

Gravity retaining wall stability risk analysis based on reliability using fuzzy set theory

Mohammad Mehdi Riyahi¹, Iman Bahrami Chegeni^{2*}

1- Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

ABSTRACT

One-dimensional view of optimized design of engineering systems focusing on costs without considering other aspects such as risk and uncertainty in engineering design can increase risks during the operation of that engineering system. This paper indicates that if there are uncertainties in design parameters this cannot always cause poorly system operation, whereas may strengthen that system operation. For this purpose, a gravity retaining wall is optimized and the optimal dimensions of that retaining wall are calculated. Then the effect of uncertainties, which are in the design parameters of that optimal gravity retaining wall, on the stability factors is calculated. Finally, using the concept of reliability, the risk in the safety factors of the retaining wall is obtained. In this paper, it is shown that if there is 10% uncertainty in design parameters the uncertainty propagation on safety factors is about (-80,+345)%, but this uncertainty propagation can increase the reliability(positive aspect of uncertainty) and risk(negative aspect of uncertainty) with a probability of 98.6039% and 1.3961% respectively. Then using the reliability block diagram, the total amount of reliability and risk for the gravity retaining wall is calculated which are equal to 79.3169 and 20.6830%, respectively. The innovations of this paper can be listed as below: 1) using Self-Adaptive Genetic Algorithm and Many Objective Genetic Algorithm, which have been used to optimize the retaining wall and calculate the uncertainty propagation on safety factors respectively. 2) Calculating reliability and risk using fuzzy set theory.3) using reliability block diagram (RBD) to calculate the overall reliability and risk.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 December 2021

Revise Date: 01 April 2022

Accept Date: 29 April 2022

Keywords:

Retaining wall
Optimization
Uncertainty
Fuzzy set theory
Reliability
Risk

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321521.2675>

*Corresponding author: Iman Bahrami Chegeni.

Email address: Bahrami.i@lu.ac.ir

تجزیه و تحلیل ریسک پایداری دیوار حائل وزنی بر مبنای اعتمادپذیری با استفاده از تئوری مجموعه فازی

محمد مهدی ریاحی^۱، ایمان بهرامی چگنی^{۲*}

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- مریبی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

نگاه تک بعدی به مسئله‌ی بهینه سازی و در نظر نگرفتن سایر جنبه‌ها از جمله ریسک و عدم قطعیت در طراحی‌های مهندسی ممکن است باعث ایجاد خطراتی در حین بهره برداری از آن سیستم مهندسی شود. در این مقاله به بررسی تاثیر عدم قطعیت و ریسک بر روی ضرایب اطمینان دیوار حائل وزنی پرداخته شده است. در این مقاله نشان داده شده است که وجود عدم قطعیت در پارامترهای طراحی همیشه باعث عملکرد نامطلوب سیستم نمی‌شود بلکه ممکن است در جهت تقویت آن سیستم مهندسی نیز عمل کند. بدین منظور یک مثال از دیوار حائل وزنی زده شده است و در ابتدا با استفاده از بهینه سازی، ابعاد بهینه محاسبه و سپس با استفاده از تئوری مجموعه فازی، تاثیر عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی بر پایداری دیوار حائل وزنی بهینه شده نشان داده شده است. در انتها نیز با استفاده از مفهوم اعتمادپذیری، ریسک موجود در ضرایب اطمینان دیوار حائل وزنی به دست آمده است در این مقاله نشان داده شده است که با وجود $\pm 10\%$ درصد عدم قطعیت در پارامترهای طراحی، ممکن است تا $(+345, -80)\%$ عدم قطعیت در ضریب اطمینان ایجاد شود اما این عدم قطعیت باعث افزایش اعتماد پذیری به میزان $98,6039\%$ درصد و باعث ایجاد ریسک با احتمال $1,3961\%$ درصد می‌شود. در انتها نیز با استفاده از بلوک دیاگرام اعتماد پذیری مقدار اعتماد پذیری و ریسک کل برای دیوار حائل وزنی به ترتیب برابر با $79,3169\%$ و $20,6830\%$ درصد محاسبه شده است. استفاده از الگوریتم‌های *Self-Adaptive Genetic Algorithm* و *Many Objective Genetic Algorithm* که به ترتیب برای بهینه‌سازی دیوارحائل وزنی و محاسبه‌ی مقادیر حداقل و حداکثر ضرایب اطمینان استفاده شده است و همچنین محاسبه‌ی اعتمادپذیری و ریسک با استفاده از تئوری مجموعه فازی و استفاده از بلوک دیاگرام اعتماد پذیری برای محاسبه‌ی اعتماد پذیری و ریسک کل از نوآوری‌های مقاله‌ی حاضر می‌باشد.

کلمات کلیدی: دیوار حائل، بهینه سازی، عدم قطعیت، تئوری مجموعه فازی، اعتمادپذیری، ریسک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321521.2675	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.321521.2675	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۰۲/۰۹	۱۴۰۱/۰۲/۰۹	۱۴۰۱/۰۱/۱۲	۱۴۰۰/۱۰/۰۵
				نویسنده مسئول: ایمان بهرامی چگنی Bahrami.i@lu.ac.ir		پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

دیوار حائل، یک سازه‌ی مهم در مقابله با فشار و بار جانبی است که می‌تواند در حفظ و نگهداری خاک و سایر مصالح ریزشی مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین نیروی وارده بر دیوارهای حائل، نیروی فشار جانبی خاک می‌باشد که باعث خم شدن، واژگونی و لغزش دیوار حائل می‌گردد. [۱] دیوارهای حائل دائم برای عمر حداقل ۵۰ سال و دیوارهای حائل موقت برای حداقل عمر ۵ سال طراحی می‌شوند. [۲] دیوارهای حائل از جمله سازه‌های پر کاربرد در پروژه‌هایی مانند: راه سازی، پل سازی، محوطه سازی، ساختمان سازی می‌باشند. به طور کلی در قسمت‌هایی که جدار قائم قسمت خاک برداری شده نیاز به تکیه‌گاه قائم داشته باشد می‌توان از دیوارهای حائل استفاده کرد. بر حسب هندسه و مصالح مورد استفاده دیوارهای حائل دارای انواع زیر می‌باشند. [۳]

۱. دیوار حائل وزنی: از بتن ساده (غیر مسلح) و یا مصالح بنایی (به خصوص سنگ با ملات سیمان) ساخته می‌شوند. پایداری این دیوارها در درجه اول بستگی به وزن آنها دارد.

۲. دیوار حائل طره ای: از بتن مسلح ساخته می‌شوند و متشکل از دیوار تیغه و دال پایه می‌باشند. دال پایه از دو جزء ساخته شده است که شامل پاشنه و پنجه می‌باشد. هر دو جزء مانند یک دال طره ای یک طرفه عمل می‌کنند.

۳. دیوار های حائل پشت بند دار: مشابه دیوارهای حائل طره‌ای هستند با این تفاوت که در فواصل منظم دارای پشت بندهایی عمود بر دیوار تیغه می‌باشند.

از آنجا که هزینه مواد و مصالح مصرفی یکی از عوامل اصلی در ساخت و ساز می‌باشد کاهش آن با استفاده از کمینه کردن وزن یا حجم یک سیستم سازه ای، یک فرآیند مطلوب است. برای طراحی دیوار حائل باید ابعاد اولیه آن حدس زده شود. سپس با انجام کنترل‌های پایداری، ابعاد دیوار آنقدر تغییر می‌یابند تا شرایط مناسب آیین‌نامه‌ای تامین شود. در کل پارامترهای طراحی و تصمیم‌های نهایی بر اساس تجربه و قضاوت مهندسين سازه انجام می‌گیرد. همین مسئله باعث عامل به وجود آمدن عدم قطعیت در نتایج تحلیل و طراحی‌ها است. عدم قطعیت انواع مختلفی دارد که به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. [۴]: (۱) ذاتی (۲) شناختی. عدم قطعیت شناختی که بر پایه عدم شناخت از اطلاعات اساسی و پارامترهای طراحی است، نقش مهمی را در مسائل مهندسی ایفا می‌کند. از این رو در طراحی های مهندسی توجه به عدم قطعیت کاملاً ضروری است. در طراحی دیوار های حائل نیز پارامترهایی در ابتدا فرض می‌شوند مانند: زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص خاک، وزن مخصوص بتن و ... که طراحی بر اساس آنها انجام می‌گیرد. این پارامترهای فرض شده برای طراحی که به اصطلاح مقادیر "کریسپ"^۱ نامیده می‌شوند، شکنندگی آنها بسیار زیاد است و اگر دست خوش تغییرات قرار گیرند باعث به وجود آمدن تغییراتی در دیوار حائل می‌شوند که حتی ممکن است ضرایب اطمینان از محدوده مجاز خارج شوند و سازه ناپایدار گردد.

دلیل شکنندگی این پارامترها کمبود اطلاعات، فقدان اندازه‌گیری‌های دقیق و ذات تصادفی که بعضی از این پارامترها دارند، می‌باشد. در نتیجه طراحی دیوار حائل بر اساس آیین‌نامه‌های رایج دارای عدم قطعیت‌هایی است که مدل‌های ریاضی برگرفته شده از این آیین‌نامه‌ها قادر به محاسبه‌ی آنها نمی‌باشند. هم‌چنین وارد کردن این عدم قطعیت‌ها در مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های رایج و مرسوم، به آسانی امکان پذیر نیست. برای نشان دادن تاثیر این عدم قطعیت‌ها به مدل‌های پیچیده‌ای نیاز است. روش‌های مورد استفاده در تحلیل مسائل عدم قطعیت با یکدیگر متفاوت می‌باشند که از مدل‌های ساده به مدل‌های هوشمند و پیچیده تغییر رویه داده‌اند. علاوه بر مشخص کردن منابع عدم قطعیت، در چگونگی اعمال آنها در معادلات حاکم نیز موضوعات مختلفی وجود دارد. [۵] برای یک مدت طولانی، تئوری آمار و احتمال رویکرد غالب برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌ها بود. روش شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از روش‌های محبوب برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در سیستم‌های مهندسی است. روش جایگزین برای روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده از نظریه مجموعه فازی و منطق فازی است که در ابتدا توسط لطفی زاده معرفی شد. [۶] اصول تئوری آن نیز توسط لطفی زاده و همکارانش و

¹ Crisp

همچنین توسط ممدانی و اصلانی [۷]، ممرانی [۸]، بیت و همکاران [۹] گسترش داده شد. نظریه مجموعه فازی ابتدا برای گسترش منطق دوگانه و نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در نظر گرفته شد. [۱۰] در دهه های اخیر مفهوم فازی به دلیل ریاضیات قدرتمند فازی گسترش یافته است و در حال حاضر، روش فازی می تواند به عنوان روش کلی برای عدم اطمینان در تجزیه و تحلیل سیستم های مهندسی در نظر گرفته شود. [۴]

غزوی و همکاران [۱۱] به کاربرد الگوریتم مورچگان در بهینه سازی دیوارحائل مسلح پرداختند. در این مقاله هدف کاهش هزینه و مصالح استفاده شده در طراحی دیوارحائل مسلح بود که بتواند در برابر فشارهای وارده به پشت دیوار حائل مقاومت کند. کاوه و همکاران [۱۲] به طراحی بهینه دیوارحائل وزنی با توجه به عملکرد لرزه‌ای دیوار حائل پرداختند. در این مقاله برای بهینه‌سازی دیوار حائل از الگوریتم BB-BC (big bang-big crunch) استفاده شد. چارلز کمپ و همکاران [۱۳] با استفاده از الگوریتم BB-BC به بهینه سازی دیوارحائل بتنی پرداختند. از خصوصیات الگوریتم BB-BC ساده بودن این الگوریتم و عدم نیاز به پارامترهای کنترلی زیاد است. در این مقاله هدف کمینه کردن هزینه یا وزن در واحد طول دیوارحائل است به گونه‌ای که قیود مربوط به پایداری، تنش برشی، ممان خمشی و قیود آیین نامه‌ی ACI 318-05 تامین شوند. طلعت اهری [۱۴] با استفاده از Charged System Search Algorithm (CSSA) به بهینه سازی دیوار حائل وزنی پرداخت. این الگوریتم از قوانین Gauss و Coulomb در فیزیک استفاده می کند. برای نشان دادن عملکرد این الگوریتم از مقایسه نتایج این الگوریتم با سایر الگوریتم ها استفاده شده است. در تحقیق بعدی که توسط طلعت اهری و همکاران [۱۵] انجام شد، از الگوریتم CSSA برای بهینه سازی دیوارحائل وزنی و مسلح استفاده شد. لی [۱۶] به بررسی اعتمادپذیری و پایداری دیوار حائل پرداخت. در این تحقیق از روش Interval analysis بدین منظور استفاده گردید. در این مقاله با استفاده از ویژگی‌های منطقه ای دیوار حائل و ویژگی‌های پارامترهای ژئوتکنیکی تاثیرات عدم قطعیت بر روی ضرایب اطمینان دیوار حائل مورد مطالعه قرار گرفت. حقیقی و همکاران [۴] به تحلیل عدم قطعیت سد وزنی با استفاده از مجموعه تئوری فازی پرداختند. در این مقاله برای بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که ۱۰ درصد عدم قطعیت می تواند باعث ایجاد ۳۴۶- تا ۱۴۶+ عدم قطعیت در فاکتورهای ایمنی پایداری سد وزنی شود. حقیقی و همکاران [۱۷] تحقیق قبل را توسعه دادند و به بررسی عدم قطعیت سد وزنی پرداختند. در این مقاله برای حل همزمان مساله ی عدم قطعیت از many-objective genetic algorithm (MOGA) استفاده شده است. این الگوریتم دارای این ویژگی است که می تواند مسئله ی عدم قطعیت را تنها با یک اجرا حل کند. غالبی [۱۸] با استفاده از شبکه ی عصبی ضریب اطمینان دیوار حائل را به صورت تقریبی محاسبه کرده است. در این مقاله برای مدل سازی ضریب اطمینان از دو مدل مختلف استفاده شده است. یکی از آنها artificial neural network (ANN) و دیگری ترکیب artificial bee colony (ABC) با شبکه عصبی است. R^2 بین مقادیر برداشت شده ی ضریب اطمینان و مقادیر شبیه سازی شده برای شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برای داده های آموزشی و تست برابر با ۰,۹۲۰ و ۰,۹۲۴ و برای مدل ABC-ANN برابر با ۰,۹۸۲ و ۰,۹۸۵ است. گردان و همکاران [۱۹] به رویکرد جدیدی از ترکیب ANN و ABC برای مدل سازی ضریب اطمینان دیوار حائل پرداختند. در این مقاله در ابتدا چند مدل شبکه عصبی مصنوعی ساخته شد و از بین مدل‌های ساخته شده بهترین مدل براساس R^2 انتخاب شد. سپس بهترین مدل‌های انتخابی شبکه عصبی مصنوعی ورودی مدل بهینه سازی ABC شده‌اند. پورامینیان و همکاران [۲۰] به ارزیابی اعتماد پذیری و آنالیز حساسیت سد وزنی بتنی پرداختند. در این مقاله با اعمال عدم قطعیت در ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سد و همچنین ارتفاع آب ذخیره شده در پشت سد به بررسی عدم قطعیت سد پرداختند. برای آنالیز حساسیت نیز از متغیر تصادفی تولید شده به وسیله ی تابع توزیع احتمال گوسی با ۵ و ۱۰ درصد انحراف معیار استفاده شده است. در این مقاله نشان داده شد که مدول الاستیسیته بتن بیش ترین اثر را در پاسخ به تغییرات افقی سد دارد. کوپالیپور و همکاران [۲۱] به بررسی پایداری دیوار حائل در مقابل واژگونی پرداخته اند. در این تحقیق از روش های هوش مصنوعی، پایداری دیوارحائل در برابر واژگونی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این تحقیق ۸ مدل پیش بینی براساس شبکه ی عصبی توسعه داده شد از بین مدل های توسعه داده شده بهترین مدل دارای R^2 برابر با ۰,۹۷۴۰ و ۰,۹۸۲۴ برای داده های آموزش و تست می باشد. سبایی و همکاران [۲۲] به بهینه سازی دیوار حائل بتنی طره ای مسلح شده پرداختند. در این تحقیق برای اعتمادپذیری از روش FORM استفاده شده است. عدم قطعیت های لحاظ شده در این تحقیق عدم قطعیت ناشی از مشخصات خاک، مشخصات دیوار حائل، خاک فونداسیون دیوارحائل و ابعاد مورد استفاده برای دیوار حائل است. در این تحقیق به بهینه سازی ابعاد دیوارحائل با استفاده از ماکزیمم کردن

اعتمادپذیری پرداخته شده است. مرادی کیا و همکاران [۲۳] به تحلیل عدم قطعیت سبب‌تنی وزنی پرداختند. آنها با شبیه سازی عددی سد فوسولو در آمریکا با استفاده از نرم افزار ANSYS و با استفاده از تئوری مجموعه فازی و با فرض وجود عدم قطعیت های موجود در پارامترهای طراحی سد، انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان سدوزنی را به دست آوردند. در این مقاله از ترکیب بارهای مختلف استفاده شده بود و در نهایت منطقه ی ریسک حاصل از انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان به دست آمد.

مقالات ارائه شده در بخش مرور تحقیقات را می توان به دو بخش بهینه سازی و عدم قطعیت تقسیم بندی کرد. در بخش بهینه سازی خلایی که وجود داشت و در این مقاله به آن پرداخته شده است، استفاده از یک الگوریتم هوشمند خودتطبیق است که در سایر پژوهش های حوزه دیوار حائل استفاده نگردیده است. از مزایای الگوریتم خودتطبیق این است که در این الگوریتم معرفی و تنظیم پارامتری نیاز نیست و قیود به صورت هوشمند و با توجه مسئله مورد نظر تامین می شوند. در حوزه ی عدم قطعیت در تمامی مقالاتی که مورد بررسی قرار گرفته است، از روش فازی به منظور تحلیل و تجزیه ی انتشار عدم قطعیت در خروجی مدل استفاده شده است. در هیچ کدام از مقالات، نشان داده نشده است که این انتشار عدم قطعیت در خروجی مدل (ضرایب اطمینان) چه تاثیرات مثبت و یا منفی خواهد گذاشت، که این مورد در این مقاله پوشش داده شده است. همچنین خلا دیگری که در مقالات گذشته وجود داشت و در این مقاله به آن پاسخ داده شده است، محاسبه اعتماد پذیری و ریسک با استفاده از مدل تئوری مجموعه فازی و براساس بلوک دیاگرام اعتماد پذیری است.

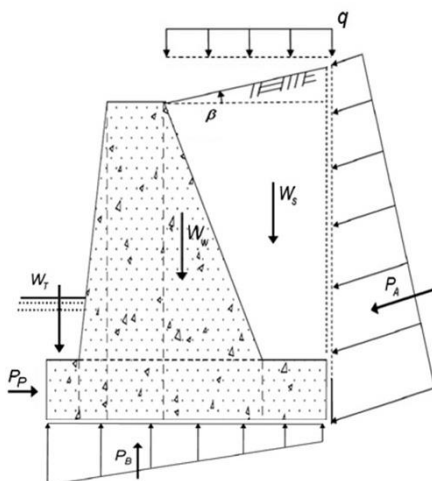
در مقاله ی حاضر با استفاده از نظریه فازی نشان داده شده است که مقادیر عدم قطعیت چه تاثیرات مثبت و منفی بر ضرایب اطمینان دارند. همچنین با استفاده از مفهوم اعتمادپذیری، ریسک به وجود آمده در ضرایب اطمینان دیوارحائل محاسبه شده است. در این مقاله نشان داده شده است که همیشه عدم قطعیت باعث عملکرد نامطلوب سیستم نمی شود. بدین منظور یک مثال از دیوار حائل زده شده است و در ابتدا توسط بهینه سازی مقادیر ابعاد دیوار حائل وزنی برای حالت های فشار محرک و مقاوم رانکین و کلومب به دست آمده است. الگوریتم بهینه سازی به کار رفته در محاسبه ابعاد بهینه دیوارحائل از نوع Self-Adaptive است. سپس توسط نظریه فازی عدم قطعیت های حاصل از مقادیری که ثابت فرض شده اند بررسی شده است. مقادیری ورودی عدم قطعیت ها به وسیله عدد فازی مثلثی به دست آمده اند. برای این منظور از روش آلفا کات در نظریه مجموعه فازی استفاده شده است. برای هر آلفا کات دو بار بهینه سازی صورت گرفته است تا مقادیر حداکثر و حداقل داده محاسبه گردد. این رویه برای همه آلفا کات های اعمال گردیده است. الگوریتم بهینه سازی مورد استفاده برای محاسبه عدم قطعیت از نوع Many objective algorithm می باشد که تمامی عدم قطعیت ها را تنها با یک اجرا به دست می آورد. در نهایت با استفاده از خروجی تئوری فازی، مقدار ریسک حاصل را براساس مثلثات فازی و با استفاده از مفهوم اعتماد پذیری محاسبه می شود. در انتهای مقاله نیز بین دو الگوریتم توسعه داده شده با الگوریتم های سنتی از نظر دقت و سرعت در حل مسئله مقایسه صورت گرفته است.

یکی از نوآوری مقاله ی حاضر در بهره بردن از روش نوآورانه بهینه سازی تک هدفه Self-Adaptive Genetic Algorithm برای بهینه سازی دیوارحائل است که قیود را بدون در نظر گرفتن تابع جریمه تامین می کند. همچنین استفاده از Many objective algorithm برای به دست آوردن عدم قطعیت در دیوار حائل وزنی نیز از جمله نوآوری های دیگر این مقاله است. همچنین در این مقاله نشان داده شده است که عدم قطعیت های موجود در پارامترهای طراحی باعث انتشار عدم قطعیت در خروجی مدل (ضرایب اطمینان سازه) می شوند، اما نکته ای که در مقالات دیگر در این حوزه مغفول مانده است و در این مقاله به آن اشاره شده است این است که این انتشار عدم قطعیت در خروجی مدل با چه احتمالی باعث ایجاد اثرات مثبت (افزایش اعتماد پذیری) و با چه احتمالی باعث ایجاد اثرات منفی (افزایش ریسک) در نتایج خروجی می شوند، که این موضوع نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از مفهوم اعتمادپذیری در به دست آوردن ریسک با استفاده از نظریه ی فازی و در آخر استفاده از بلوک دیاگرام اعتماد پذیری برای به دست آوردن مقدار اعتماد پذیری و ریسک کل را می توان از دیگر نوآوری های این مقاله دانست.

۲- طراحی دیوار حائل وزنی

در شکل (۱) نیروهای وارد بر دیوارحائل وزنی نشان داده شده است. در این شکل، W_w = مجموع وزن همه قسمت های دیوار حائل، W_s = وزن خاک پشت دیوار حائل، W_T = وزن خاک جلوی دیوار حائل، q = سربار اضافی گسترده، P_A = نیروی محرک حاصل از فشار

جانبی خاک پشت دیوار حائل، $P_P =$ نیروی مقاوم حاصل از خاک جلوی دیوار حائل، $P_B =$ نیروی حاصل از تنش در خاک زیرین دیوار حائل است. به طور کلی در طراحی دیوار حائل باید سه حالت پایداری بررسی شود. [۳] حالت‌های پایداری عبارت‌اند از: پایداری در برابر لغزش، پایداری در برابر واژگونی و پایداری در برابر ظرفیت باربری. در زیر فرمول‌های مربوط به فشار محرک و مقاوم رانکین و کلمب و هم چنین ضرایب اطمینان آورده شده است. [۳]



شکل ۱: نیروهای وارد بر دیوار حائل وزنی

۱-۲- فشار محرک و مقاوم برای حالت رانکین

$$K_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi_1}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi_1}} \quad (1)$$

در فرمول بالا K_a ضریب فشار محرک خاک، β زاویه ای که خاکریز پشت دیوار حائل با افق می‌سازد و ϕ_1 زاویه اصطکاک داخلی خاک پشت دیوار حائل است.

$$p_a = \frac{1}{\gamma} \gamma_1 H_r^2 K_a - 2C_1 H_r \sqrt{K_a} \quad (2)$$

$$H_r = H_1 + H_f + X_f \quad (3)$$

$$H_1 = (X_f + X_d) \tan \beta \quad (4)$$

در روابط بالا P_a نیروی محرک حاصل از فشار جانبی خاک پشت دیوار حائل، C_1 چسبندگی خاک پشت دیوار حائل و هم چنین H_3 ارتفاع کل خاک ریز پشت دیوار حائل است. γ_1 نیز وزن مخصوص خاکریز پشت دیوار حائل است.

ضریب فشار مقاوم خاک (K_p) و همچنین نیروی مقاوم خاک در جلوی پنجه دیوار حائل برابر است با:

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_r}{2} \right) \quad (5)$$

$$p_p = \frac{1}{2} \gamma_r h^2 K_p - c_r h \sqrt{K_p} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، ϕ_2 زاویه اصطکاک داخلی خاک زیر دیوار می باشد و همچنین در این رابطه، C_2 و h به ترتیب چسبندگی خاک زیر دیوار حائل و ارتفاع خاک در جلوی پنجه دیوار حائل می باشد. γ_2 نیز وزن مخصوص خاک در جلوی پنجه دیوار حائل می باشد.

۲-۲- فشار محرک و مقاوم برای حالت کلومب

در ادامه ضریب فشار محرک خاک برای حالت کلومب آمده است:

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \phi_r)}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta - \gamma) \left[1 + \frac{\sin(\phi_r + \delta) \cdot \sin(\phi_r - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\beta + \alpha)} \right]} \quad (7)$$

که α و δ به ترتیب زاویه بین وجه پشتی دیوار حائل با افق و زاویه اصطکاک خاک و دیوار حائل است.

$$p_p = \frac{1}{2} \gamma_{eq} H_r^2 K_a - c_r H_r \sqrt{K_a} \quad (8)$$

$$\gamma_{eq} = \gamma_r + \left[\frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \left(\frac{q_r}{H_r} \right) \right] \quad (9)$$

در رابطه بالا q بار گستره یک نواخت است که در شکل (۱) نشان داده شده است. در معادله‌ی زیر ضریب فشار مقاومت و نیروی مقاوم خاک در حالت کلومب آورده شده است:

$$K_p = \frac{\sin^2(\beta - \phi_r)}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta + \delta) \left[1 + \frac{\sin(\phi_r + \delta) \cdot \sin(\phi_r + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \cdot \sin(\beta + \alpha)} \right]} \quad (10)$$

$$p_p = \frac{1}{2} \gamma_r h^2 K_p - c_r h \sqrt{K_p} \quad (11)$$

۲-۳- پایداری در برابر واژگونی

ضریب اطمینان واژگونی در حول نوک پنجه به صورت زیر تعریف می شود:

$$FS = \frac{\sum M_R}{\sum M} \quad (12)$$

$\sum M_R$ برابر است با مجموع ممان های مقاوم حول پنجه و همچنین $\sum M_O$ برابر با مجموع ممان های واژگونی حول پنجه است. نیروی مقاوم خاک در جلوی پنجه دیوار حائل در محاسبات مربوط به ممان مقاوم حول پنجه آورده نشده است.

۲-۴- پایداری در برابر لغزش

در محاسبات مربوط به پایداری در برابر لغزش تنها مولفه افقی نیروی محرک حاصل از خاکریز پشت دیوار حائل شرکت کرده است. مولفه افقی نیروی مقاوم ناشی از: وزن دیوار، وزن خاکریز پشت دیوار حائل، بار گسترده (در صورت وجود بار گسترده این ترم اعمال می شود)، اصطکاک بین کف دیوار حائل با خاک و همچنین نیروی مقاوم خاک در جلوی پنجه دیوار است. ضریب اطمینان در برابر لغزش برابر است با:

$$FS_S = \frac{\sum F_R}{\sum F_D} \quad (13)$$

در رابطه بالا $\sum F_R$ مجموع نیروهای مقاوم و $\sum F_D$ مجموع نیروهای محرک می باشند. در این فرمول نیروهای افقی مقاوم در برابر لغزش ناشی از وزن دیوار حائل، اصطکاک خاک در زیر دیوار حائل و نیروی مقاوم ناشی از خاک در جلوی پنجه دیوار حائل که بصورت زیر تعریف می شوند:

$$FS_R = \left(\sum W_{wall} \right) \cdot \tan \left(\frac{\gamma \phi_r}{3} \right) + \frac{BC \gamma_r}{3} + p_p \quad (14)$$

$$B = X_1 + X_r + X_r + X_r + X_\delta \quad (15)$$

$$\sum F_D = p_a \cdot \beta \cos \quad (16)$$

در فرمول شماره (۱۴) $\sum W_{wall}$ وزن تمام قسمت های دیوار حائل است که با هم جمع شده اند و B برابر با عرض کل دال دیوار حائل است. در فرمول (۱۶) نشان داده شده است که مولفه های افقی برای لغزش دیوار همان مولفه های افقی نیروی محرک ناشی از خاکریز پشت دیوار حائل است.

۲-۵- پایداری در برابر ظرفیت باربری

فشارهای انتقال یافته از طریق دیوار حائل به خاک باید به گونه ای باشد که برای خاک قابل تحمل باشند. کمینه و بیشینه مقدار تنش در خاک زیر دیوار برابر است با:

$$q_{max} = \left(\frac{\sum V}{B} \right) \left(1 + \frac{e \phi}{B} \right) \quad (17)$$

$$q_{min} = \left(\frac{\sum V}{B} \right) \left(1 - \frac{e \phi}{B} \right) \quad (18)$$

در رابطه بالا $\max Q$ و $\min Q$ به ترتیب تنش در زیر پاشنه و پنجه می باشد. $\sum V$ مجموع نیروهای عمودی است که شامل وزن دیوار حائل، خاک پشت دیوار و سربار گسترده در صورت وجود می باشد. e نیز برون محوری برآیند نیروهای وارد بر دیوار حائل است، که به صورت نسبت تفاضل ممان‌های مقاوم و محرک به مجموع نیروهای قائم تعریف می شود.

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_R - \sum M}{\sum V} \quad (19)$$

ضریب اطمینان ظرفیت باربری با نماد FS_B نشان داده می شود که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$FS_B = \frac{q_u}{q_{max}} \quad (20)$$

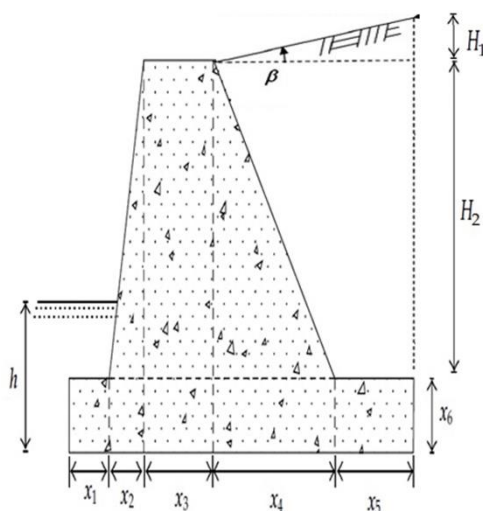
۳- مسئله بهینه سازی

در ادامه به مدل سازی مسئله برای انجام بهینه سازی پرداخته خواهد شد. مسئله بهینه سازی از سه بخش کلی تشکیل شده است: ۱- تابع هدف ۲- متغیرهای طراحی ۳- قیود که در ادامه به توضیح مختصر هر بخش پرداخته خواهد شد.

۳-۱- متغیرهای طراحی

شکل (۲) مقطع دیوار حائل وزنی را همراه با ۶ متغیر طراحی نشان می دهد. X_1 عرض پنجه می باشد. مجموع X_2, X_3 و X_4 عرض تیغه دیوار حائل در پایین است. X_3 نیز عرض تیغه دیوار حائل در قسمت بالا می باشد. X_5 عرض پاشنه می باشد و X_6 نیز ضخامت پایه دیوار حائل است. متغیرهای طراحی دیوار حائل وزنی عبارت اند از:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] \quad (21)$$



شکل ۲: متغیرهای دیوار حائل وزنی

۲-۳- قیود

طراحی دیوارهای حائل باید به گونه‌ای باشد که ضرایب اطمینان را تامین کند. این ضرایب اطمینان در بهینه سازی همان قیود مسئله هستند. محدوده مجاز این ضرایب به صورت زیر است:

$$FS_s \geq 2, FS_b \geq 1.2, FS_b \geq 3 \quad (22)$$

قید دیگر کمینه و بیشینه بودن متغیرهای طراحی می‌باشد. متغیرهای طراحی باید در یک محدوده خاصی تغییر کنند. محدوده تغییرات این متغیرها در جدول (۱) نشان داده شده است. [۳]

جدول ۱: حداکثر و حداقل متغیرهای طراحی دیوار

متغیرهای طراحی	حداقل مقدار	حداکثر مقدار
X_1	$0.12H$	$0.17H$
X_2	$0.02H$	-
X_3	$0.3H$	-
X_6	$0.12H$	$0.17H$
B	$0.5H$	$0.7H$

۳-۳- تابع هدف

تابع هدف در مسئله بهینه سازی، مینیمم کردن وزن مصرفی بتن در دیوارحائل است که به صورت زیر تعریف میشود:

$$\text{Minimize } W_c = A_{RW} \times \gamma_C \quad (23)$$

۳-۴- الگوریتم بهینه سازی GA خود تطبیق

برای حل مسائلی که به دلیل پیچیدگی نمی‌توان با روش‌های معمول حل کرد و یا حل آنها از لحاظ زمانی بسیار زمان بر است، از الگوریتم‌های فراکاوشی مانند الگوریتم‌های ژنتیک که یک الگوریتم جمعیت مبنای تکاملی است استفاده می‌شود که بسیار کارآمد هستند و در اغلب اوقات بهینه‌ی مطلق و یا جواب نزدیک به بهینه مطلق را پیدا می‌کنند. الگوریتم بهینه‌سازی GA که در این تحقیق ارائه شده است مدل توسعه یافته‌ی الگوریتم GA است که توسط [۲۴] ارائه شده است. اصول اولیه الگوریتم‌های ژنتیک برپایه‌ی قوانین ژنتیک و نظریه‌ی داروین است، از این رو در این الگوریتم‌ها از مولفه‌های انتخاب والد، تقاطع و جهش بهره برده می‌شود. گام‌های الگوریتم ژنتیک را می‌توان به اختصار به صورت ذیل بیان کرد.

۱. تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک همچون تعداد جمعیت، نرخ تولید مثل، نرخ جهش و ...
۲. ایجاد جمعیت اولیه
۳. محاسبه‌ی برازندگی جمعیت تولید شده
۴. انتخاب والدین
۵. تولید فرزندان
۶. جهش
۷. اگر شرایط خاتمه برقرار نشده باشد به گام ۳ بر می‌گردد و محاسبات دوباره انجام می‌پذیرد.

الگوریتم اصلاحی که در این پژوهش به نام الگوریتم ژنتیک خودتطبیقی شناخته می‌شود براین اساس است که به جای استفاده از تابع جریمه برای اعمال قیود از مکانیزم خود تطبیقی با تغییر در فرآیند انتخاب والدین استفاده کرده است. در این الگوریتم انتخاب والدین با

استفاده از روش چرخ گردان انجام می‌شود. ابتدا تخطی اعضای جمعیت محاسبه می‌شود و سپس اعضای جمعیت دو بار مرتب می‌شوند. ابتدا اعضای جمعیت از کوچک به بزرگ براساس تابع هدف مرتب می‌شوند. سپس اعضای جمعیت براساس تخطی شان مرتب می‌شوند به گونه ای که هرچه تخطی کمتر داشته باشند در رنک بالاتر قرار می‌گیرند. حال بعد از مرتب سازی جمعیت، به اعضای جمعیت یک احتمال انتخاب نسبت داده می‌شود. این احتمال انتخاب براساس مرتب سازی است که صورت گرفته است. سپس برای انتخاب هر والد دوبار از روش چرخ گردان استفاده می‌شود و دو کروموزوم X و Y انتخاب می‌شوند. از بین دو کروموزوم، کروموزوم X به عنوان والد انتخاب می‌شود اگر یکی از حالات زیر اتفاق بیافتد:

- اگر X امکان پذیر باشد^۲ و Y غیرشدنی^۳ باشد.
 - اگر هر دو X و Y غیرشدنی باشند ولی مقدار تخطی X از Y کمتر باشد.
 - اگر هر دو X و Y شدنی باشند و مقدار هزینه X از Y کمتر باشد.
- اگر موارد بالا اتفاق نیافتاد، Y به عنوان والد انتخاب می‌شود.

۵-۳- الگوریتم بهینه سازی Many-Objective GA

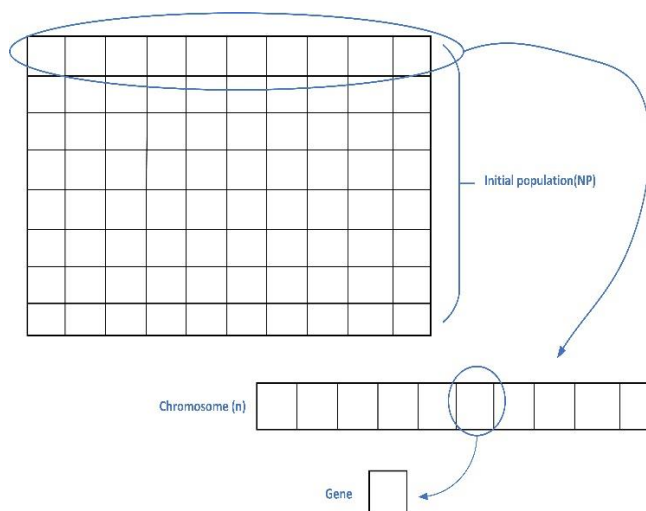
الگوریتم Many-Objective روشی جدید برای حل مسائل عدم قطعیت با یک اجرا می‌باشد. ویژگی که این مسائل دارند این است که با وجود آنکه این مسائل توابع هدف مختلف دارند اما این اهداف در تعارض با یکدیگر نیست. در این پژوهش از این الگوریتم برای ماکزیمم و مینیمم کردن توابع هدف (ضرایب اطمینان) استفاده شده است. این توابع هدف همان فرمول‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) می‌باشند. ذکر این نکته الزامی است که در این بهینه‌سازی با هربار اجرای آلفا کات بر روی پارامترهای طراحی، به ازای محدوده‌ی پارامترهای ورودی که از آلفا کات به دست می‌آید بهینه سازی برای به دست آوردن بیشینه و کمینه مقادیر ضرایب اطمینان انجام می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در الگوریتم چند معیاره این است که بردار متغیرهای تصمیم‌گیری برای اهداف مختلف محاسبه می‌شوند و مانند الگوریتم‌های تک هدفه مقادیر برازندگی در یک بردار متغیر تصمیم‌گیری عامل حذف این بردار از الگوریتم نمی‌شود بلکه این بردار از این شانس برخوردار است که در سایر اهداف نیز برازندگی آن محاسبه شود و حتی چه بسا در سایر اهداف مقادیر برازندگی بسیار خوبی را پیدا کند و در نسل‌های بعدی در جمعیت قرار بگیرد. همین عامل باعث سرعت بخشیدن این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های تک هدفه‌ی سنتی است. در زیر گام‌های این الگوریتم به صورت خلاصه آمده است که برای مطالعات بیشتر می‌توان به مقاله ی [۱۷] مراجعه شود.

۱. تولید جمعیت اولیه به صورت ماتریس:

این جمعیت اولیه به صورت یک ماتریس می‌باشد که تعداد سطرهای آن برابر با NP است که نشان دهنده‌ی تعداد جمعیت است و تعداد ستون‌ها برابر با تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری که برابر با n است. در این ماتریس هر سطر نشان دهنده‌ی یک کروموزوم است. شکل (۳) نشان دهنده‌ی جمعیت اولیه، کروموزوم و n است. در این الگوریتم n ها مقادیر پارامترهای طراحی هستند که فرض شده است مقادیر آن‌ها دارای عدم قطعیت است. در این بهینه‌سازی پارامترها طراحی به گونه ای محاسبه می‌شوند که مقادیر ضرایب اطمینان حداقل و حداکثر شوند.

² feasible

³ infeasible



شکل (۳) نمایش جمعیت، کروموزوم و ژن در الگوریتم Many-Objective

۲. محاسبه‌ی برازندگی جمعیت تولید شده:

برای هر کروموزوم مقدار برازندگی آن کروموزوم برای تمامی توابع هدف محاسبه می‌شود. این مقادیر در یک ماتریس به نام ماتریس برازندگی ذخیره می‌شود که سطرهاى این ماتریس برابر با تعداد کروموزوم‌ها یا همان جمعیت یعنی NP است و ستون‌های این ماتریس برابر است با U است که نشان دهنده‌ی تعداد تابع هدف است.

۳. ایجاد ماتریس رنک:

با توجه به اینکه هر ستون از ماتریس برازندگی که نشان دهنده‌ی مقادیر محاسبه شده برای یک تابع هدف مشخص برای کروموزوم‌های متفاوت است، می‌توان مقادیر آن ستون را بر اساس مقادیر برازندگی رنک بندی کرد. بهترین مقدار رنک ۱ و بدترین آن رنک NP را می‌گیرد. سپس می‌توان برای هر کروموزوم مقادیر رنک آن کروموزوم برای اهداف مختلف را به صورت میانگین محاسبه کرد و ماتریس رنک میانگین گیری شده که به ابعاد $NP \times 1$ است را بدست آورد.

۴. تقسیم بندی کروموزوم‌ها به نخبه، خوب و بد:

بر اساس مقدار ماتریس رنک می‌توان کروموزوم‌های نخبه را بدست آورد. در هر ستون از ماتریس رنک که نشان دهنده‌ی مقدار برازندگی کروموزوم‌ها برای یک تابع هدف است، هر کروموزوم که مقدار رنک آن برابر با ۱ باشد آن کروموزوم به عنوان نخبه معرفی می‌شود. حال همچنین از کروموزوم‌های باقی مانده که برچسب نخبه به آنها تعلق نگرفته است به دسته‌ی خوب یا بد تقسیم می‌شوند. در این حالت یک مقدار آستانه به اسم Rgood معرفی می‌شود که مقداری بین ۱ تا NP دارد. اگر مقدار رنک میانگین کروموزوم از این مقدار کمتر باشد آن کروموزوم به عنوان خوب برچسب گذاری می‌شود و اگر بیش‌تر از این مقدار باشد، به عنوان بد برچسب گذاری می‌شود.

۵. انتخاب والدین:

در این مرحله با استفاده از روش تورنومنت والدین برای عمل تقاطع انتخاب می‌شوند. برای انتخاب هر والد دو کروموزوم CR1 و CR2 به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و سپس اگر یکی از حالات زیر رخ دهد CR1 انتخاب می‌شود در غیر این صورت CR2 انتخاب می‌شود:

- CR1 یک کروموزوم نخبه باشد در حالی که CR2 این گونه نباشد.
- هر دوی CR1 و CR2 نخبه باشند در حالی که CR1 مقدار رنک میانگین بهتری را دارا باشد.
- هیچ کدام از CR1 و CR2 نخبه نیستند ولی CR1 دارای رنک میانگین بهتری است.

۶. تولید فرزندان:

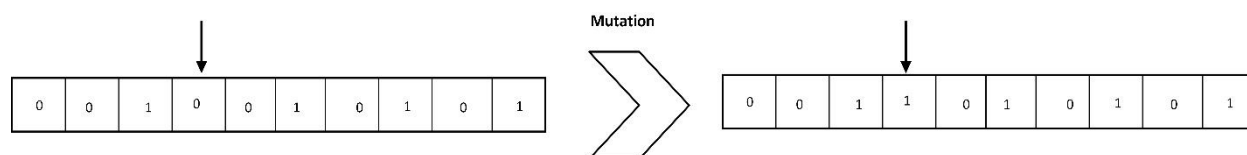
بعد از انتخاب والدین نوبت به تولید فرزندان می‌رسد. در این گام با استفاده از روش ترکیب یکنواخت^۴ فرزندان تولید می‌شوند. در روش ترکیب یک نواخت یک بردار که دارای اعداد تصادفی است و هم طول با کروموزوم است تولید می‌شود. اگر هر یک از مقادیری که در این بردار به صورت تصادفی تولید شده‌اند از مقدار آستانه‌ای که از قبل در نظر گرفته شده است بیشتر شود تبادل ژن‌ها بین کروموزوم والدین انجام می‌شود ولی در غیر این صورت این عمل انجام نمی‌گیرد. تعداد جواب‌های تولید شده با استفاده از این روش برابر با ۹۰ درصد جمعیت اولیه می‌باشد. در شکل (۴) این عملگر نمایش داده شده است.



شکل (۴) عملگر ترکیب یکنواخت

۷. جهش:

در این گام، از میان جمعیتی که از قبل موجود بوده و جمعیت فرزندان تولید شده تعدادی ژن از هر کروموزوم به صورت تصادفی تغییر می‌یابد. عملگر جهش بر روی کروموزوم‌های نخبه اعمال نمی‌شود. تعداد جواب‌های تولید شده با استفاده از مکانیزم جهش برابر با ۵ درصد جمعیت اولیه می‌باشد. در شکل (۵) طریقه‌ی انجام این عملگر نشان داده شده است.



شکل (۵) طریقه‌ی انجام جهش

۸. بررسی معیارهای خاتمه:

در این مرحله معیارهای خاتمه بررسی میشوند که اگر این مهم محقق شده باشد کار الگوریتم پایان می‌یابد در غیر این صورت الگوریتم به گام ۲ باز می‌گردد.

۳-۶- تعیین ابعاد بهینه دیوار حائل با استفاده از بهینه‌سازی

در این بخش ابعاد بهینه‌ی یک دیوار حائل با استفاده از بهینه‌سازی به دست آمده است. این مثال یک بار برای فشار محرک و مقاوم رانکین و بار دیگر برای فشار محرک و مقاوم کلومب اجرا شده است. در جدول (۲) پارامترهای ورودی مسئله آورده شده است. تعداد جمعیت اولیه برابر با ۹۰ جمعیت است. تعداد تکرارها ۱۰۰۰ تکرار است. برای هر مدل ۱۰ بار الگوریتم بهینه‌سازی اجرا شده است که نتایج بهترین خروجی برای روش رانکین در جدول (۳) و برای روش کلومب در جدول (۴) نمایش داده شده است.

⁴ Uniform Crossover

جدول ۲: پارامتر های ورودی برای مسئله بهینه سازی

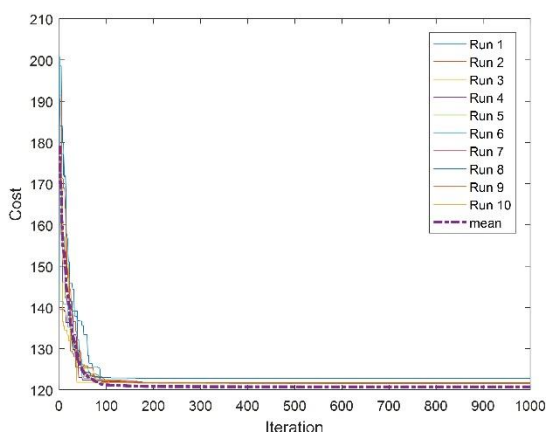
مقدار	نماد	واحد	پارامتر های ورودی
۵,۵	H ₂	m	ارتفاع تیغه دیواره های حائل
.	Q	Kpa	سربار گسترده
.	β		زاویه خاکریز پشت دیوار با افق
۳۰	ϕ_1		زاویه اصطکاک داخلی خاک ریز پشت دیوار
۳۸	ϕ_2		زاویه اصطکاک داخلی خاک ریز دیوار
۱۶	γ_1	$\frac{kn}{m^3}$	وزن مخصوص خاک پشت دیوار
۱۸,۵	γ_2	$\frac{kn}{m^3}$	وزن مخصوص خاک زیر دیوار
۲۴	γ_c	$\frac{kn}{m^3}$	وزن مخصوص بتن
.	C ₁	$\frac{kn}{m^3}$	چسبندگی خاک پشت دیوار
.	C ₂	$\frac{kn}{m^3}$	چسبندگی خاک زیر دیوار
۱	H	m	ارتفاع خاک جلوی پنجه دیوار

جدول ۴: مقادیر بهینه دیوار حائل وزنی برای حالت کلومب

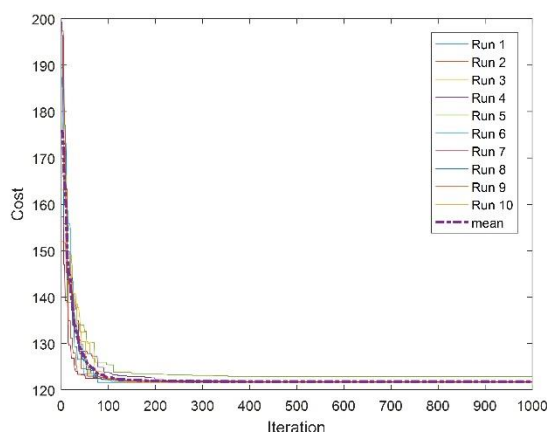
مقدار بهینه (m)	متغیر های طراحی
۰,۹۳۵۰	X ₁
۰,۱۹۰۳	X ₂
۰,۳۰۰۰	X ₃
۰,۱۹۹۹	X ₄
۱,۴۹۹۹	X ₅
۰,۷۵۰۰	X ₆
۱۲۱,۶۰۳۳	Weight Best (kN)
۲,۳۰۶۶	FS ₀
۱,۳۲۵۷	FS _s
۸,۴۰۵۱	FS _B

جدول ۳: مقادیر بهینه دیوار حائل وزنی برای حالت رانکین

مقدار بهینه (m)	متغیر های طراحی
۰,۹۳۴۹	X ₁
۰,۳۸۰۱	X ₂
۰,۳۰۰۰	X ₃
۰,۰۱۰۰	X ₄
۱,۵۰۰۰	X ₅
۰,۷۵۰۰	X ₆
۱۲۱,۵۹۵۵	Weight Best (kN)
۲,۲۷۱۶	FS ₀
۱,۲۸۷۷	FS _s
۸,۵۴۰۵	FS _B



شکل ۷: همگرایی الگوریتم ژنتیک برای روش کلومب



شکل ۶: همگرایی الگوریتم ژنتیک برای روش رانکین

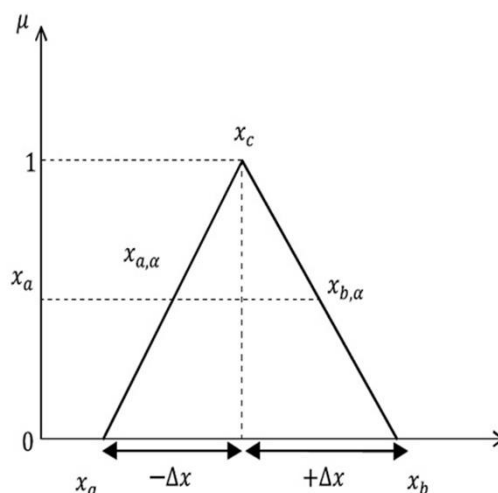
۴- تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و فازی دیوارهای حائل

همان طور که گفته شد عدم قطعیت به دو دسته‌ی ذاتی و شناختی دسته بندی می‌شود. [۴] به عدم قطعیتی که ریشه در ذات مسئله دارد عدم قطعیت ذاتی گفته می‌شود. مانند پدیده وقوع زلزله که ذاتا عدم قطعیت دارد. عدم قطعیت شناختی ناشی از ضعف دانش بشر نسبت به تحلیل مسائل است. عدم قطعیت شناختی را می‌توان به وسیله افزایش دانش و اطلاعات درباره سیستم کاهش داد ولی عدم قطعیت ذاتی به دلیل ماهیت مسئله قابل رفع کردن نیست. در اکثر مسائل مهندسی هر دوی این عدم قطعیت‌ها وجود دارند. هر دوی این عدم قطعیت‌ها در مجموع باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در سیستم می‌شوند. در تجزیه و تحلیل دیوارهای حائل ابتدا پارامترهای طراحی ثابت فرض می‌شوند و به تحلیل و طراحی دیوارهای حائل پرداخته می‌شود. این پارامترهای که ثابت فرض شده‌اند و اصطلاحاً مقادیر "شکننده"^۵ گفته می‌شوند ممکن است دارای عدم قطعیت باشند. این عدم قطعیت به دلیل: عدم قطعیت خصوصیات مصالح، اشتباهات ساخت، فرمول‌های به کار رفته در تحلیل و طراحی دیوار حائل، حوادث استوکاستیک در طی بهره برداری می‌باشند.

برای طراحی ایمن یک دیوار حائل در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها برای پایداری دیوار حائل در طول زمان یک امر حیاتی است. این عدم قطعیت‌ها ممکن است بر روی ضرایب اطمینان تاثیر گذاشته و دیوار حائل را از حالت پایدار به ناپایدار تبدیل کنند. همین امر حساسیت تجزیه و تحلیل عدم قطعیت را در دیوارهای حائل نشان می‌دهد. در این مقاله تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در دیوارهای حائل به وسیله تئوری منطق فازی انجام شده است. پیش از منطق فازی از منطق باینری استفاده می‌شد در منطق باینری حالت بینابینی وجود ندارد یعنی ممکن نیست که یک مقدار X تا حدودی به یک مجموعه متعلق باشد و در عین حال تا حدودی دیگر به مجموعه دیگری متعلق باشد. اما در منطق فازی تعلقات جزئی به یک مجموعه نیز امکان پذیر است. یعنی ممکن است یک مقدار X تا حدودی نسبتاً کم یا تا حدودی زیاد یا ۱۰۰ درصد یا صفر درصد به یک مجموعه متعلق باشد. این وجه تمایز و برتری منطق فازی نسبت به منطق باینری است. در نظریه منطق فازی پارامترهایی که دارای عدم قطعیت هستند با عددهای فازی نشان داده می‌شوند. یک عدد فازی N ، یک مجموعه ای است که روی اعداد حقیقی تعریف می‌شوند ($N \in R$). در واقع N که یک عدد فازی است که به وسیله X و درجه عضویت تعیین می‌شود. برای هر $x \in N$ ، $\mu_N(x) \in [0,1]$ درجه عضویت x در N نامیده می‌شود. اگر $\mu_N(x) = 0$ باشد نشان دهنده آن است که درجه عضویت x نسبت به عدد فازی N صفر است یعنی x به مجموعه فازی N تعلق ندارد. حال اگر $\mu_N(x) = 1$ باشد نشان دهنده این است که x بیشترین تعلق را به مجموعه فازی N دارد. درجه عضویت از ۰ تا ۱ می‌تواند تغییر کند ($0 \leq \mu_N(x) \leq 1$). هر چقدر درجه عضویت به یک نزدیکتر باشد، x بیشتر به N متعلق است.

^۵Crisp

همان طور که در شکل (۸) قابل مشاهده است، عملگر α -cut عدد فازی N را برش می دهد و تبدیل به یک زیرمجموعه از آن عدد فازی می کند. $\alpha \in \mu_N$ است و با هر α -cut که بر روی عدد فازی N زده می شود یک N_α به دست می آید که N_α زیر مجموعه ای از N است. هنگامی که $\alpha = 0$ باشد N_α مساوی با N است و بازه مورد نظر $[X_a, X_b]$ است. هر N_α یک بازه ای است که شامل مقدار شکننده نیز است و به صورت $[X_{a,\alpha}, X_{b,\alpha}]$ تعریف می شود ..



شکل ۸: عدد فازی مثلثی

عدد فازی N را هنگامی نرمال می گویند که حداقل یک x در N وجود داشته باشد که مقدار درجه عضویت آن ۱ باشد. به عبارت دیگر برای این که عدد فازی N نرمال بشود باید حداقل یک مقدار شکننده داخل آن وجود داشته باشد. مثلث و دوزنقه دو نوع معروف از عدد فازی نرمال هستند. در دوزنقه نسبت به مقدار شکننده تردید وجود دارد. یعنی مقدار شکننده یک عدد نیست بلکه یک بازه را شامل می شود. در دوزنقه مقدار شکننده را با قطعیت نمی توان تعیین کرد. در کارهای مهندسی معمولاً عدد فازی همان شکل مثلثی را داراست.

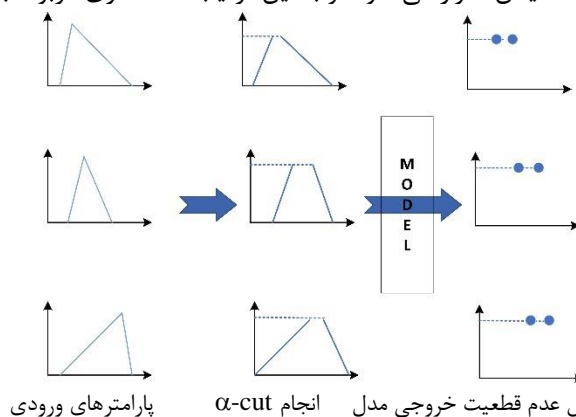
$$\exists x \in R. \mu_N(x) = 1 \quad (24)$$

یک عدد فازی هنگامی محدب است که برای α و α' شرط زیر رعایت گردد. $(N_\alpha = [X_{a,\alpha}, X_{b,\alpha}])$:

$$\alpha' \leq \alpha \rightarrow x_{a,\alpha'} < x_{a,\alpha} \quad x_{b,\alpha'} > x_{b,\alpha} \quad (25)$$

در نتیجه هنگامی مجموعه فازی N را عدد فازی می گویند که اولاً نرمال و ثانیاً محدب باشد. در واقع فرق مجموعه فازی و عدد فازی این است که مجموعه فازی به هر شکل می تواند باشد یعنی می تواند محدب نباشد و یا نرمال نباشد ولی اگر هم محدب و هم نرمال باشد در آن صورت عدد فازی است. در این تحقیق از عدد فازی مثلثی استفاده شده است. برای فازی کردن هر متغیر سه عدد نیاز خواهد بود. دو عدد که دارای حداقل عدم قطعیت هستند (همان مقادیر کران بالا و پایین که در شکل (۵) با مقادیر X_a و X_b نشان داده شده اند) و یک عدد، که همان مقدار شکننده است، که دارای حداکثر مقدار عدم قطعیت است. با داشتن این سه عدد یک عدد فازی مثلثی ساخته خواهد شد. حال اگر x ای وجود داشته باشد که بزرگ تر از $x_c + \Delta x$ یا کوچکتر از $x_c - \Delta x$ باشد هیچ درجه عضویتی نسبت به آن عدد فازی ندارد. برای فازی کردن پارامترهای ورودی طراحی یک دیوار حائل وزنی، مقدار ثابت این پارامترها که برای طراحی در نظر گرفته شده است، موجود است. این پارامترهای ورودی ثابت همان مقادیر کریسپ با ماکزیمم درجه عضویت نسبت به آن پارامترها هستند. مقدار عدم قطعیت هریک از این پارامترها نیز $\pm \Delta x$ در نظر گرفته شده است. در نتیجه مقادیر $x_a = x_c - \Delta x$ و $x_b = x_c + \Delta x$ موجود است.

بنابراین برای هر پارامتر ورودی یک عدد فازی مثلثی ساخته خواهد شد که هر X بین aX و bX دارای یک درجه عضویت بین ۰ تا ۱ نسبت به آن پارامتر ورودی است. X های بیش تر از bX و کم تر از aX نیز دارای درجه عضویت ۰ نسبت به آن پارامتر ورودی هستند. همان طور که از شکل (۹) دیده می شود ابتدا پارامترهای ورودی تبدیل به اعداد فازی می شوند. سپس به وسیله α -cut پارامتر ورودی را که بین [۰, ۱] است گسسته سازی می شوند. در نتیجه برای هر پارامتر ورودی در هر α -cut، یک بازه به دست می آید که امکان کمی سازی آن پارامتر ورودی را می دهد. در مرحله آخر برای نشان دادن تاثیر عدم قطعیت های پارامترهای ورودی در ضرایب اطمینان باید برای هر α -cut با درجه عضویت ثابت که روی همه پارامترهای ورودی زده می شوند، ۲ بار بهینه سازی انجام شود. یک بار برای ماکزیمم کردن و بار دیگر برای مینیمم کردن مقادیر ضرایب اطمینان. پاسخ های به دست آمده نشان می دهد که چگونه عدم قطعیت های پارامترهای ورودی در سیستم پخش می شوند. در این مقاله برای حل مسائل غیر خطی به وجود آمده از الگوریتم MO-GA استفاده شده است. بهینه سازی برای همه α -cut ها و همه ضرایب اطمینان تکرار می شوند و به این ترتیب اعداد فازی مربوط به آنها به دست می آید.



شکل (۹) روش استفاده از تئوری مجموعه فازی برای به دست آوردن عدم قطعیت در خروجی مدل

۵- ریسک

مقاومت^۶ یک سیستم سازه ای در برابر تنش^۷ خارجی، توانایی آن سیستم برای پایدار بودن را نشان می دهد. با استفاده از اعتمادپذیری^۸ که نشان دهنده ای این موضوع است که چقدر احتمال دارد که مقاومت از تنش های وارده بیشتر شود، میتوان احتمال پایداری سیستم را بدست آورد. [۲۵] در نتیجه می توان ریسک را با استفاده از مفهوم اعتمادپذیری و به صورت احتمال تجاوز تنش های وارده از مقاومت به صورت زیر محاسبه کرد. [۲۵]

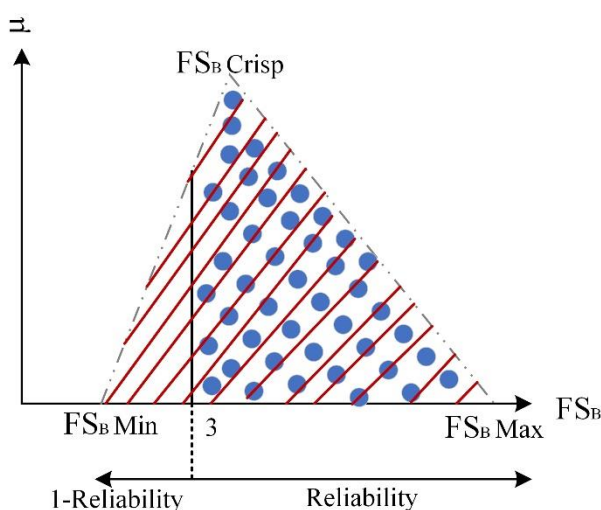
$$\bar{R} = 1 - R = 1 - P(r > s) \quad (26)$$

در رابطه ی بالا \bar{R} نشان دهنده ی ریسک، R نشان دهنده ی اعتمادپذیری، r و s به ترتیب نشان دهنده ی مقاومت و تنش و در نهایت P نشان دهنده ی احتمال است. در این پژوهش سعی شده است اعتمادپذیری با استفاده از تئوری مجموعه فازی به دست آورده شود. طریقه ی به دست آوردن اعتمادپذیری با استفاده از تئوری فازی بدین صورت است که پس از به دست آوردن خروجی های تئوری فازی، می توان مساحت زیر نمودار خروجی عدم قطعیت ضرایب پایداری را حساب کرد. به عنوان مثال همان طور که در شکل (۶) قابل مشاهده است اعتمادپذیری برای ضریب پایداری (FSB) برابر است با مساحت زیر نمودار در شکل (۱۰) از جایی که مقدار FSB بیش تر از ۳ است. این ناحیه به نقاط دایره ای نشان داده شده است. حال این مساحت به دست آمده به مساحت کل زیر نمودار شکل (۶) که هاشور زده شده است تقسیم می شود.

⁶ strength

⁷ stress

⁸ reliability

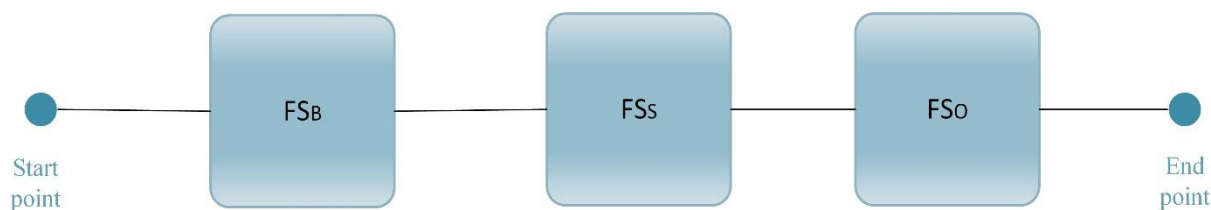


شکل ۱۰: تعیین محدوده اعتمادپذیری با استفاده از خروجی فازی

بعد از محاسبه‌ی اعتمادپذیری برای هر یک از ضرایب پایداری نوبت به محاسبه‌ی اعتمادپذیری کل می‌رسد. برای آنکه سیستم پایدار باشد باید هر سه شرط پایداری باهم تامین گردد در نتیجه می‌توان فرمول اعتمادپذیری کل را به صورت زیر بدست آورد.

$$OR = \bigcup_{i=1}^I R_i \quad (27)$$

در معادله‌ی بالا OR نشان دهنده‌ی اعتمادپذیری کلی است که حاصل اجتماع اعتمادپذیری‌های ضرایب پایداری است. I نیز نشان دهنده‌ی تعداد کل ضرایب پایداری است که در این مسئله ۳ میباشد. در واقع دلیل اجتماع اعتمادپذیری ضرایب پایداری این است که آنها یک سیستم موازی را تشکیل داده اند که اگر یکی از ضرایب پایداری تامین نگردد، پایداری کل سیستم از بین می‌رود. می‌توان این موضوع را به صورت بلوک دیاگرام اعتمادپذیری^۹ به صورت زیر نشان داد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد برای آنکه از نقطه‌ی ابتدایی به نقطه‌ی انتهایی رسید باید از تمامی ضرایب اطمینان عبور کرد. حال اگر یکی از ضرایب اطمینان تامین نگردد به منزله‌ی آن است که نمی‌توان به نقطه‌ی پایانی که تامین پایداری سیستم است رسید.



شکل ۱۱: بلوک دیاگرام اعتمادپذیری

⁹ Reliability Block Diagram (RBD)

۶- نتایج

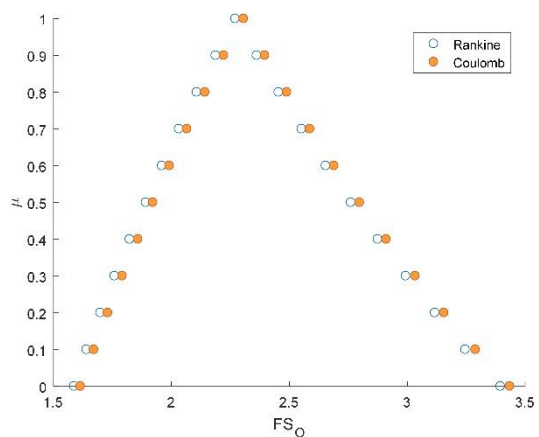
در این قسمت تاثیر عدم قطعیت پارامترهای طراحی دیوار حائل بر روی ضرایب اطمینان دیوار حائل وزنی نشان داده شده است. دیوار حائل وزنی که در این قسمت نشان داده شده است، همان دیوار حائلی است که در قسمت قبل ابعاد بهینه آن به دست آمده است. در نتیجه ابعاد بهینه شده دیوار حائل وزنی و همچنین پارامترهای طراحی در اختیار است. دلیل استفاده از ابعاد بهینه دیوار حائل این موضوع است که طراحان در طرح‌های خود به دنبال ارائه‌ی طرحی هستند که مقدار هزینه آن حداقل باشد. این طرح بهینه از نظر هزینه با کاهش ابعاد و مصالح مصرفی همراه است. در این طرح‌ها پارامترهای طراحی با به وسیله قضاوت مهندسی و یا از آزمایشات به دست می‌آیند که مقادیر ثابت در نظر گرفته می‌شوند. این مقادیر که به اصطلاح مقادیر "شکننده" نامیده می‌شوند دارای عدم قطعیت هستند که ممکن است پایداری دیوار حالی که به صورت بهینه به دست آمده است دچار شکست کند. مقادیر شکننده برای پارامترهای طراحی در ستون ۵ جدول ۵ آورده شده‌اند. در این پژوهش فرض شده است که همه پارامترهای طراحی $\pm 10\%$ عدم قطعیت دارند. برای هر متغیر براساس عدد فازی مثلثی ۳ عدد موجود می‌باشد. یک مقدار شکننده که همان مقادیر ثابتی است که در طراحی دیوارهای حائل به کار گرفته شده است. حدبالا و حدپایین که در نتیجه‌ی اعمال $\pm 10\%$ عدم قطعیت به دست می‌آیند. در نتیجه برای پارامترهای طراحی می‌توان عدد فازی مثلثی را همانند شکل ۵ رسم کرد. Δx برای هر عدد فازی مثلثی برابر است با $\Delta x = 0.1 x_c$. برای تعیین ماکزیمم و مینیمم ضرایب اطمینان باید یک α -cut با درجه عضویت ثابت بر روی همه اعداد فازی زده شود و ورودی‌ها به الگوریتم ژنتیک چندهدفه داده شود تا مقادیر ماکزیمم و مینیمم برای هر کدام از ضرایب اطمینان به دست آید. در این مثال، ۱۱ عدد فازی مثلثی و ۳ ضریب اطمینان وجود دارد. تعداد α -cut های به کار رفته در این مثال برابر ۱۱ می‌باشد که α شامل $(0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1)$ می‌باشد. الگوریتم ژنتیک به کار رفته در این مثال دارای جمعیت اولیه ۹۰، نرخ جهش ۵ درصد، نرخ ترکیب ۹۰ درصد و تعداد تکرار ۱۰۰۰ است. شکل ۱۲ نتایج عدم قطعیت بر روی ضرایب اطمینان را نشان می‌دهد. هر کدام از ضرایب اطمینان به صورت جداگانه و برای حالت کلومب و رانکین رسم شده‌اند. این نتایج نشان دهنده تاثیر زیاد و قابل توجه عدم قطعیت پارامترهای طراحی بر ضرایب اطمینان است. در شکل ۱۳ مقادیر شکننده، بیشترین و کم‌ترین مقدار ضرایب اطمینان برای $\alpha = 0$ آورده شده است. در جدول ۶ نیز حداکثر عدم قطعیت برای هر یک از ضرایب اطمینان آورده شده است.

جدول ۵: پارامترهای طراحی

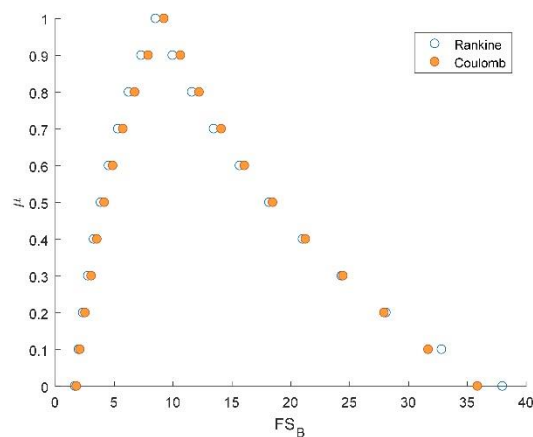
شماره	پارامتر	درصد عدم قطعیت	کران پایین	مقدار شکننده	کران بالا
۱	H ₂	۱۰	۴.۹۵	۵.۵	۶.۰۵
۲	q	۱۰	۰	۰	۰.۱
۳	β	۱۰	۰	۰	۰.۱
۴	ϕ_1	۱۰	۲۷	۳۰	۳۳
۵	ϕ_2	۱۰	۲۶.۲	۲۸	۳۳.۸
۶	γ_1	۱۰	۱۴.۴	۱۶	۱۷.۶
۷	γ_2	۱۰	۱۶.۶۵	۱۸.۵	۲۰.۳۵
۸	γ_c	۱۰	۲۱.۶	۲۴	۲۶.۴
۹	C1	۱۰	۰	۰	۰.۱
۱۰	C2	۱۰	۰	۰	۰.۱
۱۱	h	۱۰	۰.۹	۱	۱.۱
۱۲	kp	۱۰	۲.۷	۳	۳.۳
۱۳	ka	۱۰	۰.۳	۰.۳۳۳	۰.۳۶۶
۱۴	H ₂	۱۰	۴.۹۵	۵.۵	۶.۰۵

جدول ۶: ماکزیمم عدم قطعیت برای ضرایب اطمینان

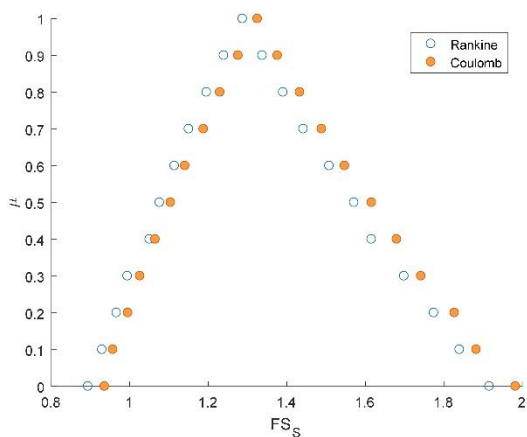
ضریب اطمینان	عدم قطعیت (%)	روش
ضریب اطمینان در برابر لغزش	+۵۰	کلومب
	-۳۰	رانکین
ضریب اطمینان در برابر واژگونی	+۵۰	رانکین
	-۳۰	کلومب
ضریب اطمینان در برابر ظرفیت باربری	+۳۴.۵	رانکین
	-۸۰	کلومب



(b) ضریب اطمینان در برابر واژگونی

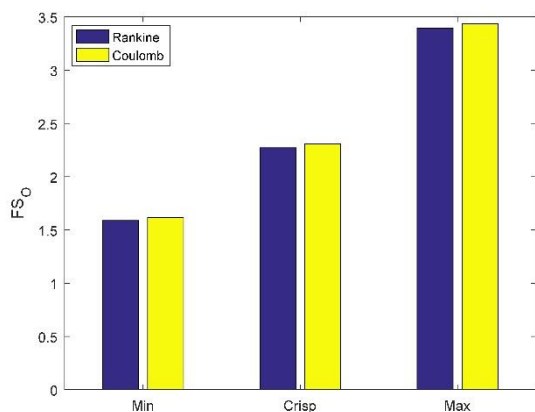


(a) ضریب اطمینان در برابر باربری

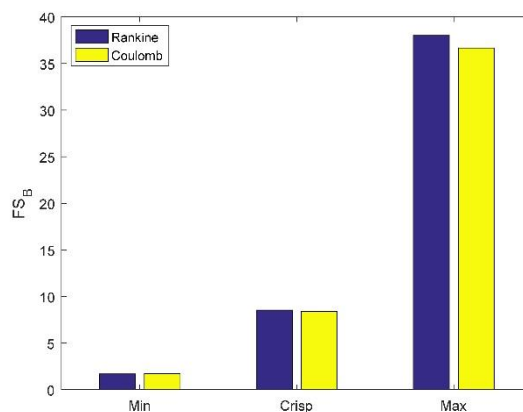


(c) ضریب اطمینان در برابر لغزش

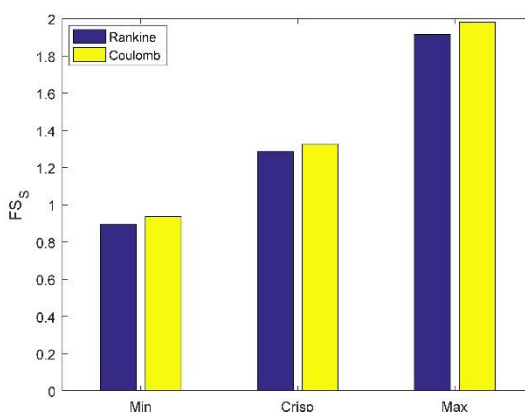
شکل (۱۲) خروجی فازی ضرایب اطمینان



(b) حدود بالا و پایین ضریب اطمینان در برابر واژگونی



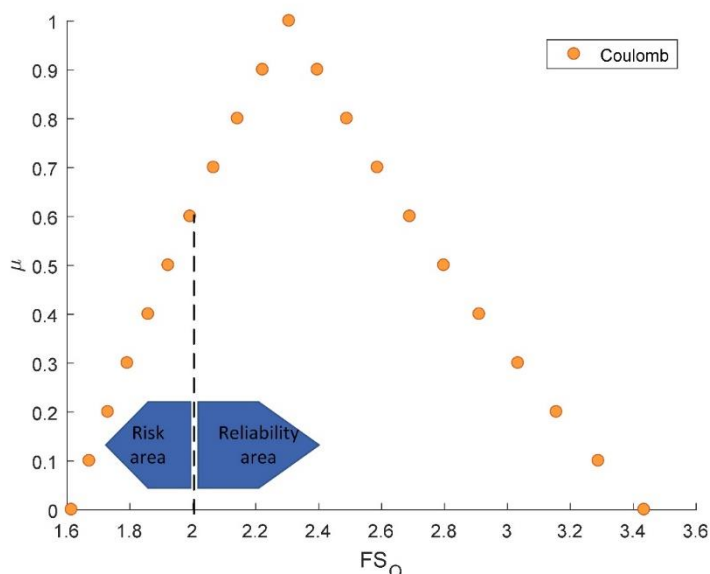
(a) حدود بالا و پایین ضریب اطمینان در برابر باربری



(c) حدود بالا و پایین ضریب اطمینان در برابر لغزش

شکل (۱۳) حدبالا، حدپایین و کریسپ برای ضرایب اطمینان

حال برای به دست آوردن مقادیر ریسک و اعتمادپذیری هریک از ضرایب اطمینان و در نتیجه مقدار ریسک و اعتمادپذیری کل دیوارحائل، از خروجی های به دست آمده از تئوری فازی استفاده می شود. همان طور که به عنوان نمونه در شکل (۱۳) مقدار ضریب اطمینان FS_0 برای حالت کولومب نشان داده شده است، مقدار مطلوب ضریب اطمینان در برابر لغزش بزرگتر مساوی ۲ است. ناحیه اعتمادپذیری و ریسک در این شکل نشان داده شده است. برای به دست آوردن احتمال برای هریک از مقادیر اعتمادپذیری و ریسک می توان نواحی مشخص شده زیرنمودار شکل (۸) را برکل ناحیه تقسیم کرد. مقادیر احتمال اعتمادپذیری و ریسک برای این شکل به ترتیب ۹۱،۵۱۹۷ و ۸،۴۸۰۳ درصد می باشد. با توجه به این مقادیر می توان دریافت که با وجود اینکه عدم قطعیت به وجود آمده در خروجی ضریب اطمینان FS_0 که به ترتیب برابر با ۵۰+ و ۳۰- درصد است اما این عدم قطعیت همیشه باعث بدتر شدن عملکرد سیستم نمی شود. در این مثال عدم قطعیت به وجود آمده در این ضریب اطمینان باعث ایجاد اعتمادپذیری با احتمال ۹۱،۵۱۹۷ درصد و باعث ایجاد ریسک با احتمال ۸،۴۸۰۳ درصد شده است. درواقع می توان گفت عدم قطعیت می تواند با احتمال ۹۱،۵۱۹۷ درصد باعث ایجاد عملکرد مثبت در ضریب اطمینان FS_0 شود و با احتمال ۸،۴۸۰۳ درصد عملکرد منفی داشته باشد. مقادیر احتمال و ریسک برای ضرایب اطمینان در جدول (۷) نشان داده شده است که به دلیل آنکه خروجی های این مقادیر برای حالت کولومب و رانکین تقریباً یکسان است از تفکیک این روش در این جدول خودداری شده است.



شکل (۱۳): نمایش ریسک و عدم قطعیت بر روی ضریب اطمینان FS_O

جدول (۷): خروجی‌های ریسک و اعتمادپذیری برای ضرایب اعتماد پذیری

FS_S	FS_B	FS_O	
۸۷,۸۹۳۶	۹۸,۶۰۳۹	۹۱,۵۱۹۷	اعتمادپذیری (%)
۱۲,۱۰۶۴	۱,۳۹۶۱	۸,۴۸۰۳	ریسک (%)

حال برای به دست آوردن مقدار کل اعتمادپذیری و ریسک برای دیوارحائل وزنی از بلوک دیاگرام اعتمادپذیری در شکل ۷ استفاده شده است. در این شکل نمایش داده شده است که برای آنکه دیوارحائل پایدار باقی بماند باید هر سه ضریب اطمینان از مقادیر تعیین شده بیش تر شوند. حال اگر یکی از ضرایب اطمینان تامین نشود، سازه ناپایدار می شود و اعتمادپذیری آن با شکست مواجه می شود. با توجه به این نکته می توان با ضرب سه مقدار اعتمادپذیری جدول (۷) به اعتمادپذیری کل دیوارحائل که برابر با ۷۹,۳۱۶۹ است رسید و در نتیجه مقدار ریسک کل این سیستم برابر با ۲۰,۶۸۳۰ می شود.

۷-مقایسه‌ی الگوریتم‌های توسعه داده شده با الگوریتم‌های سنتی

در این بخش به مقایسه‌ی الگوریتم‌های توسعه داده شده Self-Adaptive Genetic Algorithm و Many Objective Genetic Algorithm با ورژن‌های سنتی خودشان پرداخته می‌شود. همان‌طور که گفته شد، الگوریتم Self-Adaptive Genetic Algorithm برای یافتن ابعاد بهینه‌ی دیوار حائل وزنی است و الگوریتم Many Objective Genetic Algorithm بمنظور تعیین میزان انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان دیوار حائل وزنی به کار می‌رود. در ادامه از دو منظر دقت در پیدا کردن جواب بهینه و همچنین زمان حل مسئله، دو الگوریتم توسعه داده شده با نمونه‌های سنتی خودشان مقایسه می‌شوند.

۷-۱-مقایسه الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده برای یافتن ابعاد بهینه دیوار حائل وزنی

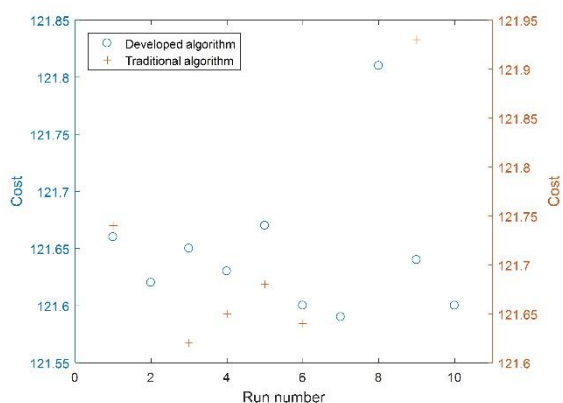
در این قسمت الگوریتم Self-Adaptive Genetic Algorithm با الگوریتم سنتی Genetic Algorithm در یافتن جواب بهینه برای دیوار حائل وزنی مقایسه می‌شود. این مقایسه برای هر دو روش رانکین و کلومب انجام می‌شود. برای هر دو الگوریتم تعداد جمعیت اولیه برابر با ۹۰ جمعیت است. تعداد تکرارها ۱۰۰۰ تکرار، نرخ تولید فرزندان ۹۰ درصد جمعیت اولیه و نرخ جهش ۵ درصد جمعیت اولیه می‌باشد.

شرط خاتمه‌ی الگوریتم نیز عدم تغییر تابع هدف بهینه پس از ۲۵۰ تکرار می‌باشد. برای هر دو روش رانکین و کلومب ۱۰ بار الگوریتم‌های بهینه‌سازی اجرا شده‌اند. خروجی الگوریتم‌ها برای روش کلومب و رانکین به ترتیب در جداول (۸) و (۹) آمده است.

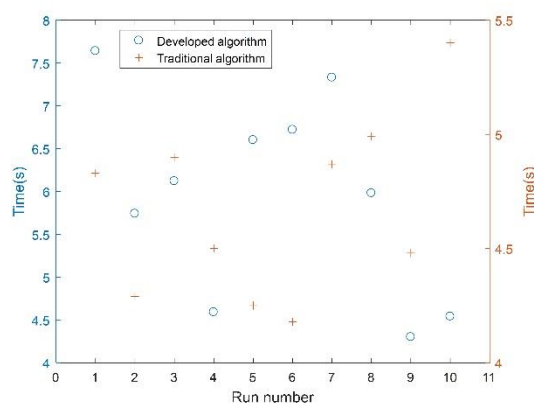
میانگین	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره اجرا
زمان اجر (ثانیه)	۷,۶۴	۵,۷۴	۶,۱۲	۴,۵۹	۶,۶۰	۷,۳۳	۵,۹۸	۴,۳۰	۴,۵۴	۵,۹۵	الگوریتم توسعه داده شده (Self-Adaptive Genetic Algorithm)
مقدار تابع هدف	۱۲۱,۶۶	۱۲۱,۶۲	۱۲۱,۶۵	۱۲۱,۶۳	۱۲۱,۶۷	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۸۱	۱۲۱,۶۴	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۴	
زمان اجر (ثانیه)	۴,۸۳	۴,۲۹	۴,۹۰	۴,۵۰	۴,۲۵	۴,۱۸	۴,۸۷	۴,۹۹	۵,۴۰	۴,۶۶	الگوریتم سنتی (Genetic Algorithm)
مقدار تابع هدف	۱۲۱,۷۴	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۲	۱۲۱,۶۵	۱۲۱,۶۸	۱۲۱,۶۴	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۶	

میانگین	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره اجرا
زمان اجر (ثانیه)	۶,۲۷	۵,۸۳	۶,۰۶	۶,۱۰	۶,۰۴	۵,۹۰	۶,۱۲	۶,۰۲	۶,۰۷	۶,۰۵	الگوریتم توسعه داده شده (Self-Adaptive Genetic Algorithm)
مقدار تابع هدف	۱۲۱,۵۹	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۷۵	۱۲۱,۵۹	۱۲۱,۵۹	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۵۹	۱۲۱,۶۳	۱۲۱,۶۳	۱۲۱,۶۱	
زمان اجر (ثانیه)	۵,۵۹	۵,۴۲	۵,۴۲	۵,۰۰	۵,۰۲	۴,۸۷	۵,۰۳	۵,۰۹	۵,۱۰	۵,۱۵	الگوریتم سنتی (Genetic Algorithm)
مقدار تابع هدف	۱۲۱,۷۵	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۰	۱۲۱,۶۳	۱۲۱,۶۴	۱۲۱,۸۵	۱۲۱,۷۹	۱۲۱,۶۴	۱۲۱,۵۹	۱۲۱,۶۶	

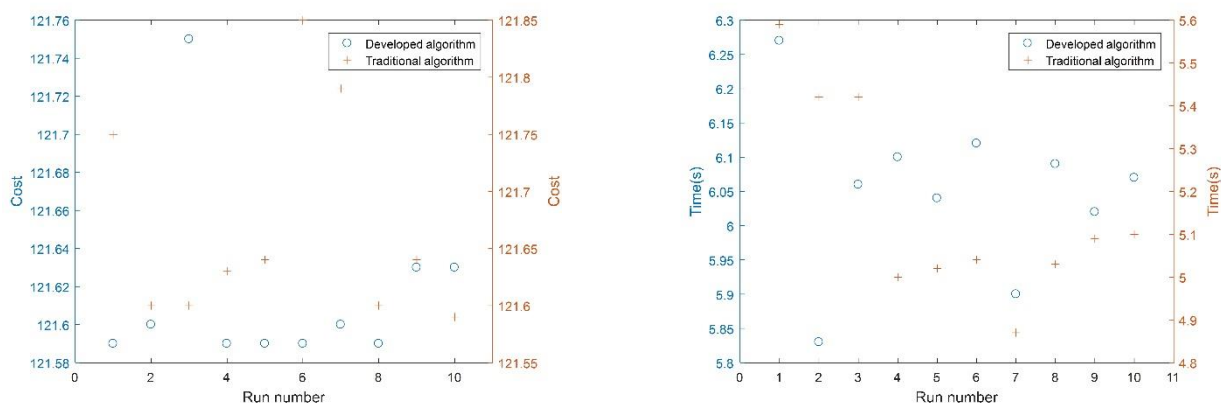
با توجه به خروجی هر دو الگوریتم در روش کلومب و رانکین می‌توان پی برد که سرعت حل روش سنتی از روش توسعه داده شده بیش تر است اما دقت جواب‌های الگوریتم توسعه داده شده از جواب الگوریتم سنتی بهتر است. از مجموع ۲۰ اجرای انجام شده، الگوریتم توسعه داده شده در ۱۳ اجرا تابع هدف بهتری را یافته است و ۵ اجرا عملکرد الگوریتم سنتی در پیدا کردن جواب بهینه بهتر بوده است. از نظر زمان اجرا از مجموع ۲۰ اجرا، الگوریتم سنتی ۱۸ اجرا عملکرد بهتری را داشته است که یکی از دلایل این موضوع می‌تواند شرط خاتمه‌ای باشد که برای اجرای الگوریتم‌ها گذاشته شده است. شکل ۱۴ خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده براساس زمان حل و مقدار تابع هدف با برای دو روش رانکین و کلومب مقایسه شده‌اند.



(b) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر مقدار تابع هدف برای روش کلومب



(a) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر زمان اجرا برای روش کلومب



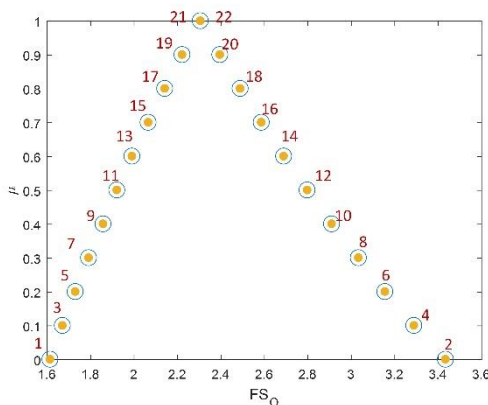
(C) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر زمان اجرا برای روش رانکین
(D) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر مقدار تابع هدف برای روش رانکین

شکل (۱۴) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده برای روش کلومب و رانکین

۲-۷- مقایسه الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده برای به دست آوردن عدم قطعیت

در این قسمت الگوریتم توسعه داده شده Many Objective Genetic Algorithm با نسخه‌ی سنتی Genetic Algorithm در به دست آوردن مقدار انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان دیوار حائل وزنی از نظر دقت در پیدا کردن تابع هدف و زمان حل مسئله مقایسه شده‌اند. با توجه به آنکه خروجی دو روش کلومب و رانکین همان طور که از اشکال ۱۲ و ۱۳ مشخص است، تقریباً یکسان می‌باشند، مقایسه‌ی دو الگوریتم تنها برای روش کلومب ارائه شده است. برای هر دو الگوریتم تعداد جمعیت اولیه برابر با ۱۶۶ جمعیت است. تعداد تکرارها ۱۰۰۰ تکرار، نرخ تولید فرزندان ۹۰ درصد جمعیت اولیه و نرخ جهش ۵ درصد جمعیت اولیه می‌باشد. شرط خاتمه‌ی الگوریتم نیز عدم تغییر تابع هدف بهینه پس از ۳۵۰ تکرار می‌باشد. برای هر دو الگوریتم ۵ بار الگوریتم بهینه‌سازی اجرا شده‌است.

همان طور که قبلاً گفته شد در الگوریتم Many Objective Genetic Algorithm انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان به صورت یکجا و برای تمامی آلفاکات‌ها محاسبه می‌شود. همان طور که از شکل ۱۵ قابل مشاهده است، تعداد آلفاکات‌ها برابر با ۱۱ و تعداد بهینه‌سازی‌های انجام شده برابر با ۲۲ می‌باشد. با توجه به این که تفکیک زمان برای هر بهینه‌سازی در این روش امکان پذیر نیست، زمان کل اجرای الگوریتم Many Objective Genetic Algorithm سنجیده می‌شود و تقسیم بر ۲۲ می‌شود تا زمان میانگین برای هر بهینه‌سازی به دست آید. مقایسه‌ی بین دو الگوریتم بمنظور تشخیص دقت در تعیین جواب برای شناسایی جواب بهینه شماره ۱ در شکل ۱۵ انجام می‌شود.



شکل (۱۵) تعداد بهینه‌سازی‌های انجام شده برای هر ضریب اطمینان

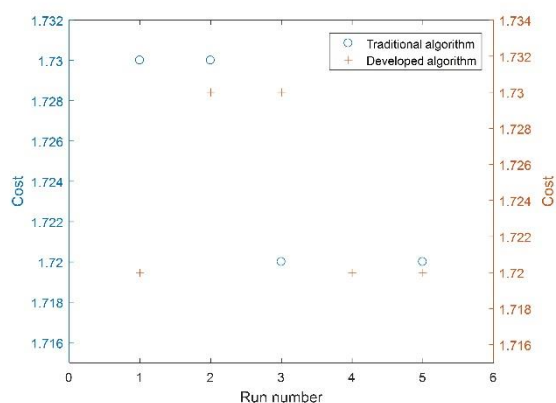
در جدول (۱۰) مقادیر خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده برای محاسبه‌ی انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان از منظر زمان اجرا و دقت در یافتن جواب آورده شده‌اند.

همان طور که از جدول (۱۰) مشخص می‌شود، برای یک بار اجرای الگوریتم Many Objective Genetic Algorithm حدوداً ۲۰ دقیقه زمان نیاز است که در اینجا برای ۱۵ بار اجرا برای تمامی ضرایب اطمینان حدود ۵ ساعت زمان صرف شده است. حال با توجه به اینکه با هر بار اجرای الگوریتم توسعه داده شده، عدم قطعیت تمامی ۲۲ نقطه‌ی نشان داده شده در شکل ۱۵ برای هر ۱۱ آلفا کات به دست می‌آید به صورت میانگین می‌توان زمان هر اجرا را تقسیم بر ۲۲ کرد تا برای هر عدم قطعیت مشاهده شده در شکل ۱۵ به صورت میانگین، زمان اجرا محاسبه شود که حدوداً ۶۰ ثانیه است. از طرفی زمان اجرای الگوریتم سنتی حدوداً ۴۰ ثانیه است که تفاوت ۲۰ ثانیه‌ای با الگوریتم توسعه داده شده دارد. اما این تفاوت قابل اغماض است به دلیل آنکه در الگوریتم سنتی برای به دست آوردن هر کدام از نقاط شکل ۱۵ باید الگوریتم و متغیرهای موجود در آن به صورت دستی توسط کاربر تنظیم شود و سپس الگوریتم اجرا شود اما در الگوریتم توسعه داده شده این کار به صورت خودکار توسط الگوریتم صورت می‌پذیرد و تنها با یکبار اجرا تمامی ۲۲ نقطه محاسبه می‌شود. در مورد دقت نتایج نیز تقریباً هر دو الگوریتم از یک دقت برخوردار هستند و تفاوت خاصی بین نتایج آنها مشاهده نمی‌شود.

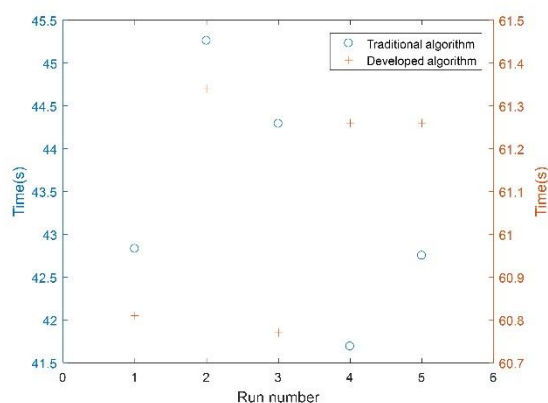
در شکل ۱۶ خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده براساس زمان حل و مقدار تابع هدف برای هر سه ضریب اطمینان نشان داده شده است.

جدول (۱۰) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده برای به دست آوردن انتشار عدم قطعیت در خروجی ضرایب اطمینان

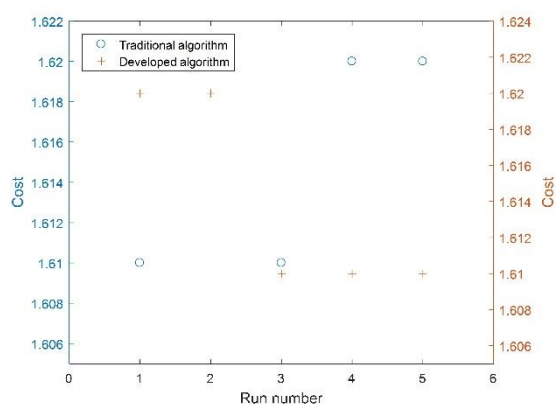
ضریب اطمینان FS ₀			ضریب اطمینان FS _s						ضریب اطمینان FS _B									
الگوریتم توسعه داده شده			الگوریتم سنتی			الگوریتم توسعه داده شده			الگوریتم سنتی			الگوریتم توسعه داده شده			الگوریتم سنتی			
زمان کل اجرا (ثانیه)	زمان هر اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان کل اجرا (ثانیه)	زمان هر اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان کل اجرا (ثانیه)	زمان هر اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار تابع هدف	شماره			
۱۳۴۵,۱۲	۶۱,۴۱	۱,۶۲	۴۱,۴۸	۱,۶۱	۱۳۳۳,۷۵	۶۰,۶۲	۰,۹۳	۴۲,۷۷	۰,۹۳	۱۳۳۸,۹۹	۶۰,۸۱	۱,۷۲	۴۲,۸۳	۱,۷۳	۱			
۱۳۳۷,۵۹	۶۰,۷۹	۱,۶۲	۴۱,۳۹	۱,۶۲	۱۳۴۱,۲۹	۶۰,۹۶	۰,۹۳	۴۱,۱۲	۰,۹۳	۱۳۴۹,۴۸	۶۱,۳۴	۱,۷۳	۴۵,۲۶	۱,۷۳	۲			
۱۳۴۹,۸۷	۶۱,۳۵	۱,۶۱	۴۰,۳۳	۱,۶۱	۱۳۳۹,۵۶	۶۰,۸۸	۰,۹۳	۴۱,۶۹	۰,۹۴	۱۳۳۶,۹۵	۶۰,۷۷	۱,۷۳	۴۴,۲۹	۱,۷۲	۳			
۱۳۳۴,۶۸	۶۰,۶۶	۱,۶۱	۴۱,۳۴	۱,۶۲	۱۳۴۹,۳۴	۶۱,۳۳	۰,۹۴	۴۱,۱۴	۰,۹۳	۱۳۴۷,۷۸	۶۱,۲۶	۱,۷۲	۴۱,۶۹	۱,۷۳	۴			
۱۳۴۲,۶۴	۶۱,۰۲	۱,۶۱	۴۰,۹۴	۱,۶۲	۱۳۳۴,۹۶	۶۰,۶۸	۰,۹۳	۴۱,۵۹	۰,۹۴	۱۳۴۷,۸۹	۶۱,۲۶	۱,۷۲	۴۲,۷۵	۱,۷۲	۵			
۱۳۴۱,۹۸	۶۱,۰۴	۱,۶۱	۴۱,۰۹	۱,۶۲	۱۳۳۹,۷۸	۶۰,۸۹	۰,۹۳	۴۱,۶۶	۰,۹۳	۱۳۴۴,۲۱	۶۱,۰۸	۱,۷۲	۴۳,۳۶	۱,۷۲	میانگین			



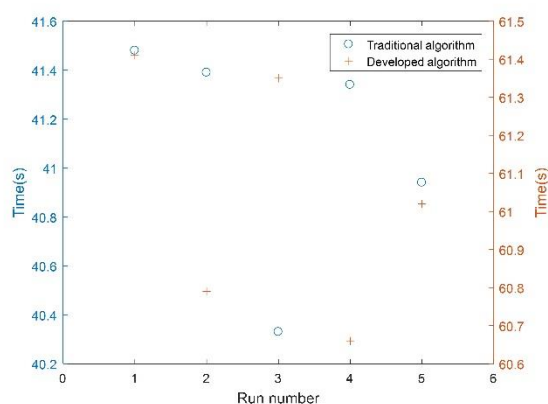
(b) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر مقدار تابع هدف برای ضریب اطمینان FS_B



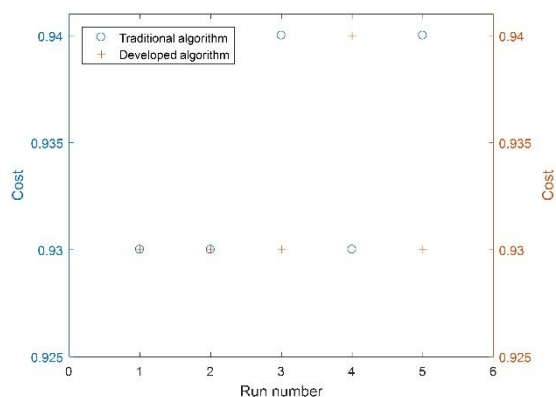
(a) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر زمان اجرا برای ضریب اطمینان FS_B



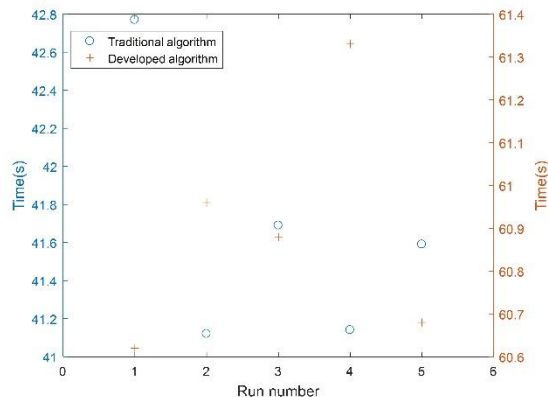
(d) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر مقدار تابع هدف برای ضریب اطمینان FS_O



(c) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر زمان اجرا برای ضریب اطمینان FS_O



(f) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر مقدار تابع هدف برای ضریب اطمینان FS_S



(e) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده از نظر زمان اجرا برای ضریب اطمینان FS_S

شکل (۱۶) مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنتی و توسعه داده شده برای ضرایب اطمینان

۸- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی ریسک و اعتمادپذیری یک دیوار حائل وزنی پرداخته شده است. در ابتدا ابعاد دیوار حائل وزنی به وسیله بهینه سازی الگوریتم ژنتیک Self-Adaptive به دست آمده است. الگوریتم Self-Adaptive الگوریتمی است که برای اعمال قیود از تابع جریمه

استفاده نمی کند بلکه با استفاده از مکانیزمی باعث می شود خود الگوریتم به سمت رعایت قیود گام بردارد. بعد از تعیین ابعاد بهینه دیوار حائل با استفاده از روش مبتنی بر تئوری مجموعه فازی به تجزیه و تحلیل پایداری دیوار حائل وزنی استفاده شده است و چگونگی تاثیر عدم قطعیت های حاصل از پارامترهای طراحی بر ضرایب اطمینان نشان داده شده است. از این رو از تلفیق تئوری مجموعه فازی و الگوریتم ژنتیک بهره برده است. الگوریتم به کار رفته در این مرحله از نوع الگوریتم Many Objective Genetic است که این قابلیت را داراست که میتوان تمامی عدم قطعیت ها را در یک اجرا به دست آورد. در این مقاله عدم قطعیت ها به وسیله اعداد فازی مثلثی با یک تابع درجه عضویت نشان داده شده اند. برای گسسته سازی اعداد فازی از عملگر α -cut استفاده شده است. هر α -cut عدد فازی را به یک زیر مجموعه از آن عدد فازی تبدیل می کند. به این ترتیب تاثیر عدم قطعیت بر روی ضرایب اطمینان دیوار حائل وزنی با استفاده از یک مساله بهینه سازی با تابع هدف های ضرایب اطمینان و بازه هایی که حاصل از α -cut ها هستند به وجود می آید. خروجی های این مثال نشان داده اند که یک عدم قطعیت ناچیز بر روی پارامترهای طراحی چه عدم قطعیت های زیادی برای ضرایب اطمینان را حاصل کرده است. برای مثال همان طور که در شکل ۶-۷ نشان داده شده است ترکیب این عدم قطعیت ها حالتی را برای ضریب اطمینان در برابر لغزش به وجود آورده است که باعث وقوع مقادیری کم تر یا بیش تر از ۱,۲ شده است. حال به این سوال جواب داده شده است که این عدم قطعیت پارامترهای ورودی همیشه باعث عملکرد نامطلوب سیستم در خروجی می شود یا خیر. از این رو با استفاده از مفهوم اعتمادپذیری، میزان اعتمادپذیری هر ضریب اطمینان به دست آورده شده است. اعتمادپذیری برای هر ضریب اطمینان ناحیه ای را تشکیل می دهد که از مقدار آیین نامه ای بیش تر باشد. حال ناحیه ریسک برای هر ضریب اطمینان، ناحیه ای زیر نمودار خروجی فازی آن ضریب اطمینان است که از مقدار آیین نامه ای کمتر باشد. نشان داده شده است که به عنوان مثال برای ضریب اطمینان ظرفیت باربری، $\pm 10\%$ درصد عدم قطعیت در پارامترهای ورودی طراحی ممکن است تا $(+345, -80)$ درصد عدم قطعیت در خروجی ایجاد کند اما این عدم قطعیت لزوماً باعث عملکرد نامطلوب سیستم نمی شود بلکه در این ضریب اطمینان باعث افزایش اعتمادپذیری به میزان $98,6039\%$ درصد و باعث ایجاد ریسک با احتمال $1,3961\%$ درصد شده است. در انتها نیز با استفاده از بلوک دیاگرام اعتمادپذیری نشان داده شده است سه پارامتر ضریب اطمینان عملکرد سری دارند یعنی با شکست یکی کل سیستم شکست می خورد و برای آنکه سیستم پایدار باقی بماند باید هر سه پارامتر تامین شود. از این رو مقدار اعتمادپذیری و ریسک کل برای دیوار حائل وزنی به ترتیب برابر با $79,3169\%$ و $20,6830\%$ درصد محاسبه شده است. همان طور که گفته شد یکی از نوآوری های پژوهش حاضر استفاده از الگوریتم های هوشمند جدید بوده است. توصیه می شود برای تحقیقات آتی از الگوریتم های هوشمند توسعه داده شده در مطالعات و مسائل بزرگ مقیاس استفاده شود. همچنین در این پژوهش از الگوریتم Many objective algorithm در به دست آوردن مقادیر فازی استفاده شده است، که می توان در تحقیقات آینده از این الگوریتم برای مسائل تک هدفه با کمینه کردن هزینه یا چند هدفه نیز بهره برد. در مورد عدم قطعیت در این پژوهش تنها از تئوری فازی استفاده شده است. به نظر استفاده از این تئوری در طراحی بهینه ی دیوار حائل وزنی می تواند یکی از موارد تحقیقاتی آینده باشد که نیاز آن احساس می شود. در آخر استفاده از سایر روش های تحلیل عدم قطعیت و اتصال آن به تئوری فازی نیز می تواند در آینده مورد مطالعه قرار بگیرد.

مراجع

- [1] Talatahari, S., Sheikholeslami, R., Shadfaran, M., & Pourbaba, M. (2012). Optimum design of gravity retaining walls using charged system search algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.
- [2] Das, B. M., & Sivakugan, N. (2016). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- [3] S. Talatahari, R. Sheikholeslami, M. Shadfaran, M. Pourbaba, Optimum design of gravity retaining walls using charged system search algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012 (2012).
- [4] Haghghi, A., & Ayati, A. H. (2015). Uncertainty analysis of stability of gravity dams using the fuzzy set theory. *Iran University of Science & Technology*, 5(4), 465-478.
- [5] Haghghi, A., & Asl, A. Z. (2014). Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA-II. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 32, 270-282.

- [6] Zadeh, L. A., Klir, G. J., & Yuan, B. (1996). Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers (Vol. 6). World Scientific.
- [7] Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- [8] Zimmermann, H. J. (1986). Fuzzy set theory and mathematical programming. *Fuzzy sets theory and applications*, 99-114.
- [9] Bit, A. K., Biswal, M. P., & Alam, S. S. (1992). Fuzzy programming approach to multicriteria decision making transportation problem. *Fuzzy sets and systems*, 50(2), 135-141.
- [10] Zimmermann, H. J. (2010). Fuzzy set theory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3), 317-332.
- [11] Ghazavi, M., & BAZZAZIAN, B. S. (2011). Learning from ant society in optimizing concrete retaining walls.
- [12] Kaveh, A., Talatahari, S., & Sheikholeslami, R. (2011). Optimum seismic design of gravity retaining walls using the heuristic big bang-big crunch algorithm. In *Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland, Paper (Vol. 4).
- [13] Camp, C. V., & Akin, A. (2012). Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization. *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 438-448.
- [14] Talatahari, S., Sheikholeslami, R., Shadfaran, M., & Pournaba, M. (2012). Optimum design of gravity retaining walls using charged system search algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.
- [15] Talatahari, S., & Sheikholeslami, R. (2014). Optimum design of gravity and reinforced retaining walls using enhanced charged system search algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), 1464-1469.
- [16] Li, Q. G. (2012). Reliability Analysis on Stability of Retaining Wall. In *Advanced Materials Research (Vol. 368, pp. 1213-1216)*. Trans Tech Publications Ltd.
- [17] Haghghi, A., & Ayati, A. H. (2016). Stability analysis of gravity dams under uncertainty using the fuzzy sets theory and a many-objective GA. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(3), 1857-1868.
- [18] Ghaleini, E. N., Koopialipoor, M., Momenzadeh, M., Sarafraz, M. E., Mohamad, E. T., & Gordan, B. (2019). A combination of artificial bee colony and neural network for approximating the safety factor of retaining walls. *Engineering with Computers*, 35(2), 647-658.
- [19] Gordan, B., Koopialipoor, M., Clementking, A., Tootoonchi, H., & Mohamad, E. T. (2019). Estimating and optimizing safety factors of retaining wall through neural network and bee colony techniques. *Engineering with Computers*, 35(3), 945-954.
- [20] Pouraminian, M., Pournabakhshian, S., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). Reliability assessment and sensitivity analysis of concrete gravity dams by considering uncertainty in reservoir water levels and dam body materials. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 30(1).
- [21] Koopialipoor, M., Murlidhar, B. R., Hedayat, A., Armaghani, D. J., Gordan, B., & Mohamad, E. T. (2020). The use of new intelligent techniques in designing retaining walls. *Engineering with Computers*, 36(1), 283-294.
- [22] Al Sebai, H. M., Barakat, S., & Arab, M. A Reliability-Based Design Optimization of Cantilever Reinforced Concrete Retaining Walls. In *IFCEE 2021 (pp. 267-277)*.
- [23] Moradi Kia, F., Ghafouri, H. R., & Riyahi, M. M. (2022). Uncertainty analysis and risk identification of the gravity dam stability using fuzzy set theory. *Journal of Hydraulic Structures*, 7(4), 76-92.
- [24] Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). *Genetic algorithms and machine learning*.
- [25] Mays, L. W. (2010). *Water resources engineering*. John Wiley & Sons.