, pp. 51-67 (2016).
24. Rao, S.S. "Engineering optimization: theory and practice: fourth edition", *John Wiley & Sons, New Jersey* (2009).
25. Arora, J.S. "Introduction to optimum design", *2ed Ed., Academic press, London, UK* (2004).
26. Coello, C.A. and Montes, E.M. "Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection", *Adv. Eng. Informatics.*, **16**(3), pp. 193-203 (2002).
27. Askarzadeh, A. "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm", *Comput. Struct.*, **169**, pp. 1-12 (2016).
28. He, Q. and Wang, L. "An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, **20**(1), pp. 89-99 (2007).
29. Yang, X.S., Huyck, C., Karamanoglu, M. and et al. "True global optimality of the pressure vessel design problem: A benchmark for bio-inspired optimisation algorithms", *International Journal of Bio-Inspired Computation*, **5**(5), pp. 329-335 (2014).
30. Kaveh, A. and Mahdavi, V.R. "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method", *Comput. Struct.*, **139**(15), pp. 18-27.(2014).
31. Li, M.D., Zhao, H., Weng, X.W. and et al. "A novel nature-inspired algorithm for optimization: virus colony search", *Adv. Eng. Softw.*, **92**, pp. 65-88 (2016).
32. Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H. and et al. "Mine blast algorithm: A new population based algorithm for solving constrained engineering optimization problems", *Appl. Soft Comput. J.*, **13**(5), pp. 2592-2612 (2016).
33. Building and Housing Research Center "INBC: Part-6 Iranian National Building Code, Part-6: Loading on Structures", *4th ed., Roads, Housing and Urban Development of Iran: Tehran* (2013).
34. Mylonakis, G., Nikolaou, S. and Gazetas, G. "Footings under seismic loading: analysis and design issues with emphasis on bridge foundations", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **26**(9), pp. 824-853 (2006).