بهینه سازی طرح مخلوط بتن بدون اسلامپ با رویکرد اقتصادی

با استفاده از الگوریتم ژنتیک

پرویز قدوسی
استاد دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه علم و صنعت ایران
رییس هیات مدیره انجمن علمی بتن ایران

علی اکبر شیرزادی جاوید
استادیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه علم و صنعت ایران
عضو انجمن بتن ایران

محمدعلی اعتباری قصبه
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران
مهندسی و مدیریت ساخت
دانشگاه علم و صنعت ایران

مازیار زرعی‌چیان
دانشجوی دکترای عمران
مهندسی و مدیریت ساخت
دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

رسیدن به طرح مخلوط بتن همواره یکی از چالش‌های مهم در صنعت بوده است. روش‌های مختلفی برای رسیدن به طرح مخلوط بتن وجود دارد اما اکثر این روش‌ها همواره تنها مقاومت فشاری بتن را درنظر می‌گیرند. با توجه به لزوم کنترل هزینه پروژه‌ها و مسائل اقتصادی، به روش‌های نوین به منظور رسیدن به طرح مخلوط مورد نظر با رویکرد اقتصادی نیاز است. یکی از این روش‌ها استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک روش برای رسیدن به طرح مخلوط بتن بدون اسلامپ با مقاومت هدف ۶۰ مگاپاسکال و با رویکرد اقتصادی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌توانند بیش از ۱۰ درصد در مقدار هزینه بتن صرفه جویی کرده و جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی باشند و به کاهش هزینه‌های پروژه کمک کنند.

کلمات کلیدی: بتن بدون اسلامپ، بهینه یابی، طرح مخلوط، الگوریتم ژنتیک

۱. مقدمه

بتن بدون اسلامپ، بتنی با اسلامپ بسیار پایین یا اسلامپ صفر است که عموما برای مقاصد پیش ساخته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با توجه به ACI 211.3 بتن بدون اسلامپ، اغلب به عنوان بتن خشک شناخته می‌شود به‌طوری‌که اسلامپ این بتن در محدوده ۲۵-۰ میلیمتر است [۲]. در کارخانه‌های بتن پیش ساخته نیاز است تا قالب بتن هرچه سریعتر پس از بتن‌ریزی برداشته شود تا زمان فرآیند تولید بتن به حداقل برسد. از این رو در این صنعت، بتن بدون اسلامپ کاربرد فراوانی دارد. این روش در صنایع تولید لوله‌های بتنی و نظیر آن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌توان گفت مهمترین مشخصه بتن بدون اسلامپ مقاومت فشاری آن است که این مشخصه به طور مستقیم به اجزای مخلوط بتن وابسته است. از طرفی برای به حداقل رساندن هزینه ساخت بتن و مسائل اقتصادی بسیار حائز اهمیت است که طرح مخلوط بتن بهینه باشد تا بتوان با کمترین هزینه به مقاومت مورد نظر رسید.

روش‌های مختلفی برای تعیین نسبت مخلوط بتن وجود دارد که اکثر آنها بر اساس نتایج آزمون‌های تجربی بوده و فاکتور هزینه در آن‌ها دیده نشده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این روش‌ها برای ارائه طرح مخلوط بتن کافی نبوده و روش‌های نوین با درنظر گرفتن فاکتور هزینه نیاز ضروری است.

PixelPlanet PdfPrinter Demoversion - https://www.pixelplanet.de/pdfprinter-info.html

از جمله روش‌های نوین میتوان به الگوریتم‌های هوشمند اشاره کرد. لیم[1] و همکاران [۳] با استفاده از الگوریتم ژنتیک طرح مخلوط بتن HPC را بهینه یابی کرده‌اند. آن‌ها در ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از رگرسیون، روابطی را برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه و اسلامپ بتن به دست آورده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک این روابط را بهینه یابی کرده اند.

اوزبای[2] و همکاران [۴] با استفاده از روش تاگوچی، یک بهینه سازی چند هدفه با درنظر گرفتن خواص بتن بر روی بتن خودتراکم با مقاومت بالا انجام داده اند و علاوه بر آن میزان اهمیت هر پارامتر ورودی بر روی پارامتر خروجی را بررسی کرده‌اند. پارامترهای ورودی آن‌ها نسبت آب به سیمان، مقدار آب، نسبت سنگدانه ریز به کل سنگدانه، مقدار خاکستر بادی، هوازا و فوق روان کننده و پارامترهای خروجی آنها مقدار جذب آب بتن، آزمون اولتراسونیک، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و آزمون نفوذ آب است. در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی دریافتند که نسبت آب به سیمان بیشترین اثر را نسبت به پارامترهای ورودی دیگر بر پارامترهای خروجی دارد.

یه[3] و همکاران [۵] توانستند با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به کار گیری دو رابطه برای مقاومت فشاری و هزینه برای بتن معمولی، طرح مخلوط بتن را بهینه یابی کنند.

کنون[4] و مورتی[5] [۶] نیز به بهینه سازی طرح مخلوط بتن با الگوریتم های هوشمند پرداختند. آنها با درنظر گرفتن روابط مقاومت بتن و کارایی بتن یک برنامه کامپیوتری ایجاد کرده تا به طرح مخلوط بهینه با کمترین هزینه دست یابند.

سبحانی و همکاران [۱] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روابط خطی و غیر خطی را بری مقاومت بتن بدون اسلامپ ارائه داده‌اند. این روابط براساس مقادیر طرح مخلوط بوده به صورتی که پارامترهای ورودی آن‌ها مقدار سیمان، آب، میکروسیلیس، سنگدانه درشت (شن)، سنگدانه ریز (ماسه) و فیلر می‌باشد. آن‌ها ۴ رابطه برای پیشبینی مقاومت فشاری بتن بدون اسلامپ ارائه کردند که در بین آنها رابطه خطی درجه ۲ با توجه به مقدار خطا به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

۲. روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از رابطه ارائه شده توسط سبحانی و همکاران [۱] برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن بدون اسلامپ و درنظر گرفتن رابطه هزینه بتن، سعی در کمینه کردن هزینه تولید بتن با مقاومت مورد نظر شده است.

رابطه مقاومت فشاری بتن بدون اسلامپ که توسط سبحانی ارائه شده است به صورت زیر است:

$$Fc = a_0 + a_1C + a_2SF + a_3W + a_4FA + a_5CA + a_6FI + a_7C^2 + a_8SF^2 + a_9W^2 + a_{10}FA^2 + a_{11}CA^2 + a_{12}FI^2$$

که در این رابطه:

Fc= مقاومت فشاری ۲۸ روزه

C= سیمان

SF= میکروسیلیس

W= آب

FA= سنگدانه ریز (ماسه)

CA= سنگدانه درشت (شن)

FI= فیلر

ضرایب a0...a12 که توسط رگرسیون به دست آمده اند در جدول ۱ ارائه شده است.

---

1 Lim
2 Ozbay
3 Yeh
4 Cannon
5 Murti

PixelPlanet PdfPrinter Demoversion - https://www.pixelplanet.de/pdfprinter-info.html

جدول ۱ -مقادیر ضرایب رابطه مقاومت فشاری

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12
-3.665	1.563	-0.292	0.662	-1.72	8.627	-0.446	-1.013	0.736	-0.787	5.337	-5.198	0.703

سبحانی و همکاران [۱] برای ارائه رابطه بهتر و بالا بردن دقت مدل، قبل از انجام رگرسیون، داده ها را پیش پردازش کرده اند به این صورت که داده ها طبق رابطه زیر در محدوده ۰,۱ تا ۰,۹ نگاشت می‌شود.

$$i_M = 0.1 + 0.8 \times (i_R - i_{min}) / (i_{max} - i_{min})$$

که در این رابطه: i_M عدد نگاشت شده، i_R عدد واقعی، i_{min} کمترین مقدار آن پارامتر و i_{max} بیشترین مقدار آن پارامتر می باشد.

مقادیر کمینه و بیشینه پارامتر ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر کمینه و بیشینه پارامتر های ورودی و خروجی مدل رگرسیون

پارامتر	کمترین مقدار (کیلوگرم)	بیشترین مقدار (کیلوگرم)
سیمان	۲۵۲,۶	۴۱۰
میکروسیلیس	۰	۲۷,۳
آب	۹۵	۱۳۹,۷
سنگدانه ریز (ماسه)	۳۵۴,۲	۱۳۰۰
سنگدانه درشت (شن)	۶۰۰	۱۴۴۰,۶
فیلر	۰	۱۸۸
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	۵۰	۷۸
نسبت آب به سیمان	۰,۲۷	۰,۴

۱.۲ تابع هدف

با توجه به لزوم کاهش هزینه، هدف اصلی این الگوریتم، کمینه کردن هزینه طرح مخلوط بتن با درنظر گرفتن مقاومت مورد نظر است. هزینه یک متر مکعب بتن از حاصل جمع هزینه اجزای مخلوط بتن به دست می آید. رابطه هزینه بتن به شرح زیر است:

$$\text{MIN } Cost = P_C C + P_{SF} SF + P_W W + P_{FA} FA + P_{CA} CA + P_{FI} FI$$

که در این رابطه P_C، P_{SF}، P_W، P_{FA}، P_{CA}، P_{FI} به ترتیب هزینه یک کیلوگرم از سیمان، میکروسیلیس، آب، سنگدانه ریز (ماسه)، سنگدانه درشت (شن) و فیلر است که در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- هزینه هر کیلوگرم از مصالح

پارامتر	هزینه یک کیلوگرم (ریال)
سیمان	۱۵۰۰
میکروسیلیس	۸۰۰۰
آب	۲۰۰
سنگدانه ریز (ماسه)	۲۵۰
سنگدانه درشت (شن)	۱۵۰
فیلر	۳۵۰

PixelPlanet PdfPrinter Demoversion - https://www.pixelplanet.de/pdfprinter-info.html

۲.۲ قیود طراحی

برای تعریف یک مساله، علاوه بر تابع هدف، نیاز به تعریف قید نیز است. پاسخ مدل زمانی قابل قبول است که تمامی قیود رعایت شده باشند.

۱.۲.۲ قید مقاومت فشاری

اولین قید این مدل مقاومت فشاری ۲۸ روزه است. در این پژوهش مقاومت مورد نیاز ۶۰ مگاپاسکال درنظر گرفته شده است پس باید رابطه مقاومت فشاری برابر با ۶۰ باشد.

$Fc=60\ MPa$

۲.۲.۲ قید کمینه و بیشینه پارامترها

مدل های رگرسیون برای حالاتی قابل استفاده هستند که متغیرها در محدوده کمینه و بیشینه داده های قبل از رگرسیون باشد. به عبارت دیگر در صورتی پاسخ الگوریتم قابل قبول است که هر پارامتر در بازه ی کمینه و بیشینه‌ی خود باشد.

لازم به ذکر است نسبت آب به مواد سیمانی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و باید بین ۰,۲۷ و ۰,۴ باشد.

۳.۲.۲ قید حجم واحد

طرح مخلوط بتن برای یک متر مکعب محاسبه می شود پس باید جمع حجم مواد تشکیل دهنده برابر با یک متر مکعب باشد.

چگالی مواد تشکیل دهنده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- چگالی مواد تشکیل دهنده بتن

پارامتر	سیمان	میکروسیلیس	آب	سنگدانه ریز (ماسه)	سنگدانه درشت (شن)	فیلر
چگالی	۳۱۵۰	۲۲۰۰	۱۰۰۰	۲۵۳۰	۲۵۶۰	۲۳۲۰

در این تحقیق برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فرا ابتکاری است که برای بهینه سازی توابع، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در الگوریتم ژنتیک هر جواب به صورت یک کروموزوم تشکیل شده از ژن‌های مختلف که ژن‌ها معرف پارامترهای تشکیل دهنده جواب هستند، معرفی می‌شود. به عنوان مثال با درنظر گرفتن مقادیر سیمان، میکروسیلیس، آب، سنگدانه ریز (ماسه)، سنگدانه درشت (شن) و فیلر برای یک طرح مخلوط، کروموزوم طرح مخلوط به صورت شکل ۱ نمایش داده می‌شود.

کروموزوم طرح مخلوط

سیمان	میکروسیلیس	آب	شن	ماسه	فیلر

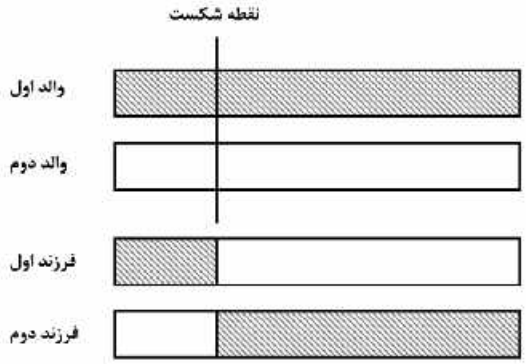
شکل ۱- کروموزوم طرح مخلوط

اولین مرحله در الگوریتم ژنتیک ایجاد جمعیت اولیه است. در این مرحله به صورت کاملا تصادفی به تعداد مورد نیاز کروموزوم ایجاد می‌شود. پس از ایجاد جمعیت اولیه، مقدار تابع هدف برای هر کدام محاسبه و آن‌ها با توجه به مقادیر تابع هدف، ارزیابی می‌شوند. در این پژوهش جمعیت اولیه ۵۰ عدد درنظر گرفته شده است.

پس از ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن‌ها، با استفاده از عملگرهای آمیزش و جهش، جمعیت ثانویه تشکیل می‌شود.

عملگر آمیزش: در این پژوهش برای عملگر آمیزش، از آمیزش تک نقطه ای استفاده شده است. در این عملگر، برای ایجاد جمعیت ثانویه ابتدا تعدادی از جمعیت اولیه به زوج های دوتایی تقسیم می‌شوند که اصطلاحا والد نامیده می‌شوند. ۸۰٪ از جمعیت اولیه به عنوان والد برای آمیزش انتخاب شده‌اند. سپس یک نقطه به صورت تصادفی به عنوان نقطه شکست تعیین شده و والد ها از این نقطه شکسته می‌شوند. پس از شکست والدها، قطعه‌های شکسته شده از هر والد به والد دیگر چسبیده و جمعیت ثانویه را ایجاد می‌کند. شماتیک این عملگر به صورت شکل۲ است.

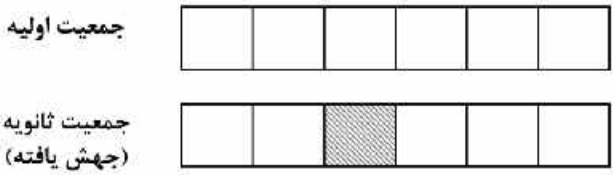
PixelPlanet PdfPrinter Demoversion - https://www.pixelplanet.de/pdfprinter-info.html



شکل ۲- شماتیک عملگر آمیزش

لازم به ذکر است برای انتخاب والد در عملگر آمیزش، از چرخ رولت استفاده شده است به این صورت که کروموزوم با تابع هدف بهتر، شانس بیشتری برای انتخاب دارد.

عملگر جهش: در این عملگر برای ایجاد جمعیت ثانویه، ابتدا مقداری از جمعیت اولیه انتخاب شده (در این پژوهش ۲۰٪ از جمعیت اولیه برای جهش انتخاب شده است) سپس یکی از پارامترهای کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب شده و باز هم به صورت تصادفی با عدد دیگری جایگزین می‌شود. شماتیک این عملگر به صورت شکل ۳ است.



شکل ۳- شماتیک عملگر جهش

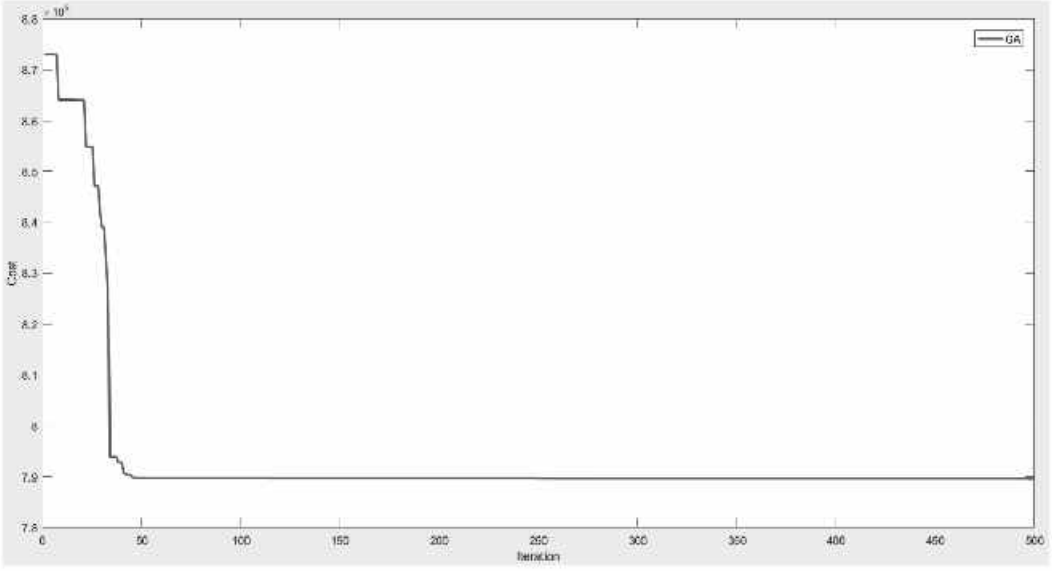
پس از این مراحل، جمعیت اولیه، جمعیت حاصل از آمیزش و جمعیت حاصل از جهش همگی با توجه به تابع هدف آنها مرتب سازی شده و به تعداد جمعیت اولیه بهترین‌های آن‌ها انتخاب و مابقی حذف می‌شوند. جمعیت انتخاب شده به عنوان جمعیت اولیه قرار گرفته و مراحل ایجاد جمعیت ثانویه دوباره تکرار می‌شود. این تکرار به تعداد مورد نظر از پیش تعیین شده (۵۰۰ بار در این پژوهش) انجام شده و در نهایت بهترین کروموزوم به عنوان جواب نهایی اعلام می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به این که الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ممکن است بهترین جواب ممکن را پیدا نکنند، این الگوریتم به تعداد ۲۰ بار اجرا شده تا جواب‌های مختلف پیدا شده و بهترین جواب به عنوان طرح مخلوط نهایی ارائه شود.

برای مشاهده عملکرد الگوریتم، بهترین جواب در هر تکرار ذخیره شده و روند کاهش مقدار تابع هدف در تکرارهای متوالی به صورت نمودار در شکل ۴ نمایش داده شده است.

برای اجرای الگوریتم از نرم افزار Matlab ورژن 2016a استفاده شده است.



شکل ۴- روند بهبود پاسخ در تکرارهای الگوریتم ژنتیک

PixelPlanet PdfPrinter Demoversion - https://www.pixelplanet.de/pdfprinter-info.html

طرح مخلوط نهایی، هزینه و مقاومت پیش بینی شده توسط الگوریتم در جدول زیر ارائه شده است. مقادیر طرح مخلوط به کیلوگرم، مقدار مقاومت فشاری به مگاپاسکال و مقدار هزینه به ریال است.

جدول ۵- نتایج اعلام شده توسط الگوریتم ژنتیک

سیمان	میکروسیلیس	آب	سنگدانه ریز (ماسه)	سنگدانه درشت (شن)	فیلر	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	هزینه
۲۵۵,۲	۰	۹۸	۸۴۸,۲۵	۱۱۳۴,۴	۲,۵۱	۶۰	۷۸۹۵۲۳

به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم با روش‌های سنتی، هزینه طرح مخلوط بتن‌های با مقاومت حدودا ۶۰ مگاپاسکال از پژوهش سبحانی و همکاران [۱] محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- طرح مخلوط و هزینه بتن با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال ارائه شده توسط سبحانی و همکاران

سیمان	میکروسیلیس	آب	سنگدانه ریز (ماسه)	سنگدانه درشت (شن)	فیلر	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	هزینه
۴۱۰	۰	۱۱۷,۸	۴۹۱,۲	۱۲۷۳	۰	۵۹,۹	۹۵۲۳۱۰
۳۲۰	۰	۱۰۳,۲	۶۶۵,۶	۱۲۳۴,۲	۵۷	۶۰,۳	۸۷۲۱۲۰

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، الگوریتم توانسته است هزینه بتن با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال را بیشتر از ۱۰ درصد کاهش دهد که مقدار قابل توجهی در پروژه‌های عمرانی است.

مراجع

[1] Sobhani, J., Najimi, M., Pourkhorshidi, A. R., & Parhizkar, T. (2010). Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models. Construction and Building Materials, 24(5), 709-718.

[2] ACI-211.3, Guide for selecting proportions for no-slump concrete. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2002, 2002

[3] Lim, C. H., Yoon, Y. S., & Kim, J. H. (2004). Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, 34(3), 409-420.

[4] Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu, A., & Ozbebek, H. (2009). Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. Construction and building materials, 23(2), 694-702.

[5] Yeh, I. C. (2007). Computer-aided design for optimum concrete mixtures. Cement and Concrete Composites, 29(3), 193-202.

[6] Cannon, J. P., & Murti, G. K. (1971). Concrete optimized mix proportioning (COMP). Cement and Concrete Research, 1(4), 353-366.

PixelPlanet PdfPrinter Demoversion - https://www.pixelplanet.de/pdfprinter-info.html