



مقاله پژوهشی

پیش‌بینی تنش همرسی ترک در نمونه‌های شبه سنگی دارای درزه‌های ناممتد تحت بار برش مستقیم با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین

وهاب سرفرازی^{۱*}، فریبرز متین‌پور^۲، شادمان محمدی بلبان آباد^۳، مسعود منجزی^۳

- ۱- گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران
- ۲- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۳- گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: دی ۱۴۰۲، پذیرش: اسفند ۱۴۰۲)

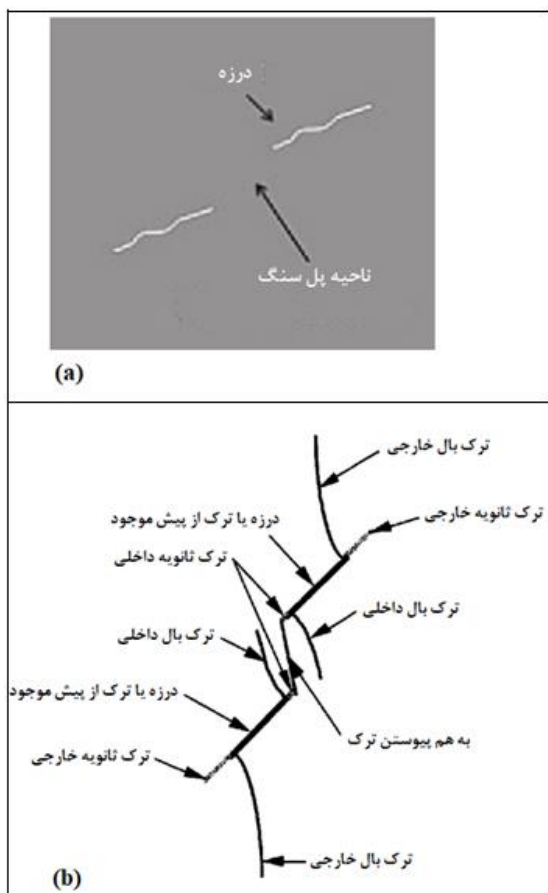
چکیده

شکستگی‌ها معمولاً به شکل درزه‌ها و ریزترک‌ها در توده سنگ یافت می‌شوند و مکانیسم شکست آن‌ها به شدت به الگوی همرسی ترک بین ناپیوستگی‌های از قبل موجود بستگی دارد. تعیین رفتار شکست درزه‌های ناممتد یک مسئله مهندسی است که پارامترهای مختلفی از جمله خصوصیات مکانیکی توده سنگ، تنش نرمال و نسبت سطح درزه به سطح برشی کل (ضریب درزه‌داری) را شامل می‌شود. در این مقاله، به منظور پیش‌بینی تنش همرسی ترک از دو روش یادگیری ماشین شامل الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) استفاده شده است. بدین منظور ۸ پارامتر ورودی مؤثر بر تنش همرسی ترک از جمله ضریب درزه‌داری (JC)، تنش نرمال (σ_n)، مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c)، مقاومت کششی (σ_t)، نسبت پواسون (ν)، مدول الاستیسیته (E)، مقاومت چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر اساس نتایج ۴۵۰ آزمایش برش مستقیم انجام شده بر روی نمونه‌های شامل ۲ دسته درزه ناممتد ساخته شده از ترکیب گچ، سیمان و آب انتخاب و سپس روش‌های GWO و GEP پیاده‌سازی گردیدند. به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها در پیش‌بینی تنش همرسی ترک در نمونه‌ها، از ۳ شاخص ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای داده‌های آموزش و تست استفاده شد. مقادیر ضریب تعیین روش‌های GWO و GEP برای داده‌های آموزش به ترتیب ۰/۹۶۲ و ۰/۹۳۸ و برای داده‌های تست به ترتیب ۰/۹۹۶ و ۰/۹۸۱ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر روش GWO در مقایسه با GEP است. به علاوه، نتایج نشان داد که مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE در هر دو مرحله آموزش و تست برای الگوریتم GWO کمتر از روش GEP می‌باشند که بیانگر خطای کمتر الگوریتم GWO و قابلیت اطمینان و دقت بالاتر آن نسبت به روش GEP است. با این حال، می‌توان گفت که دو روش مورد استفاده دارای دقت بالایی بوده و بر اساس روش GEP رابطه‌ای جهت پیش‌بینی تنش همرسی ترک ارائه شد. همچنین، نتایج آنالیز اهمیت نشان می‌دهد که از بین پارامترهای ورودی، تنش نرمال (σ_n) و ضریب درزه‌داری (JC) به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر تنش همرسی ترک دارند.

کلمات کلیدی

درزه ناممتد، پل سنگ، تنش همرسی ترک، الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری، برنامه‌ریزی بیان ژن

*عهده‌دار مکاتبات: vahab.sarfarazi@gmail.com



شکل ۱: (a) نمایی از ناحیه پل در یک نمونه دارای درزه ناممتد، (b) الگوی ترک‌های مشاهده شده در یک نمونه دارای درزه ناممتد از پیش موجود [۱].

جل و کاتر [۲۵] با انجام ۱۳۱ آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های ساخته شده با ابعاد $۲۵۰ \times ۱۵۰ \times ۵۰$ میلی‌متر از دو جنس متفاوت گچ خالص و سنگ آهک مقاوم به بررسی مکانیزم شکست و رفتار برشی درزه‌های ناپیوسته متناوب پرداختند. آن‌ها دریافتند که رفتار برشی دسته درزه‌ها ترکیبی از ۳ مرحله متفاوت بوده و همچنین پارامترهای هندسی درزه‌های ناپیوسته، شرایط بارگذاری، جهت ترک‌های اولیه و نیز تنش نرمال مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج آزمایش هستند. ژانگ و همکاران [۲۶] با استفاده از نرم‌افزار تحلیل فرآیند شکست سنگ (RFPA 2D) به بررسی رفتار برشی نمونه‌های دارای درزه‌های متناوب با پارامترهای هندسی متفاوت درزه (جدایش درزه و زاویه آزمایش درزه) پرداختند و نتایج به دست آمده را با آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که الگوی شکست عمدتاً تحت تأثیر پارامترهای هندسی توده سنگ درزه‌دار است، درحالی‌که مقاومت برشی وابسته به

۱- مقدمه

مشخص است که مقاومت پایین‌تر توده سنگ عمدتاً به خاطر حضور درزه‌ها ایجاد می‌شود. در برخی موارد نادر، ممکن است گسیختگی در توده سنگ به دلیل وجود فقط یک ناپیوستگی باشد. به‌طور کلی، چندین ناپیوستگی در اندازه‌های مختلف وجود دارد که یک سطح برشی ترکیبی را تشکیل می‌دهند. از این نظر، مناطقی که بین ناپیوستگی‌های مجاور قرار دارند، ناحیه پل نامیده می‌شوند (شکل ۱a) و بیشترین اهمیت را برای مقاومت برشی سطح شکست دارند [۳-۱]. در اثر اعمال بار (فشاری و برشی) به مواد دارای ناپیوستگی، ترک‌هایی در نوک این ناپیوستگی‌ها در ناحیه پل سنگ ایجاد و به‌مرور انتشار پیدا کرده و در نهایت به هم متصل می‌شوند. به‌طور کلی دو نوع الگوی ترک در ناحیه پل سنگ^۱ شامل ترک‌های باله‌ای^۲ و ترک‌های ثانویه^۳ به وجود می‌آید. ترک‌های باله‌ای کششی در ابتدا از نوک درزه شروع شده و به‌طور پیوسته در یک مسیر منحنی در جهت بار محوری اعمال شده، منتشر می‌شوند، درحالی‌که ترک‌های ثانویه دیرتر ظاهر شده و به‌طور کلی به‌عنوان ترک‌های برشی یا مناطق برشی توصیف می‌شوند (شکل ۱b) [۳-۱]. درک فرآیند رشد^۴، انتشار^۵ و به هم پیوستن^۶ ترک‌ها یک جنبه مهم در مکانیک شکست است که این فرآیند ممکن است به شکست توده سنگ در سدها، فونداسیون‌ها، تونل‌ها و شیب‌های سنگی بیانجامد.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی زیادی به‌منظور بررسی رشد، انتشار و همرسی ترک در شرایط آزمایش تراکم یک و دو محوری انجام شده است [۲-۲۳]. با این حال تعداد مطالعات محدودتری به بررسی الگوی رشد، انتشار و همرسی دو ترک در نمونه‌های شبه سنگی دارای درزه‌های ناممتد هم‌سطح و غیر هم‌سطح تحت آزمایش برش مستقیم، پرداخته‌اند. لجتای [۲۴] با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های دارای ۲ درزه ناپیوسته (ناممتد) هم صفحه نشان داد که ابتدا ترک‌های کششی در نوک داخلی درزه‌ها ایجاد شده و در طی آزمایش به‌وسیله ترک‌های برشی به هم وصل می‌شوند. بعلاوه یافته‌های لجتای نشان داد که مود کششی شکست نمونه‌ها با افزایش تنش نرمال به مود برشی تغییر می‌نماید.

نرمال و زاویه پل به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر مقاومت برشی دارند. به علاوه آن‌ها پروسه ترک خوردن نمونه‌ها را در ۳ دسته ترک خوردن کششی، برشی و ترکیبی (کششی-برشی) طبقه‌بندی نمودند. لین و همکاران [۳۲] با استفاده از شبیه‌سازی کد جریان ذرات ۲ بعدی (PFC 2D) به بررسی اثر توزیع درزه‌های ناممتد هم صفحه بر رفتار برشی پرداختند. آن‌ها ۳ نوع مختلف توزیع درزه را در نمونه‌ها در نظر گرفتند و سپس نتایج مدل‌سازی‌های عددی را با راه‌حل‌های تحلیلی ارائه‌شده توسط دیگر محققان مقایسه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که نتایج شبیه‌سازی عددی با راه‌حل‌های تحلیلی همخوانی خوبی دارد. به علاوه، چسبندگی فاکتور غالب در کنترل مقاومت برشی بوده و مقاومت و مدول برشی با کاهش تداوم درزه، افزایش می‌یابد. همچنین الگوی شکست، به شکست برشی سنگ بکر تمایل دارد و خصوصیات شکست شکننده زمانی آشکار می‌شود که ناحیه پل سنگی بزرگ باشد.

ژانگ و همکاران [۳۳] با انجام آزمایش برش مستقیم تحت بار نرمال ثابت بر روی نمونه‌های شبه سنگی شامل درزه‌های ناممتد چندگانه، ساخته‌شده از جنس گچ، آب و تأخیر دهنده به ترتیب با نسبت وزنی ۱، ۰/۲ و ۰/۰۰۵ و با انجام مدل‌سازی عددی به بررسی رفتار شکست برشی و فرآیند ترک خوردن نمونه‌ها پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که رفتار برشی درزه‌های ناممتد چندگانه معمولاً شامل مودهای اتصال چندگانه پل سنگ‌ها است که تحت تأثیر پیکربندی (نحوه قرار گرفتن) درزه‌ها و تنش نرمال قرار می‌گیرند. همچنین نتایج نشان داد که تحت تنش نرمال مشابه، مقاومت برشی و رفتار اتساع عمدتاً تحت تأثیر تداوم^۷ درزه قرار می‌گیرد که اساساً زبری سطح شکست بزرگ برشی را تعیین می‌کند. مینگ و همکاران [۳۴] با ایجاد مدل‌های عددی توده سنگ مصنوعی بر اساس کد جریان ذرات ۲ بعدی و انجام مدل‌های عددی تست برش مستقیم، اثر پارامترهای پیکربندی هندسی درزه، تنش نرمال، زبری درزه و جدایش درزه (جدایش: فاصله قائم دیواره‌های درزه از هم) بر رفتار مکانیکی درزه‌های سنگی ناممتد را مورد بحث و بررسی قرار دادند. گوا و همکاران [۳۵] با انجام آزمایش برش مستقیم با تنش نرمال باربرداری بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگی شامل یک جفت درزه موازی با شیب‌های مختلف ۰ تا ۹۰ درجه و با تنش‌های برشی اولیه ۴ تا ۷ مگا پاسکال و نیز شبیه‌سازی کد جریان ذرات مربوط به آن‌ها، به بررسی

الگوی شکست و مکانیزم شکست آن است. به علاوه مؤلفان دریافتند که انتشار ترک باله‌ای به جدایش درزه‌ها، آزیموت آن‌ها و ارتباط بین ترک‌های باله‌ای وابسته بوده و این پارامترها الگوی شکست نهایی و تنش برشی حداکثر نمونه سنگی را کنترل می‌کنند. قزوینیان و همکاران [۲۷] با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های ساخته‌شده از گچ، سیمان و آب با نسبت‌های به ترتیب ۳۷/۵، ۲۵ و ۳۷/۵ درصد به بررسی اثر درزه‌های مجزا بر روی رفتار شکست پل سنگ‌ها پرداختند. آن‌ها همچنین از نرم‌افزار PFC 2D (پس از کالیبراسیون) برای شبیه‌سازی رفتار پل سنگ‌ها تحت بار برشی استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و عددی آن‌ها نشان داد که افزایش طول درزه به دلیل افزایش تمرکز تنش در نوک درزه‌ها و نیز افزایش برهم‌کنش تنش بین درزه‌ها، منجر به کاهش مقاومت برشی پل سنگ‌ها می‌شود. کاوو و همکاران [۲۸] با انجام تعدادی آزمایش بر روی مواد شبه سنگی شامل درزه‌های غیر هم‌سطح به مطالعه مکانیسم شکست و مود شکست سنگ درزدار تحت برش-فشار پرداختند. نمونه‌های ساخته‌شده دارای ۲ درزه لبه‌ای افقی و یک درزه اصلی در بین دو درزه لبه‌ای با زاویای مختلف قرارگیری نسبت به افق بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زاویه شیب درزه اصلی تأثیر مهمی بر روی مود شکست نمونه‌ها داشته و موقعیت پدیدار شدن ترک‌های باله‌ای در مراحل اولیه شکست نمونه‌ها را تغییر می‌دهد. به علاوه نتایج نشان داد که مقاومت برشی نمونه‌ها رابطه مهمی با زاویه شیب درزه‌های اصلی دارد.

سرفرازی و همکاران [۲۹، ۳۰] با استفاده از نرم‌افزار PFC 2D به شبیه‌سازی اثر سطح پل سنگ و جدایش درزه بر رفتار برشی درزه‌های ناممتد هم صفحه تحت بارهای نرمال بالا و پایین، پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که الگوی شکست عمدتاً تحت تأثیر تنش نرمال و جدایش درزه است، درحالی‌که مقاومت برشی به الگو و مکانیزم شکست وابسته است. همچنین یافته‌های آن‌ها نشان داد که الگوی شکست به دست آمده از روش عددی مشابه نتایج آزمایشگاهی است. اسدی‌زاده و همکاران [۳۱] با انجام تعدادی آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های سنگ مصنوعی دارای دو درزه موازی (پله‌ای و هم‌سطح) ناممتد به مطالعه اثرات طول پل، زاویه پل، ضریب زبری سطح درزه و تنش نرمال بر روی مقاومت برشی و فرآیند ترک خوردگی سنگ‌های درزه‌دار ناممتد پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تنش

سریعی دارد. در ادامه، مراحل مدل‌سازی ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی و رفتار شکار گرگ‌ها به‌منظور طراحی GWO تشریح شده است [۳۶].

۲-۱-۱- سلسله‌مراتب اجتماعی

گرگ خاکستری از خانواده کانید است. گرگ‌های خاکستری به‌عنوان شکارچیان رأس در نظر گرفته می‌شوند، به این معنی که در بالای زنجیره غذایی قرار دارند و بیشتر ترجیح می‌دهند که در یک گله زندگی کنند. جالب‌توجه این است که آن‌ها یک سلسله‌مراتب اجتماعی غالب از آلفا (α)، بتا (β)، دلتا (δ) تا امگا (ω) دارند. به‌منظور مدل‌سازی ریاضی سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری هنگام طراحی GWO، مناسب‌ترین راه‌حل به‌عنوان آلفا (α) در نظر گرفته می‌شود. همچنین، دومین و سومین راه‌حل برتر به ترتیب بتا (β) و دلتا (δ) نام‌گذاری می‌شوند. بقیه راه‌حل‌های کاندید به‌عنوان امگا (ω) فرض می‌شوند. در الگوریتم GWO، شکار (بهینه‌سازی) توسط α ، β و δ هدایت شده و گرگ‌های ω از این سه گرگ پیروی می‌کنند.

۲-۱-۲- احاطه کردن طعمه

علاوه بر سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری که در مرحله قبل توضیح داده شد، شکار گروهی یکی دیگر از رفتارهای اجتماعی جالب گرگ‌های خاکستری است. مراحل اصلی شکار گرگ خاکستری شامل (۱) ردیابی، تعقیب، و نزدیک شدن به طعمه. (۲) محاصره کردن، تعقیب و آزار شکار تا زمانی که از حرکت باز بماند و (۳) حمله به سمت طعمه است. به‌منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار محاصره‌ای، معادلات زیر پیشنهاد شده است [۳۶]:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

که t نشان‌دهنده تکرار فعلی، \vec{A} و \vec{C} بردارهای ضرایب، \vec{X}_p بردار موقعیت شکار (طعمه) و \vec{X} بردار موقعیت گرگ خاکستری است. بردارهای \vec{A} و \vec{C} به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

مکانیزم همرسی و انتشار ترک مربوط به یک پل سنگ تحت شرایط باربرداری پرداختند. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان‌دهنده ۳ الگوی شکست برشی، کششی و ترکیبی (برشی-کششی) در نمونه‌ها بود. به‌علاوه یافته‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب درزه‌ها الگوی شکست به‌مرور از مود برشی به مود کششی و درنهایت به مود ترکیبی تبدیل می‌شود.

با توجه به اینکه در اکثر مطالعات قبلی تأثیر پیکربندی، طول و جهت‌گیری پل سنگ، جهت‌گیری درزه و فاصله بین ردیف‌های درزه بر مکانیزم‌های رشد، انتشار و همرسی ترک در ناحیه پل تحت آزمایش برش مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته و اثرات هم‌زمان تنش‌های نرمال، خواص مکانیکی مواد مدل و نسبت طول درزه به طول پل بر الگو و میزان تنش لازم برای همرسی ترک بررسی نشده است و همچنین از آنجایی که استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان تنش‌های نرمال، خواص مکانیکی مواد مدل و نسبت طول درزه به طول پل بر همرسی ترک دشوار است، بنابراین در این مقاله با توجه به نتایج ۴۵۰ آزمایش برش مستقیم، از الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری و برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی اثرات هم‌زمان تنش‌های نرمال، خواص مکانیکی مواد مدل و نسبت طول درزه به طول پل بر الگو و تنش همرسی ترک^۹ (CCS) در درزه‌های ناممتد استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به معرفی و نحوه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌ساز گرگ خاکستری و برنامه‌ریزی بیان ژن به‌منظور پیش‌بینی تنش همرسی ترک پرداخته می‌شود.

۲-۱- الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری^۹

ایده تقلید از سلسله‌مراتب رهبری اجتماعی و رفتار شکار گرگ‌های خاکستری در مسائل بهینه‌سازی منجر به تکنیک بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) شده است [۳۶]. الگوریتم GWO که یک تازه وارد در میان الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوش ازدحامی مبتنی بر جمعیت است، دارای چندین مزیت جذاب از جمله سادگی، انعطاف‌پذیری، مکانیسم بدون مشتق، و اجتناب از بهینه محلی است. همچنین، اجرای این الگوریتم آسان بوده و پارامترهای کنترلی کمتری برای تنظیم داشته و مشخصه همگرایی

را مطابق با موقعیت بهترین عوامل جستجو بروز رسانی کنند. بدین منظور، فرمول‌های زیر پیشنهاد شده‌اند [۳۶]:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (6)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

به‌طور خلاصه، فرآیند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی از گرگ‌های خاکستری (راه‌حل‌های کاندید) در الگوریتم GWO شروع می‌شود. در طی تکرارها، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا موقعیت احتمالی طعمه را تخمین می‌زنند. هر راه‌حل کاندید فاصله خود را از طعمه به‌روزرسانی می‌کند. پارامتر a از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد تا به ترتیب بر اکتشاف و بهره‌برداری تأکید شود. وقتی $|A| \geq 1$ راه‌حل‌های کاندید از طعمه واگرا می‌شوند و وقتی $|A| < 1$ به سمت طعمه همگرا می‌شوند. در نهایت، الگوریتم GWO با ارضای یک معیار نهایی خاتمه می‌یابد. الگوریتم GWO فقط یک پارامتر اصلی (a) دارد که باید تنظیم شود. مقادیر تطبیقی پارامترهای a و A به GWO اجازه می‌دهد به آرامی بین اکتشاف و بهره‌برداری جابه‌جا شود. بنابراین، اکتشاف و بهره‌برداری توسط مقادیر تطبیقی a و A تضمین می‌شود. با کاهش A ، نیمی از تکرارها به اکتشاف ($|A| \geq 1$) و نیمی دیگر به بهره‌برداری ($|A| < 1$) اختصاص می‌یابد. مراحل مدل‌سازی الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری در شکل ۲ داده شده است و این الگوریتم تا رسیدن به معیار توقف جهت دستیابی به جواب بهینه تکرار می‌شود [۳۷].

۲-۲- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن^{۱۰}

الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا فرمولبندی و معرفی شد [۳۸]. نخستین گام در الگوریتم بیان ژن (GEP)، تشکیل جمعیت اولیه از راه‌حل‌هاست. سپس کروموزوم‌ها با بیان درختی (ETs) به نمایش در می‌آیند. در گام بعد، باید سازگاری یا کارایی هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها به وسیله تابع برازش ارزیابی شود. گرچه در تحلیل مسئله‌ها با GEP به دانستن دقیق ساختار ریاضی مسئله‌ها نیازی نیست، اما باید میزان مطلوب بودن

مؤلفه‌های \vec{a} از ۲ تا ۰ در طول تکرارها به‌طور خطی کاهش می‌یابند و \vec{T}_1 و \vec{T}_2 بردارهای تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند.

۲-۱-۳- جستجوی طعمه (اکتشاف)

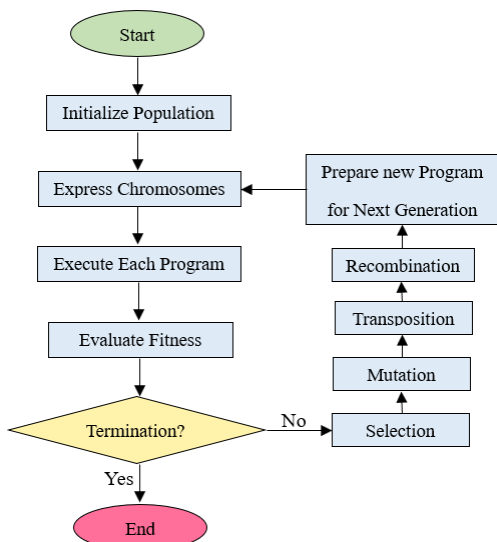
گرگ‌های خاکستری بیشتر بر اساس موقعیت آلفا، بتا و دلتا جستجو می‌کنند. آن‌ها برای جستجوی طعمه از یکدیگر جدا شده و برای حمله به طعمه همگرا می‌شوند. به‌منظور مدل‌سازی ریاضی واگرایی، A با مقادیر تصادفی بزرگ‌تر از ۱ یا کمتر از ۱- استفاده می‌شود تا عامل جستجو را وادار به واگرایی از طعمه کند. این کار بر اکتشاف تأکید می‌کند و این اجازه را به GWO می‌دهد تا در سطح جهانی جستجو نماید. یعنی، $|A| \geq 1$ گرگ‌های خاکستری را مجبور می‌کند تا از طعمه جدا شده و شکار مناسب‌تری پیدا کنند. یکی دیگر از اجزای GWO که به کاوش کمک می‌کند، C است. بردار C حاوی مقادیر تصادفی در بازه $[0, 2]$ است. این مؤلفه وزن‌های تصادفی را برای طعمه به‌منظور تأکید تصادفی ($C \geq 1$) یا تأکید کمتر ($C < 1$) بر تأثیر طعمه در تعریف فاصله در معادله (۳) فراهم می‌کند. این به GWO برای نشان دادن یک رفتار تصادفی‌تر در طول بهینه‌سازی، اکتشاف و اجتناب از نقطه بهینه محلی کمک می‌کند. شایان‌ذکر است که C در مقایسه با A به‌صورت خطی کاهش نمی‌یابد. GWO عمدتاً به C نیاز دارد تا مقادیر تصادفی را در همه زمان‌ها ارائه کند تا بر اکتشاف و بهره‌برداری نه‌تنها در طول تکرارهای اولیه، بلکه در تکرارهای نهایی تأکید شود. این مؤلفه در رابطه با رکود نقاط بهینه محلی به‌ویژه در تکرارهای نهایی بسیار مفید است.

۲-۱-۴- حمله به طعمه (استثمار)

به‌منظور مدل‌سازی ریاضی نزدیک‌شدن به طعمه، مقدار a به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. بنابراین A یک مقدار تصادفی در بازه $[-a, a]$ است. هنگامی که مقادیر تصادفی A در بازه $[-1, 1]$ ($|A| < 1$) باشد، GWO گرگ‌ها را مجبور می‌کند به سمت طعمه حمله کنند.

۲-۱-۵- شکار

به‌منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، سه راه‌حل اول (آلفا، بتا و دلتا) که تاکنون بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده هستند، ذخیره می‌شوند و سایر عوامل جستجو (از جمله آمگا) را موظف می‌کنند تا موقعیت‌های خود



شکل ۳: فلوجارت مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم GEP [۴۰].

۳- تست‌های آزمایشگاهی برش مستقیم

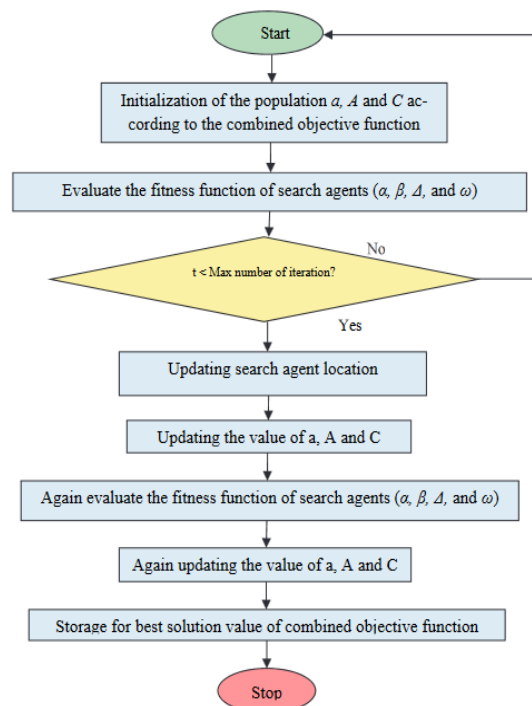
به‌منظور پیش‌بینی مود شکست و میزان تنش هم‌رسی ترک (CCS) در نمونه‌های دارای درزه‌های ناممتد تحت شرایط آزمایش برش مستقیم، فاکتورهای تأثیرگذار بر مود شکست باید تعیین شوند. به‌منظور نیل به این هدف، در این مطالعه ابتدا ۴۵۰ آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های با ابعاد $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ساخته‌شده از ترکیب گچ و سیمان دارای درزه‌های ناممتد انجام شد. شکل‌های ۴a تا ۴d برخی از نمونه‌های مورد استفاده جهت اجرای آزمایش برش مستقیم با دو نوع پل سنگ ممتد و ناممتد را نشان می‌دهند. ۴ ترکیب با درصد‌های گچ و سیمان مختلف برای ساخت نمونه‌ها استفاده شدند که خصوصیات مکانیکی نمونه‌های مربوط به هر ترکیب در جدول ۱ گزارش شده است. نحوه اجرای آزمایش برش مستقیم به این صورت بود که برای هر نوع نمونه با خصوصیات مکانیکی مشخص، تنش نرمال در ابتدا 3 kg/cm^2 در نظر گرفته شد و سپس مقدار آن به‌مرور تا رسیدن به نصف مقاومت فشاری نمونه با گام 3 kg/cm^2 افزایش یافت. همچنین به ازای یک مقدار تنش نرمال ثابت اعمالی به یک نوع نمونه، مقدار ضریب درزه‌داری ابتدا 0.05 بوده و سپس با گام 0.1 تا رسیدن به مقدار نهایی 0.95 افزایش یافت. آزمایش‌ها به‌گونه‌ای انجام شدند که ابتدا تنش نرمال به نمونه اعمال شد و سپس بار برشی اتخاذ گردید. بارگذاری با استفاده از کنترل جابجایی با نرخ 0.102 mm/s انجام شد. مشاهدات بیانگر آن است که در حالت کلی، ۳ مود اصلی به هم پیوستن ترک شامل مود

جواب‌های بالقوه مسئله و میزان سازگاری آن‌ها را به روشی مشخص نمود و با حذف جواب‌های ضعیف‌تر و حفظ جواب‌های سازگارتر، به پاسخ بهینه مسئله نزدیک شد [۳۹]. در پدیده تکامل و در نظام انتخاب طبیعی این نقش بر عهده طبیعت است که پاسخ سازگارتر را بر دیگر جواب‌ها ترجیح دهد. مراحل مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم بیان ژن در شکل ۳ نشان داده شده است [۴۰]. در سیستم GEP معیارهای توقف به شرح زیر است [۳۹]:

معیار دستیابی به هدف: عدم ملاحظه تفاوت محسوس بین پاسخ‌های بهینه طی چند نسل، می‌تواند معیاری برای دستیابی به پاسخ بهینه باشد.

معیار تکرار: چنان‌چه بعد از تعداد نسل معین، پاسخ بهینه به دست آید، فرآیند تولید نسل متوقف خواهد شد.

معیار زمان: اگر پس از گذشت زمان معینی، در بهترین جواب حاصل از تولید نسل بهبودی حاصل نشود، محاسبات متوقف خواهد شد.



شکل ۲: فلوجارت مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم GWO [۳۷].

توجه به مقدار تنش‌های لازم هر مود (τ_{I-II} و τ_{II} ، τ_I) در مکانیزم همرسی ترک و درصد تأثیر آن‌ها (α ، β و γ) در این فرآیند، مقدار تنش همرسی ترک با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه گردید.

$$\tau_I = \sigma_t + \sigma_n \tan \varphi \quad (۸)$$

$$\tau_{II} = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (۹)$$

$$\tau_{I-II} = (\tau_I + \tau_{II})/2 \quad (۱۰)$$

$$CCS = \alpha \tau_I + \beta \tau_{II} + \gamma \tau_{I-II}; \quad \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (۱۱)$$

در روابط فوق σ_t مقاومت کششی و C مقاومت چسبندگی می‌باشند. همچنین α ، β و γ به ترتیب درصد تأثیر مودهای کششی (I)، برشی (II) و ترکیبی (I-II) در فرآیند همرسی ترک در نمونه‌های مورد آزمایش می‌باشند. در ادامه ۸ پارامتر ورودی تأثیرگذار بر مقدار تنش همرسی ترک از جمله: ضریب درزه‌داری (JC)، تنش نرمال (σ_n)، مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c)، مقاومت کششی (σ_t)، نسبت پواسون (ν)، مدول الاستیسیته (E)، مقاومت چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) بر اساس نتایج ۴۵۰ آزمایش تست برش مستقیم به‌منظور پیاده‌سازی ۲ روش GWO و GEP، مورد استفاده قرار گرفت.

۵- پیش‌بینی تنش همرسی ترک

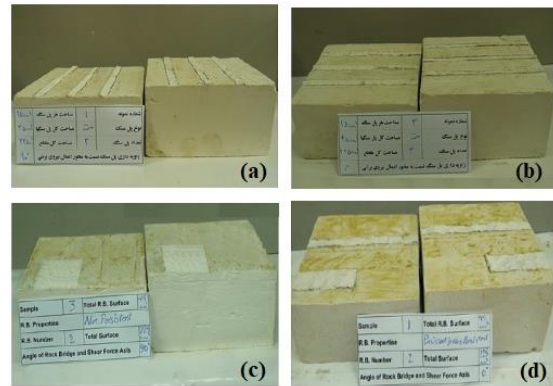
۵-۱- الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری

در این مرحله ۸۰ درصد داده‌ها (۳۶۰ دسته داده) به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد دیگر (۹۰ دسته داده) دیگر که به‌صورت تصادفی توسط الگوریتم انتخاب شدند) به‌عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شدند. با انتخاب مقادیر متفاوت پارامترهای اندازه جمعیت^{۱۱} و تعداد تکرارها^{۱۲} مدل‌های مختلفی اجرا و درنهایت مدل بهینه GWO به ازای مقادیر به ترتیب ۱۵ و ۵۰ برای پارامترهای مذکور، به دست آمد.

۵-۲- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

در این بخش هدف دستیابی به یک مدل بهینه برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای پیش‌بینی تنش همرسی ترک است. بر اساس داده‌های مراحل آموزش (۳۶۰ دسته

کششی باله‌ای (نوع I)، مود برشی (نوع II) و مود ترکیبی کششی-برشی (نوع I-II) در نمونه‌های تحت آزمایش وجود دارد. به‌علاوه نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که خصوصیات مکانیکی مواد، تنش نرمال و ضریب درزه‌داری (JC) بر مود و تنش همرسی ترک‌های ایجادشده در نمونه‌ها تأثیرگذارند، به‌گونه‌ای که با افزایش ضریب درزه‌داری (JC) مود شکست پل سنگ از حالت برشی به کششی تغییر می‌کند.



شکل ۴: برخی از نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش برش مستقیم با پل سنگ‌های از نوع (a و b) ممتد و (c و d) ناممتد [۱].

همچنین، با افزایش تنش نرمال مود شکست پل سنگ از حالت کششی به برشی تغییر می‌کند. شرح و درصد هر مود در پروسه شکست و همرسی ترک در نمونه‌ها برای مقادیر مختلف پارامترهای JC، σ_n و σ_c در جدول ۲ آورده شده است.

۴- استخراج مقادیر تنش همرسی ترک از نتایج آزمایش برش مستقیم

هدف اصلی این تحقیق پیش‌بینی تنش همرسی ترک (CCS) ایجادشده در نمونه‌های تحت آزمایش برش مستقیم، با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) است. برای نیل به این هدف، ابتدا باید مقدار تنش همرسی ترک‌ها در هر آزمایش را به دست آورد. از طرفی تأثیر خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها، تنش نرمال و ضریب درزه‌داری بر مقدار تنش همرسی ترک‌ها، به‌صورت درصدی از تنش‌های برشی لازم جهت ایجاد مودهای شکست ممکن در نمونه، ظاهر می‌شوند. بنابراین برای تعیین مقدار تنش همرسی ترک‌ها، ابتدا تنش‌های برشی لازم برای ایجاد مودهای سه‌گانه شکست با استفاده از روابط (۸)، (۹) و (۱۰) به دست آمد و درنهایت با

حسابی (×، +، - و /) از توابع ریاضی نیز برای برآورد مدل استفاده می‌شود دقت و کارایی مدل با توجه به شاخص‌های R^2 و RMSE نسبت به حالاتی که فقط از عملگرهای حسابی استفاده می‌شود، کاهش می‌یابد. در نتیجه، مدلی با پارامترهای گزارش شده در جدول ۳ به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

داده) و تست (۹۰ دسته داده) با استفاده از نرم‌افزار GeneXproTools 5، تعداد زیادی مدل GEP با پارامترها و مجموعه توابع مختلف برای توسعه بهترین مدل با در نظر گرفتن شاخص جذر میانگین مربعات خطا^{۱۳} (RMSE) به عنوان تابع برازندگی، اجرا شدند. نتایج مدل‌های مختلف اجرا شده نشان داد در حالت‌هایی که علاوه بر عملگرهای

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی نمونه‌های ساخته شده بر اساس ۴ ترکیب مختلف مواد [۱]

نمونه‌ها	خصوصیات مکانیکی	σ_c (kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ν (-)	C (kg/cm ²)	ϕ (radian)
نوع ۱		۴۰	۵	۶۸۹۵	۰/۱۴	۱۴	۰/۵۵
نوع ۲		۶۰	۷/۵	۱۰۲۹۵	۰/۱۵	۱۸/۵	۰/۶۵
نوع ۳		۸۰	۹/۷	۱۳۶۹۵	۰/۱۶	۲۵	۰/۷۱
نوع ۴		۱۰۰	۱۲	۱۷۰۹۵	۰/۱۷	۳۴	۰/۷۸

جدول ۲: درصد مودهای II-I و I-II در فرآیند به هم پیوستن ترک در نمونه‌های برای مقادیر مختلف پارامترهای JC و σ_c [۱]

JC	$\sigma_n \leq (\sigma_c/6)$			$(\sigma_c/6) \leq \sigma_n \leq (\sigma_c/4)$			$(\sigma_c/4) \leq \sigma_n \leq (\sigma_c/2)$		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
۰/۰۵	۰	۰	۱۰۰	۰	۲۵	۷۵	۰	۱۰۰	۰
۰/۱۵	۰	۰	۱۰۰	۰	۱۲/۵	۸۷/۵	۰	۱۰۰	۰
۰/۲۵	۲۸/۵۷		۷۱/۴۳	۰	۱۲/۵	۸۷/۵	۰	۰	۴/۵۴
۰/۳۵	۵۰	۵۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۹۰/۹۱	۹۰/۹۱	۰
۰/۴۵	۷۸/۵	۰	۲۱/۵	۰	۰	۱۰۰	۹۰/۹۱	۹۰/۹۱	۰
۰/۵۵	۱۰۰	۰	۰	۳۷/۵	۰	۶۲/۵	۸۶/۳۶	۱۳/۶۴	۰
۰/۶۵	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۲۲/۷۲	۷۲/۷۳	۴/۵۵
۰/۷۵	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۶۳/۳۶	۰	۳۶/۶۴
۰/۸۵	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۵۴/۵۵	۰	۴۵/۴۵
۰/۹۵	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۹۵/۴۵	۰	۴/۵۵

جدول ۳: پارامترهای بهینه استفاده شده در مدل سازی GEP

مقدار	پارامترهای الگوریتم بیان ژن
۷۱	تعداد نسل‌ها
/, ×, -, +	مجموعه توابع
۴۰	تعداد کروموزوم‌ها
۸	اندازه سر
۶	تعداد ژن‌ها
جمع	تابع اتصال
۰/۰۰۱۳۸	نرخ جهش
۰/۰۰۵۴۶	نرخ وارونگی
۰/۰۰۲۷۷	نرخ ترکیب مجدد یک نقطه‌ای ^{۱۴}
۰/۰۰۲۷۷	نرخ ترکیب مجدد دونقطه‌ای ^{۱۵}
۰/۲۷	نرخ ترکیب مجدد ژن ^{۱۶}
۰/۲۷	نرخ انتقال ژن ^{۱۷}

در نهایت بر اساس نمودارهای بیان درختی خروجی از نرم‌افزار، رابطه (۱۲) جهت پیش‌بینی تنش هم‌رسی (CCS) ترک به صورت زیر توسعه داد شد:

$$\begin{aligned}
 CCS &= (\sigma_t + 7.554)\phi - \frac{(v + 0.71)}{(v - 3.55)} \\
 &+ \sigma_n [1 + 115.9v(\sigma_c - 8.88)/\sigma_c] \\
 &+ (\sigma_t - 4.344) - JC(\sigma_t + \phi + 3.583) \\
 &+ \left(\frac{\sigma_t - \sigma_c}{E + C - v - 4.185} \right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

سایر پارامترهای رابطه (۱۲) قبلاً تشریح شده‌اند.

۶- مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه‌شده

به منظور مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه‌شده بر مبنای الگوریتم‌های بهینه‌ساز گرگ خاکستری و برنامه‌ریزی بیان ژن، از ۳ شاخص ارزیابی ضریب تعیین R^2 ، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق میانگین MAE استفاده شد. مقدار R^2 بین صفر و ۱ قرار دارد. مقادیر RMSE و MAE همواره بزرگ‌تر یا مساوی صفر هستند. با نزدیک شدن مقادیر شاخص‌های R^2 ، RMSE و MAE به ترتیب به ۱، صفر و صفر دقت مدل‌ها افزایش می‌یابد. مقادیر شاخص‌های فوق را می‌توان با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۵) به دست آورد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i')^2} \quad (14)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - y_i'|}{N} \quad (15)$$

در روابط فوق y_i و y_i' به ترتیب مقادیر تنش همرسی ترک واقعی و پیش‌بینی شده و \bar{y} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تنش‌های همرسی هستند. همچنین N بیانگر تعداد دسته داده‌ها است.

با اعمال روابط (۱۳) تا (۱۵) بر داده‌های مرحله آموزش و تست مقادیر این شاخص‌ها برای دو روش GEP و GWO مطابق جدول ۴ به دست آمد. در شکل‌های ۵ و ۶ نتایج تنش همرسی ترک پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها با استفاده از روش GWO به ترتیب برای داده‌های آموزش و تست به تصویر کشیده شده‌اند.

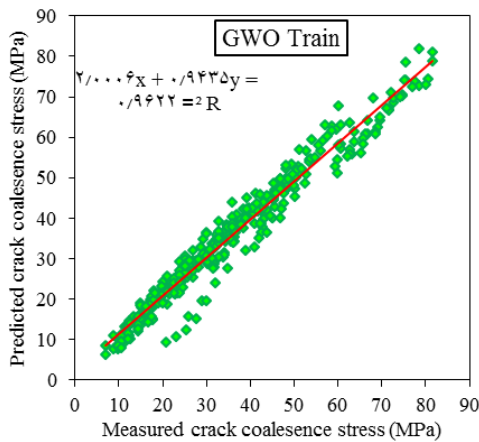
جدول ۴: مقادیر شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده در مراحل آموزش و تست برای مدل‌های GEP و GWO.

شاخص آماری	مرحله آموزش		مرحله تست	
	GEP	GWO	GEP	GWO
R2	۰٫۹۳۸	۰٫۹۶۲	۰٫۹۸۱	۰٫۹۹۶
RMSE	۴٫۵۳	۳٫۴۷	۳٫۳۵	۱٫۳۵
MAE	۳٫۴۱	۲٫۶۳	۲٫۷۹	۱٫۰۸

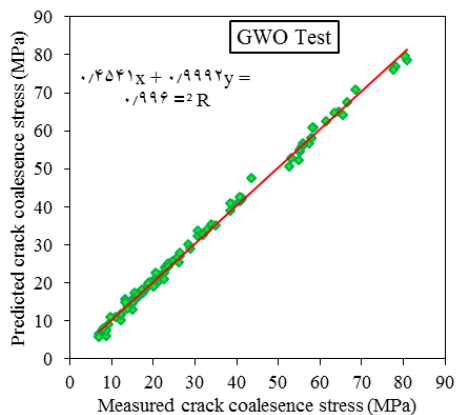
شکل‌های ۷ و ۸ نیز نتایج مذکور بر اساس داده‌های مراحل تست و آموزش را برای روش GEP نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸ و ردیف اول جدول ۴، بر اساس

شاخص R^2 می‌توان اظهار نمود که الگوریتم GWO با قابلیت اطمینان بالاتر و دقت بیشتری نسبت به روش GEP توانسته است تنش همرسی ترک را پیش‌بینی نماید. به علاوه، مطابق جدول ۴ مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE به‌دست‌آمده برای الگوریتم GWO در هر دو مرحله آموزش و تست در مقایسه با مقادیر متناظر آن‌ها برای روش GEP بسیار کمتر بوده و به صفر نزدیک‌تر می‌باشند که نشان‌دهنده خطای کمتر الگوریتم GWO و دقت و کارایی بالاتر آن نسبت به روش GEP است. با این حال، دقت هر دو روش در پیش‌بینی تنش همرسی ترک بالا بوده و اختلاف کمی باهم دارند.

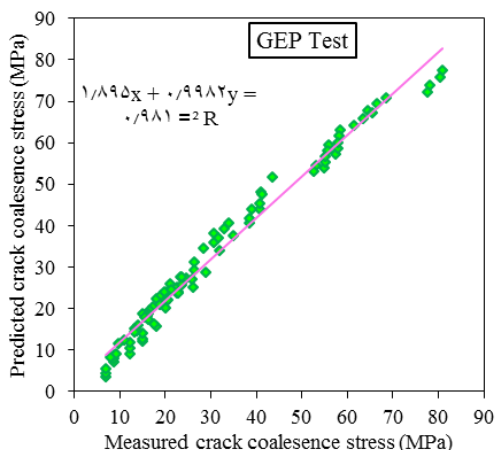
در شکل ۹ مقایسه‌ای بین مقادیر واقعی تنش همرسی ترک و مقادیر پیش‌بینی‌شده آن‌ها با استفاده از روش‌های GEP و GWO برای داده‌های تست صورت گرفته که نشان‌دهنده دقت بالای هر دو روش است، با این حال دقت پیش‌بینی روش GWO نسبت به GEP بالاتر است؛ بنابراین، می‌توان اظهار نمود الگوریتم‌های بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) می‌توانند به‌عنوان ابزارهای مناسبی برای پیش‌بینی تنش همرسی ترک نمونه‌های مکعبی گچی/سیمانی مورد استفاده قرار گیرند.



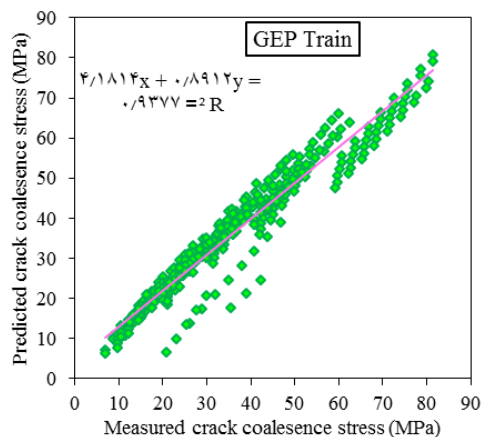
شکل ۵: عملکرد GWO در مرحله آموزش.



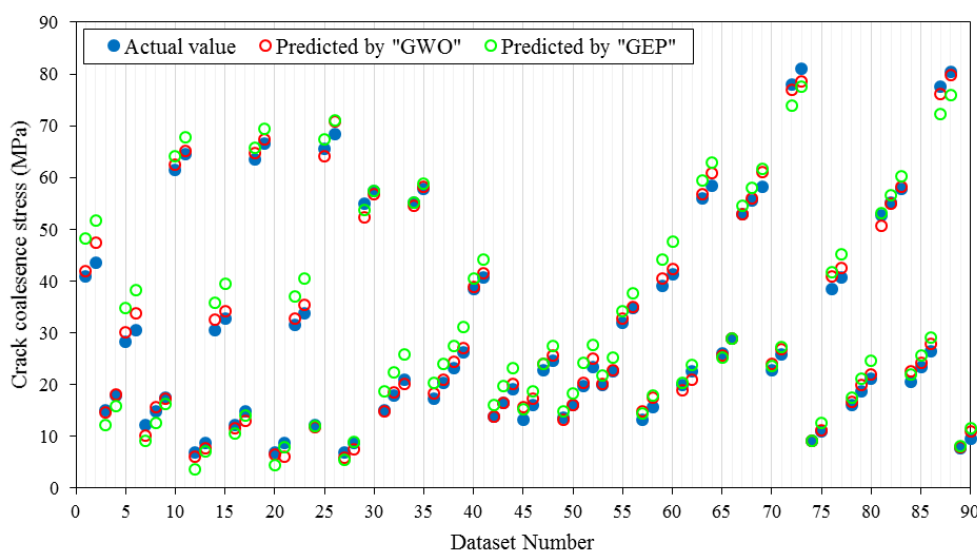
شکل ۶: عملکرد GWO در مرحله تست.



شکل ۸: عملکرد GEP در مرحله تست.

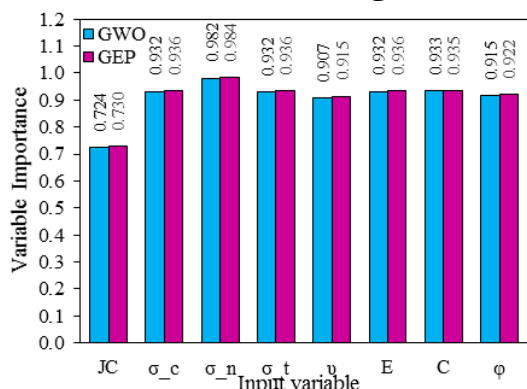


شکل ۷: عملکرد GEP در مرحله آموزش.



شکل ۹: مقادیر تنش همرسی ترک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های GEP و GWO در مرحله تست.

درزه‌داری (JC) به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر مقدار تنش همرسی ترک دارند.



شکل ۱۰: اهمیت متغیرهای ورودی تأثیرگذار بر تنش همرسی ترک در الگوریتم‌های GEP و GWO.

۷- تحلیل اهمیت متغیر

مطالعه پارامتریک معمولاً برای ارزیابی اهمیت و تأثیر متغیرهای ورودی بر روی یک متغیر هدف انجام می‌شود. در این پژوهش، تحلیل اهمیت متغیرهای ورودی الگوریتم GWO و روش GEP بر روی مود ادغام ترک با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 12 در طول توسعه و آزمایش مدل‌ها انجام شده است. بر اساس این تحلیل، مقادیر اهمیت متغیرهای ورودی محاسبه شده و بین ۰ و ۱ مرتب می‌شوند. با استفاده از این روش، مقادیر اهمیت ۸ پارامتر ورودی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی تنش همرسی ترک با استفاده از الگوریتم GWO و روش GEP محاسبه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو روش مدل‌سازی پارامترهای تنش نرمال (σ_n) و ضریب

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به پیش‌بینی تنش همرسی ترک نمونه‌های مکعبی دارای درزه‌های ناممتد ساخته‌شده از گچ و سیمان پرداخته شد. بر اساس نتایج ۴۵۰ آزمایش برش مستقیم و با انتخاب ۸ متغیر به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر تنش همرسی ترک، روش‌های GWO و GEP پیاده‌سازی شدند. در مرحله نخست، ۸۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد دیگر به‌عنوان داده‌های تست به‌منظور اجرای دو روش، مورد استفاده قرار گرفتند. سپس به‌منظور بررسی عملکرد و کارایی مدل‌های مورد استفاده، از ۳ شاخص ارزیابی آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق میانگین (MAD) برای داده‌های آموزش و تست استفاده شد. نتایج مدل‌ها نشان داد که مقادیر R^2 روش‌های GWO و GEP برای داده‌های آموزش به ترتیب ۰/۹۶۲ و ۰/۹۳۸ و برای داده‌های تست به ترتیب ۰/۹۹۶ و ۰/۹۸۱ می‌باشند که بیانگر کارایی و دقت بالاتر روش GWO در مقایسه با GEP است. به‌علاوه، نتایج نشان داد که مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE در هر دو مرحله آموزش و تست برای الگوریتم GWO کمتر از روش GEP می‌باشند که بیانگر خطای کمتر الگوریتم GWO و قابلیت اطمینان و دقت بالاتر آن نسبت به روش GEP است. با این حال، نتایج دو روش پیشنهادی به مقادیر واقعی بسیار نزدیک می‌باشند و می‌توان گفت روش‌های GWO و GEP ابزارهای مناسبی برای پیش‌بینی تنش همرسی ترک هستند. همچنین رابطه‌ای با دقت بالا بر اساس روش GEP برای پیش‌بینی تنش همرسی ترک ارائه شد.

مراجع

- experimental approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 909-924.
- [4] Tang, C. A., Lin, P., Wong, R. H. C., & Chau, K. T. (2001). Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part II: numerical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 925-939.
- [5] Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B., & O'reilly, K. J. (1983, October). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 20, No. 5, pp. 227-236). Pergamon.
- [6] Reyes, O., & Einstein, H. H. (1991, September). Failure mechanisms of fractured rock—a fracture coalescence model. In *7th ISRM Congress*. OnePetro.
- [7] Bobet, A., & Einstein, H. H. (1998). Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7), 863-888.
- [8] Sagong, M., & Bobet, A. (2002). Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 229-241.
- [9] Mughieda, O., & Karasneh, I. (2006). Coalescence of offset rock joints under biaxial loading. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 985-999.
- [10] Lee, H., & Jeon, S. (2011). An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 48(6), 979-999.
- [11] Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., & Moarefvand, P. (2014). Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 20-28.
- [12] Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., & Moarefvand, P. (2014). Cracks coalescence mechanism and cracks propagation paths in rock-like specimens containing pre-existing random cracks under compression. *Journal of Central South University*, 21, 2404-2414.
- [13] Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., & Moarefvand, P. (2014). Investigation of fracturing process of rock-like Brazilian disks containing three parallel cracks under compressive line loading. *Strength of Materials*, 46, 404-416.
- [14] Haeri, H. (2015). Propagation mechanism of neighboring cracks in rock-like cylindrical specimens
- [1] Haeri, H., Sarfarazi, V., & Zhu, Z. (2016). Analysis of crack coalescence in concrete using neural networks. *Strength of Materials*, 48, 850-861.
- [2] Mirzaei, H., Kakaie, R., Jalali, S. M. E., Shariati, M., & Hassani, B. (2010, June). Experimental investigation of crack propagation and coalescence in rock-like materials under uniaxial compression. In *ISRM EUROCK* (pp. ISRM-EUROCK). ISRM.
- [3] Wong, R. H. C., Chau, K. T., Tang, C. A., & Lin, P. (2001). Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part I:

- [25] Gehle, C., & Kutter, H. K. (2003). Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5), 687-700.
- [26] Zhang, H. Q., Zhao, Z. Y., Tang, C. A., & Song, L. (2006). Numerical study of shear behavior of intermittent rock joints with different geometrical parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(5), 802-816.
- [27] Ghazvinian, A., Sarfarazi, V., Schubert, W., & Blumel, M. (2012). A study of the failure mechanism of planar non-persistent open joints using PFC2D. *Rock mechanics and rock engineering*, 45, 677-693.
- [28] Cao, P., Fan, W. C., & Zhang, K. (2013). Experimental Research on Failure Modes of Specimen Containing Non-Coplanar Joints. *Advanced Materials Research*, 779, 332-336.
- [29] Sarfarazi, V., Ghazvinian, A., & Schubert, W. (2016). Numerical simulation of shear behaviour of non-persistent joints under low and high normal loads. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(4), 517-529.
- [30] Sarfarazi, V., Haeri, H., Shemirani, A. B., & Zhu, Z. (2017). Shear behavior of non-persistent joint under high normal load. *Strength of Materials*, 49, 320-334.
- [31] Asadizadeh, M., Moosavi, M., Hossaini, M. F., & Masoumi, H. (2018). Shear strength and cracking process of non-persistent jointed rocks: an extensive experimental investigation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 415-428.
- [32] Lin, H., Ding, X., Yong, R., Xu, W., & Du, S. (2019). Effect of non-persistent joints distribution on shear behavior. *Comptes Rendus Mécanique*, 347(6), 477-489.
- [33] Zhang, Y., Jiang, Y., Asahina, D., & Wang, C. (2020). Experimental and numerical investigation on shear failure behavior of rock-like samples containing multiple non-persistent joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 4717-4744.
- [34] Meng, F., Song, J., Wang, X., Yue, Z., Zhou, X., & Wang, Z. (2022). Mechanical behavior of non-persistent joints with different geometric configurations and roughness in solid rock and concrete material. *Construction and Building Materials*, 337, 127564.
- [35] Guo, Y., Huang, D., & Cen, D. (2024). Crack Propagation and Coalescence Mechanism of a Rock Bridge between a Parallel Fissure Pair in a Direct Shear Test with Unloading Normal Stress. *International Journal of Geomechanics*, 24(1), 04023258.
- under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*, 51(3), 487-496.
- [15] Lee, J., Ha, Y. D., & Hong, J. W. (2017). Crack coalescence morphology in rock-like material under compression. *International Journal of Fracture*, 203, 211-236.
- [16] Asadizadeh, M., Hossaini, M. F., Moosavi, M., Masoumi, H., & Ranjith, P. G. (2019). Mechanical characterization of jointed rock-like material with non-persistent rough joints subjected to uniaxial compression. *Engineering Geology*, 260, 105224.
- [17] Asadizadeh, M., & Rezaei, M. (2019). Surveying the mechanical response of non-persistent jointed slabs subjected to compressive axial loading utilizing GEP approach. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- [18] Chen, M., Yang, S., Pathegama Gamage, R., Yang, W., Yin, P., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2019). Fracture processes of rock-like specimens containing nonpersistent fissures under uniaxial compression. *Energies*, 12(1), 79.
- [19] Li, X., Bai, Y., Chen, X., Zhao, X., & Lv, M. (2021). Experimental and numerical study on crack propagation and coalescence in rock-like materials under compression. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 56(8), 548-562.
- [20] Lin, Q., Cao, P., Wen, G., Meng, J., Cao, R., & Zhao, Z. (2021). Crack coalescence in rock-like specimens with two dissimilar layers and pre-existing double parallel joints under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 139, 104621.
- [21] Zhong, Z., Huang, D., Song, Y., & Cen, D. (2022). Three-dimensional cracking and coalescence of two spatial-deflection joints in rock-like specimens under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 159, 105196.
- [22] Chang, X., Wang, S., Li, Z., & Chang, F. (2022). Cracking behavior of concrete/rock bi-material specimens containing a parallel flaw pair under compression. *Construction and Building Materials*, 360, 129440.
- [23] Niu, Y., Wang, J. G., Wang, X. K., Hu, Y. J., Zhang, J. Z., Zhang, R. R., & Hu, Z. J. (2023). Numerical study on cracking behavior and fracture failure mechanism of flawed rock materials under uniaxial compression. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(6), 2096-2111.
- [24] Lajtai, E. Z. (1969). Strength of discontinuous rocks in direct shear. *Geotechnique*, 19(2), 218-233.

[39] Sabzevari, Y., Nasrollahi, A., Sharifipour, M., & Shahinejad, B. (2022). Application of Multivariate Regression and Gene Expression Programming in Modeling Reference Evapotranspiration (Case Study: Khorramabad Station). *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), 35-48. (In Persian)

[40] Armaghani, D. J., Faradonbeh, R. S., Rezaei, H., Rashid, A. S. A., & Amnieh, H. B. (2018). Settlement prediction of the rock-socketed piles through a new technique based on gene expression programming. *Neural Computing and Applications*, 29, 1115-1125.

[36] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.

[37] Chawla, V., Chanda, A., & Angra, S. (2019). The scheduling of automatic guided vehicles for the workload balancing and travel time minimization in the flexible manufacturing system by the nature-inspired algorithm. *Journal of Project Management*, 4(1), 19-30.

[38] Ferreira, C. (2006). *Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence* (Vol. 21). Springer.

-
- ¹¹. Population size
 - ¹². Number of iterations
 - ¹³. Root Mean Square Error
 - ¹⁴. One-point recombination
 - ¹⁵. Two-point recombination
 - ¹⁶. Gene recombination
 - ¹⁷. Gene transposition
 - ¹⁸. Determination Coefficient
 - ¹⁹. Mean Absolut Error

- ¹. Rock breage
- ². Wing crack
- ³. Secondary crack
- ⁴. Initiation
- ⁵. Propagation
- ⁶. Coalescence
- ⁷. Persistency
- ⁸. Crack coalescence stress (CCS)
- ⁹. Grey wolf optimizer (GWO)
- ¹⁰. Gene expression programming (GEP)