



کاهش ضایعات میلگرد در فرآیند سبدهافی سگمنت‌های تونلی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: کارخانه سگمنت سامانه انتقال آب نشتی سد لار)

اشکان سلیمانی^{۱*}، پیمان مقصودی^۲، محمد شیخی^۳، علی ذنوبی^۴

۱- ashkan.soleimani@alumni.iut.ac.ir

۲- Peymanmaghsoudi30@gmail.com

خلاصه

در پروژه‌های حفاری تونل با دستگاه حفاری مکانیزه (TBM)، به‌ویژه در زمین‌هایی با شرایط ناپایدار و بدنه ریزی، پایداری جداره تونل به وسیله قطعات بتنی پیش‌ساخته موسوم به سگمنت تأمین می‌شود. این سگمنت‌ها دارای یک قالب سازه‌ای تشکیل‌شده از آرماتورهای فولادی هستند و فرآیند ساخت این قالب‌ها که به «سبدهافی» شناخته می‌شود، سهم قابل توجهی از هزینه‌های پروژه را شامل می‌گردد. از این‌رو، بهینه‌سازی مصرف میلگرد و کاهش میزان پرتی در این فرآیند، گامی کلیدی در مدیریت هزینه، ارتقای بهره‌وری و دستیابی به توسعه پایدار در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود.

در این پژوهش ابتدا فرآیند سبدهافی در کارخانه تولید سگمنت پروژه سامانه انتقال آب نشتی سد لار به‌طور کامل مورد بررسی و تشریح قرار گرفته است. سپس یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی برای کاهش پرتی میلگرد ارائه شده و به‌منظور دستیابی به الگوهای بهینه برش، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این الگوریتم توانسته با تولید الگوهای برش مناسب برای میلگردهای با طول ۱۲ متر، میزان پرتی را به کمتر از ۰.۴ درصد کاهش دهد.

برآوردهای اقتصادی بیانگر آن است که کاهش پرتی در این سطح، صرفه‌جویی سالانه‌ای معادل حدود ۱۰۷ میلیارد تومان برای پروژه به همراه خواهد داشت. این دستاورد نشان می‌دهد که بهره‌گیری از روش‌های نوین بهینه‌سازی نه تنها در کاهش هزینه‌ها بلکه در افزایش کارایی مصرف منابع نیز نقش چشمگیری دارد. در نهایت، یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی کارآمد برای پروژه‌های مشابه در حوزه سگمنت‌سازی تونل‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی ضایعات میلگرد، کارخانه تولید سگمنت تونلی، الگوریتم ژنتیک، سامانه مهار آب نشتی سد لار



۱. مقدمه

روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی به‌طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مبتنی بر گرادین و روش‌های مبتنی بر جست‌وجوی سراسری. با پیشرفت علم محاسبات و افزایش پیچیدگی مسائل، نسل جدیدی از روش‌های بهینه‌سازی معرفی شد. الگوریتم‌های فراابتکاری زیرمجموعه‌ای از این روش‌ها هستند که با الهام از پدیده‌های طبیعی طراحی شده‌اند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۱]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۲]، الگوریتم کلونی مورچگان [۳] و الگوریتم رقابت استعماری [۴] اشاره کرد. علاوه بر این، طیف گسترده‌ای از الگوریتم‌های فراابتکاری نیز بر پایه رفتار حیوانات، مانند تلاش آن‌ها برای بقا، شکار و تعاملات اجتماعی، توسعه یافته‌اند.

سالم و همکاران با بررسی سه مطالعه‌ی موردی واقعی در کارگاه فولاد، به مقایسه سه روش الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حل «مسأله برش اجسام یک‌بعدی»

^۱(CSP) پرداخته و نشان داد که این روش‌ها می‌توانند میزان پرت میلگرد و ضایعات را به طور قابل‌توجهی کاهش دهند [۵]. در یک مطالعه توسط سانتوسو و همکاران، مسأله CSP در برش میلگردهای ساختمانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی شد. نتایج نشان داد که در حالت بهینه، میزان پرت میلگرد بین ۲.۰۳٪ تا ۴.۳۱٪ کاهش یافت. در سایر توابع برازندگی که علاوه بر کاهش ضایعات، به یکنواختی و نظم در الگوهای برش نیز اهمیت داده شده بود، مقدار پرت بیشتر شده و بین ۲.۲۱٪ تا ۳۰.۷٪ متغیر بود. این نتایج بیانگر کارایی الگوریتم ژنتیک در کاهش ضایعات میلگرد است [۶]. در پژوهش خلیفه و همکاران، مدلی نوین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل CSP در میلگردهای فولادی ارائه شد. نتایج حاصل از مقایسه با مطالعات میدانی در کارگاه‌های فولاد نشان داد که برنامه‌های برش تولیدشده توسط این مدل، نسبت به روش‌های موجود، ضایعات را به شکل قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و از کارایی بیشتری در بهینه‌سازی مصرف میلگرد برخوردار است [۷]. آنت راج و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی (MILP) برای مسأله برش اجسام یک‌بعدی ارائه کردند که به طور همزمان سه هدف رایج را در نظر می‌گیرد: حداقل‌سازی ضایعات برش، هزینه کل برش و تعداد میله‌های مورد استفاده. آزمایش‌های محاسباتی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند راه‌حل‌های بهینه‌تری نسبت به نرم‌افزارهای برش خطی موجود ارائه دهد [۸]. برتولینی و همکاران یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی با استفاده از روش‌های First-Fit Decreasing (FFD) و Best-Fit (BF) را برای مسأله CSP با ضایعات قابل استفاده و محدودیت‌های عملیاتی اضافی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به طور مؤثری ضایعات را کاهش دهد و در عین حال محدودیت‌های عملیاتی را در نظر بگیرد [۹].

بهینه‌سازی هندسه سازه به منظور کاهش مصالح و کاهش هزینه‌ها است [۱۰]. سگمنت تونلی^۲ قطعه‌ای بتنی پیش‌ساخته است که برای تحکیم دیواره تونل‌ها، به‌ویژه در تونل‌هایی که با دستگاه TBM حفاری می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این قطعات با آرماتوربندی و قالب‌بندی خاص، از ریزش و فرسایش دیواره‌ها جلوگیری می‌کنند.

در سال‌های اخیر، تقاضا برای بهره‌گیری از پوشش سگمنتی در تونل‌های طویل و عمیق در بستر سنگی، و نیز در تونل‌های کم‌عمق واقع در خاک‌های نرم، به‌ویژه در نواحی شهری، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. از منظر فنی و اقتصادی، تعیین ابعاد بهینه سگمنت‌ها و نحوه طراحی آن‌ها همواره از جمله مباحث کلیدی و مورد توجه متخصصان و طراحان در حوزه مهندسی تونل بوده است [۱۱].

¹ Cutting Stock Problem² Tunnel Segment



تولید سگمنت نیازمند احداث کارخانه‌ای اختصاصی است. کارخانه‌های سگمنت از نظر نوع قالب به دو دسته کارخانه‌های گردان^۱ و ثابت^۲ تقسیم می‌شوند. در نوع گردان، قالب‌ها متحرک‌اند و مراحل مختلف تولید مانند بتن‌ریزی، عمل‌آوری و جداسازی در ایستگاه‌های مختلف انجام می‌شود. در نوع ثابت، قالب‌ها در محل مشخصی نصب شده‌اند و بتن‌ریزی با استفاده از تجهیزات حمل بتن صورت می‌گیرد.

با توجه به شرایط پروژه و تجربیات پیشین، در کارخانه تولید سگمنت پروژه تونل انتقال آب نشتی سد لار به کلان، از روش متداول قالب ثابت استفاده شده است.



شکل ۱- کارخانه تولید سگمنت



شکل ۲- کارگاه سبدهافی سگمنت

۱-۱ تونل قطعه ۱

شیب طولی قطعه یک تونل لار-کلان معادل ۰.۰۰۱۴ (۱۴ میلی‌متر در هر ۱۰ متر) است. مقطع حفاری تونل در این قطعه، دایره‌ای شکل به قطر حدود ۵.۵ متر است. بنابراین سطح مقطع این تونل برابر ۲۳.۷۶ مترمربع خواهد بود. پوشش

¹ Carousel Plants

² Stationary Plants



تونل به صورت قطعات بتنی پیش ساخته می باشد که همزمان با پیشروی درون سپر انتهایی دستگاه نصب می شود. شکل قطعات بتنی از نمای بالا به صورت چهارضلعی و ضخامت آنها ۲۵ سانتی متر است. تعداد سگمنت ها در هر رینگ ۴ عدد (۱ عدد سگمنت کف و ۳ عدد سگمنت دیواره و ۱ عدد سگمنت سقف) می باشد طول رینگ سگمنتی ۱۰۵ متر بوده که به ازای هر ۱۰۵ متر پیشروی، یک رینگ کامل نصب می شود.

۲. روش تحقیق

سد لار که از سال ۱۳۶۱ بر روی رودخانه لار به بهره برداری رسیده، با هدف ذخیره سازی آب های مازاد و تأمین بخشی از آب شرب تهران طراحی شده است. با افزایش نیاز آبی تهران و ناتوانی سد لتیان در پاسخگویی، وابستگی به آب انتقالی از سد لار افزایش یافت. با این حال، سد لار از ابتدا با مشکل نشت آب مواجه بوده و حجم قابل توجهی از آب آن از طریق چشمه های پایین دست به رودخانه های لار و هراز بازمی گردد.



شکل ۳- نشتی سد لار در رودخانه هراز

برای بهره برداری از این آب های نشت شده، طرح سامانه انتقال آب لار به کلان تعریف شد که شامل دو تونل به طول مجموع ۲۸ کیلومتر است و آب را به سمت نیروگاه کلان و سپس سد لتیان منتقل می کند. حفاری مکانیزه این سامانه در دو قطعه انجام شده است: قطعه ۱ به طول ۲۰۳ کیلومتر در مسیر پلور تا جورد، و قطعه ۲ به طول ۷۰۵ کیلومتر از جورد تا کلان. قطر نهایی تونل ها پس از سگمنت گذاری به ترتیب ۴۰۸ و ۳۰۸ متر است.



شکل ۴- سیمای طرح انتقال آب نشتی سد لار

در ساخت سازه های بتن مسلح، تولید ضایعات برش میلگرد یک نتیجه اجتناب ناپذیر است زیرا میلگرد دقیقاً مطابق با



طراحی تولید نمی‌شود [۱۲]. بهینه‌سازی مصرف میلگرد در عملیات سبدهای کارخانه تولید سگمنت به معنای کاهش ضایعات ناشی از برش میلگردها و افزایش بهره‌برداری مؤثر از این مصالح استراتژیک در ساخت سازه‌های بتنی پیش‌ساخته می‌باشد. در فرآیند تولید سگمنت‌های تونلی، میلگرد نقش اصلی را در شکل‌دهی اسکلت تقویتی این قطعات ایفا می‌کند. به دلیل ماهیت طراحی سگمنت‌ها و تنوع ابعاد آن‌ها، در هنگام برش میلگرد از شاخه‌های استاندارد (معمولاً ۱۲ متری)، میزان قابل توجهی از میلگرد به صورت پرت یا ضایعات باقی می‌ماند که قابلیت استفاده مجدد در همان قالب را ندارد.

از آنجا که میلگرد یکی از اقلام پرهزینه در پروژه‌های عمرانی و زیرساختی به‌شمار می‌رود، مدیریت بهینه مصرف آن در فرآیند تولید می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در کاهش هزینه‌های کل پروژه داشته باشد. در کارخانه تولید سگمنت، عملیات سبدهای که شامل برش، خم‌کاری و جوشکاری میلگردهاست، یکی از پرمصرف‌ترین مراحل از نظر استفاده از فولاد تقویتی محسوب می‌شود. به همین دلیل، هرگونه کاهش در ضایعات ناشی از این عملیات، منجر به صرفه‌جویی مالی قابل توجه و افزایش بهره‌وری در تولید خواهد شد [۱۳].

افزون بر ملاحظات اقتصادی، بهینه‌سازی مصرف میلگرد دارای پیامدهای مثبت زیست‌محیطی نیز می‌باشد؛ چرا که کاهش ضایعات به معنای مصرف کمتر منابع اولیه و تولید کمتر پسماند فلزی است. از این‌رو، دستیابی به الگویی مناسب برای برش و تخصیص میلگرد که کمترین میزان پرت را به همراه داشته باشد، یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان در واحدهای صنعتی تولید سگمنت به‌شمار می‌رود. در این راستا، بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های هوشمند به‌ویژه الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، روشی کارآمد و قابل اتکا برای دستیابی به راه‌حل‌های بهینه و قابل پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی خواهد بود.



شکل ۵- خم و برش آرماتورها

بهینه‌سازی به معنای ارتقاء یا بهبود یک فرایند با هدف دستیابی به بهترین نتیجه ممکن است. در واقع، بهینه‌سازی شامل تنظیم ورودی‌ها یا ویژگی‌های یک سامانه، مدل ریاضی یا آزمایش تجربی به‌منظور کمینه یا بیشینه کردن خروجی مورد نظر می‌باشد.

در این فرآیند، ورودی‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم یا بهینه‌سازی تعریف می‌شوند، و تابع مورد نظر با عنوان تابع هدف، تابع هزینه یا تابع برازندگی شناخته می‌شود. خروجی نیز معمولاً به‌صورت یک مقدار هزینه یا میزان برازندگی ارزیابی می‌گردد [۱۴].

با توجه به اینکه در کارخانه تولید سگمنت مربوط به پروژه سامانه مهار آب نشی سد لار، دو نوع سگمنت شامل



سگمنت‌های نرمال و سگمنت‌های ویژه تولید می‌شود، به‌منظور دستیابی به کمترین میزان پرتی میلگرد و استفاده بهینه از منابع، تدوین سه مدل برنامه‌ریزی ریاضی مجزا ضروری است. این مدل‌ها به ترتیب برای موارد زیر طراحی شده‌اند:

(۱) میلگرد شماره ۱۰ مورد استفاده در سگمنت‌های نرمال

(۲) میلگرد شماره ۱۰ مورد استفاده در سگمنت‌های ویژه

(۳) میلگرد شماره ۱۴ مورد استفاده در سگمنت‌های ویژه

در این راستا، با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و نیازمندی‌های متفاوت هر نوع سگمنت، مدل‌های بهینه‌سازی برش میلگرد به‌گونه‌ای تدوین شده‌اند که حداقل ضایعات ممکن را در فرآیند سبدهافی به همراه داشته باشند.



شکل ۶- سبدهای بافته شده

در جداول زیر، طول برش‌های موردنیاز (POS) به همراه تعداد موردنیاز هرکدام برای هر مدل، به تفکیک ارائه شده است.

جدول ۱- طول و تعداد برش‌های مورد نیاز میلگرد ۱۰ در سگمنت ویژه (هر رینگ)

Pos	طول	تعداد	طول کل	Pos	طول	تعداد	طول کل
۱	۰.۵	۸۰	۴۰	۶	۱.۴۷	۱۲	۱۷.۶۴
۲	۰.۸۵	۱۰	۸.۵	۷	۱.۸	۴	۷.۲
۳	۰.۹	۲۰	۱۸	۸	۲.۰۲	۷۳	۱۴۷.۴۶
۴	۱.۳۲	۱۸	۲۳.۷۶	جمع کل		۲۹۰	۳۶۱.۱۱
۵	۱.۳۵	۷۳	۹۸.۵۵				

جدول ۲ - طول و تعداد برش‌های مورد نیاز میلگرد ۱۰ در سگمنت نرمال (هر رینگ)

Pos	طول	تعداد	طول کل	Pos	طول	تعداد	طول کل
۱	۰.۵	۸۰	۴۰	۲۴	۳.۷۲	۱	۳.۷۲
۲	۰.۸۵	۱	۰.۸۵	۲۵	۳.۷۳	۳	۱۱.۱۹
۳	۰.۹	۱	۰.۹	۲۶	۳.۷۶	۵	۱۸.۸
۴	۱.۳۲	۱۸	۲۳.۷۶	۲۷	۳.۷۷	۳	۱۱.۳۱
۵	۱.۳۵	۷۳	۹۸.۵۵	۲۸	۳.۷۹	۱	۳.۷۹
۶	۱.۴۷	۱۲	۱۷.۶۴	۲۹	۳.۸	۲	۷.۶



۱۵.۲۴	۴	۳.۸۱	۳۰	۷.۲	۴	۱.۸	۷
۳.۸۳	۱	۳.۸۳	۳۱	۱۴۷.۴۶	۷۳	۲۰.۲	۸
۳۰.۸۸	۸	۳.۸۶	۳۲	۳.۱۶	۱	۳.۱۶	۹
۱۵.۶	۴	۳.۹	۳۳	۳.۲۱	۱	۳.۲۱	۱۰
۳.۹۲	۱	۳.۹۲	۳۴	۳.۲۹	۱	۳.۲۹	۱۱
۷.۹	۲	۳.۹۵	۳۵	۳.۳۸	۱	۳.۳۸	۱۲
۷.۹۶	۲	۳.۹۸	۳۶	۳.۴۱	۱	۳.۴۱	۱۳
۱۶.۱۶	۴	۴.۰۴	۳۷	۳.۴۴	۱	۳.۴۴	۱۴
۲۴.۴۲	۶	۴.۰۷	۳۸	۱۴.۰۴	۴	۳.۵۱	۱۵
۸.۱۸	۲	۴.۰۹	۳۹	۱۰.۶۵	۳	۳.۵۵	۱۶
۴.۱۴	۱	۴.۱۴	۴۰	۳.۵۷	۱	۳.۵۷	۱۷
۴.۱۸	۱	۴.۱۸	۴۱	۱۴.۴۴	۴	۳.۶۱	۱۸
۸.۴۸	۲	۴.۲۴	۴۲	۳.۶۲	۱	۳.۶۲	۱۹
۴.۳	۱	۴.۳	۴۳	۳.۶۶	۱	۳.۶۶	۲۰
۴.۳۹	۱	۴.۳۹	۴۴	۳.۶۷	۱	۳.۶۷	۲۱
۴.۴۲	۱	۴.۴۲	۴۵	۷.۳۶	۲	۳.۶۸	۲۲
۶۴۱.۳۷	۳۴۲	جمع کل		۳.۷	۱	۳.۷	۲۳

جدول ۳- طول و تعداد برش‌های مورد نیاز میلگرد ۱۴ در سگمنت ویژه (هر رینگ)

Pos	طول	تعداد	طول کل	Pos	طول	تعداد	طول کل
۱	۰.۳۹	۱۶۰	۶۲.۴	۲۱	۳.۷۷	۳	۱۱.۳۱
۲	۳.۱۶	۱	۳.۱۶	۲۲	۳.۷۹	۱	۳.۷۹
۳	۳.۲۱	۱	۳.۲۱	۲۳	۳.۸	۲	۷.۶
۴	۳.۲۹	۱	۳.۲۹	۲۴	۳.۸۱	۴	۱۵.۲۴
۵	۳.۳۸	۱	۳.۳۸	۲۵	۳.۸۳	۱	۳.۸۳
۶	۳.۴۱	۱	۳.۴۱	۲۶	۳.۸۶	۸	۳۰.۸۸
۷	۳.۴۴	۱	۳.۴۴	۲۷	۳.۹	۴	۱۵.۶
۸	۳.۵	۱	۳.۵	۲۸	۳.۹۲	۱	۳.۹۲
۹	۳.۵۱	۳	۱۰.۵۳	۲۹	۳.۹۵	۲	۷.۹
۱۰	۳.۵۵	۳	۱۰.۶۵	۳۰	۳.۹۸	۲	۷.۹۶
۱۱	۳.۵۷	۱	۳.۵۷	۳۱	۴.۰۴	۴	۱۶.۱۶
۱۲	۳.۶۱	۴	۱۴.۴۴	۳۲	۴.۰۷	۶	۲۴.۴۲
۱۳	۳.۶۲	۱	۳.۶۲	۳۳	۴.۰۹	۲	۸.۱۸
۱۴	۳.۶۶	۱	۳.۶۶	۳۴	۴.۱۴	۱	۴.۱۴
۱۵	۳.۶۷	۱	۳.۶۷	۳۵	۴.۱۸	۱	۴.۱۸
۱۶	۳.۶۸	۲	۷.۳۶	۳۶	۴.۲۴	۲	۸.۴۸
۱۷	۳.۷	۱	۳.۷	۳۷	۴.۳	۱	۴.۳
۱۸	۳.۷۲	۱	۳.۷۲	۳۸	۴.۳۹	۱	۴.۳۹
۱۹	۳.۷۳	۳	۱۱.۱۹	۳۹	۴.۴۲	۱	۴.۴۲



۳۶۷.۴	۲۴۰	جمع کل	۱۸.۸	۵	۳.۷۶	۲۰
-------	-----	--------	------	---	------	----



شکل ۷- خم و برش میلگردها به طول و تعداد موردنیاز

۱ شرح مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح فرایند سیدبافی کارخانه سگمنت:

با توجه به اینکه در کارخانه سگمنت پروژه سامانه مهار آب نشی سد لار دو نوع سید آرماتوربندی شامل سید نرمال و سبد ویژه تولید می شود و در سبدهای ویژه از دو نوع میلگرد با قطرهای ۱۰ و ۱۴ میلی متر استفاده می گردد، مسأله بهینه سازی مصرف میلگرد در این فرایند به سه زیرمسأله مستقل تقسیم می شود.

در ادامه، برای نمونه، مدل ریاضی مربوط به برش میلگرد ۱۴ در سگمنت های ویژه تشریح می شود.

جهت حل این مسأله، در گام نخست باید تمامی الگوهای منطقی ممکن برای برش یک شاخه میلگرد با طول استاندارد ۱۲ متر استخراج شود. تصمیم گیری کارخانه در خصوص چگونگی برش این شاخه ها اساس ساخت مدل بهینه سازی را تشکیل می دهد. هر تصمیم، نمایانگر یک الگوی برش مشخص است که متغیرهای تصمیم مدل با آن ها متناظر خواهند بود.

به عنوان نمونه، یکی از الگوهای منطقی می تواند شامل ۲۴ برش نیم متری باشد که در آن کل طول ۱۲ متر مورد استفاده قرار گرفته و ضایعات برابر با صفر خواهد بود. ($0 = 12 - 24 \times 0.5$)

در حالتی دیگر، ممکن است یک شاخه به ۲۲ برش نیم متری و یک برش ۰.۸۵ متری تقسیم شود. در این صورت، مقدار پرت برابر با ۰.۱۵ متر خواهد بود. ($0.15 = 12 - (22 \times 0.5 + 0.85)$)

با تدوین چنین الگوهایی و مدل سازی آن ها به صورت ریاضی، امکان ارزیابی و انتخاب بهترین ترکیب های برش با کمترین میزان ضایعات فراهم می گردد. مدل نهایی به صورت برنامه ریزی عدد صحیح (Integer Programming) فرمول بندی می شود و با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک حل خواهد شد.

متغیر تصمیم:

x_i : تعداد شاخه میلگرد ۱۲ متری که باید طبق الگوی برش شماره i برش داده شوند.



$$x_1 = 24 \times 0.5 \text{ و } x_2 = 22 \times 0.5 + 1 \times 0.85 \text{ و } \dots \quad \text{معادله (۱)}$$

پارامترها:

هر الگوی برش ضایعاتی دارد که با a_i نشان داده می شود. به عنوان مثال

$$a_1 = 12 - (24 \times 0.5) = 0 \quad \text{معادله (۲)}$$

$$\text{و } a_2 = 12 - 22 \times 0.5 + 0.85 = 0.15 \quad \text{معادله (۳)}$$

تعداد موردنیاز نیاز برش نوع j : $b_j (j \in \{1, 2, \dots, 8\})$

به عنوان مثال به ۸۰ عدد برش با طول ۰.۵ متر نیاز است در نتیجه $b_1 = 80$

تعداد برش نوع j در الگوی برش شماره i : c_{ji}

به عنوان مثال در الگوی برش شماره ۱، ۸۰ عدد برش ۰.۵ متری وجود دارد یعنی $c_{11} = 24$

محدودیت ها:

محدودیت ۱: حداقل باید ۸۰ برش به طول ۰.۵ متر از میلگرد ۱۴ جهت بافتن سبدهای یک رینگ ویژه بریده شود.

محدودیت ۲: حداقل باید ۱۰ برش به طول ۰.۸۵ متر از میلگرد ۱۴ جهت بافتن سبدهای یک رینگ ویژه بریده شود.

بنابراین برای ۸ طول مختلف برش های موردنیاز، ۸ محدودیت باید نوشت.

یک محدودیت باید نشانگر این باشد که متغیر تصمیم فقط اعداد صحیح مثبت اخذ کند.

محدودیت حداکثر طول هر الگوی برش که بیشتر از ۱۲ متر نباید باشد، با متغیر تصادفی تعریف شده بطور خودکار اعمال خواهد شد و در مدل محدودیت دیگری نیاز ندارد.

تابع هدف:

هدف مسئله به حداقل رساندن میزان ضایعات ناشی از برش ها است یعنی عبارت :

$$0 \times x_1 + 0.15 \times x_2 + \dots + a_n \times x_n \quad \text{معادله (۴)}$$

بنابراین مدل پارامتری این مسئله بدین صورت نوشته می شود:

$$\min Z = a_1 \times x_1 + a_2 \times x_2 + \dots + a_n \times x_n \quad \text{معادله (۵)}$$

s. t.

$$c_{11} \times x_1 + c_{12} \times x_2 + \dots c_{1n} \times x_n \leq b_1 \quad \text{معادله (۶)}$$

$$c_{21} \times x_1 + c_{22} \times x_2 + \dots c_{2n} \times x_n \leq b_2 \quad \text{معادله (۷)}$$

:

$$c_{81} \times x_1 + c_{82} \times x_2 + \dots c_{8n} \times x_n \leq b_8 \quad \text{معادله (۸)}$$

$$x_i \geq 0 \text{ و } \text{int} \quad \text{معادله (۹)}$$

برای تدوین مدل عدد صحیح و یافتن پاسخ بهینه از طریق روش های دقیق، لازم است کلیه الگوهای ممکن برش برای یک



شاخه میلگرد ۱۲ متری در نظر گرفته شوند. با توجه به تنوع بسیار زیاد حالت‌های ترکیبی ممکن برای برش‌ها، تهیه‌ی کامل این مجموعه در ابعاد واقعی مسئله، فرآیندی پیچیده و زمان‌بر خواهد بود و عملاً کارایی روش‌های دقیق را در حل این نوع مسائل کاهش می‌دهد.

به همین دلیل، برای مواجهه با چنین مدل‌هایی که دارای فضای جست‌وجوی بسیار وسیع و پیچیده هستند، استفاده از تکنیک‌های هوشمند و روش‌های فراابتکاری (Metaheuristic Methods) به‌عنوان راهکاری مؤثر و کاربردی مطرح می‌شود. این روش‌ها امکان دستیابی به راه‌حل‌های باکیفیت و نزدیک به بهینه را در بازه زمانی منطقی فراهم می‌سازند.

در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین و کارآمدترین الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است تا با بهره‌گیری از سازوکارهای انتخاب، تقاطع و جهش، مجموعه‌ای از الگوهای بهینه یا شبه‌بهینه برای برش میلگردهای ۱۲ متری استخراج گردد و میزان ضایعات در فرآیند سبدبافی به حداقل ممکن کاهش یابد.

۲-۲ الگوریتم ژنتیک^۱

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از پرکاربردترین روش‌های فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی، به‌ویژه در مسائل پیچیده و دارای فضای جست‌وجوی وسیع است. این الگوریتم نخستین بار توسط جان هلند^۲ در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد و بر پایه اصول تکامل طبیعی مانند انتخاب، تقاطع و جهش عمل می‌کند. GA با الگوبرداری از سازوکارهای زیستی، قابلیت پیدا کردن جواب‌های نزدیک به بهینه در مسائلی را دارد که روش‌های دقیق در آن‌ها ناکارآمد یا بسیار زمان‌بر هستند [۱۵].

سازوکار الگوریتم ژنتیک به این صورت است که مجموعه‌ای از نقاط پاسخ در هر تکرار به سمت راه‌حل بهینه حرکت می‌کنند. این پاسخ لزوماً بهترین پاسخ ممکن نیست، اما فرآیند الگوریتم به سمت پاسخ‌های برتر همگرا می‌شود. تکمیل الگوریتم نیز با تعریف تعداد چرخه‌های انتخاب‌شده تعریف می‌شود یا با ادامه چرخه تا زمانی که همگرایی در نتایج حاصل شود [۱۶].

در GA، هر پاسخ ممکن به‌صورت یک کروموزوم^۳ نمایش داده می‌شود که از چند ژن^۴ (یعنی متغیرهای تصمیم) تشکیل شده است. مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها یک جمعیت^۵ را می‌سازند. برای ارزیابی کیفیت هر پاسخ، از تابع برازندگی^۶ استفاده می‌شود که متناسب با هدف مسئله تعریف می‌گردد. در مسائلی با تابع هدف مینیمم‌سازی، لازم است تبدیل‌هایی برای سازگار شدن با ماهیت ماکزیمم‌سازی GA انجام شود.

در هر نسل، الگوریتم با استفاده از عملگر انتخاب (مانند چرخ رولت^۷)، کروموزوم‌های برتر را برای تولید نسل بعد انتخاب می‌کند. سپس با اعمال عملگر تقاطع^۸ و عملگر جهش^۹، فرزندان جدیدی ایجاد می‌شود که می‌توانند ویژگی‌هایی متفاوت از والدین خود داشته باشند.

^۱ Genetic Algorithms

^۲ J.H. Holland

^۳ Chromosome

^۴ Gene

^۵ Population

^۶ Fitness function

^۷ Roulette wheel

^۸ Crossover

^۹ Mutation



۲-۱-۲ نرخ تقاطع ۱

به نرخ تولید فرزندان با استفاده از روش تقاطع، نرخ تقاطع می‌گویند و آن را با pc نشان می‌دهند. بنابراین اگر تعداد جمعیت برابر $Popsiz$ باشد، آنگاه تعداد فرزندان جدید از عملگر تقاطع برابر است با

$$pc \times Popsiz \quad \text{معادله (۱۰)}$$

از انواع تقاطع می‌توان به تقاطع تقاطع تک‌نقطه‌ای، تقاطع دونقطه‌ای، تقاطع چندنقطه‌ای و تقاطع یکنواخت اشاره کرد.

۲-۲-۲ نرخ جهش

نرخ تولید فرزندان جدید با عملگر جهش، در اصطلاح نرخ جهش نامیده می‌شود و آن را با pm نشان می‌دهند. اگر اندازه جمعیت $Popsiz$ باشد تعداد فرزندان جدید با استفاده از عملگر جهش روی افراد جامعه فعلی جامعه، برابر است با

$$pm \times Popsiz \quad \text{معادله (۱۱)}$$

یکی از تفاوت‌های میان تقاطع و جهش در آن است که عمل تقاطع به دو والد نیاز دارد ولی عملگر جهش فقط به یک والد نیاز دارد. بطور معمول در الگوریتم ژنتیک رابطه

$$pm + pc = 1 \quad \text{معادله (۱۲)}$$

برقرار است.

طراحی مناسب ساختار کروموزوم و انتخاب نوع مناسب جهش و تقاطع، نقش مهمی در کارایی الگوریتم دارد. الگوریتم ژنتیک به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، در طیف وسیعی از مسائل مهندسی و صنعتی، از جمله بهینه‌سازی برش میلگرد و کاهش ضایعات در تولید سگمنت، کاربرد مؤثر دارد.

۲-۳ شیوه نمایش پاسخ در الگوریتم ژنتیک

برای کدنویسی الگوریتم ژنتیک لازم است ابتدا شیوه تعریف یک پاسخ تصادفی تشریح گردد.

در زیر نحوه نمایش یک پاسخ از هر کدام از مسائل شرح داده می‌شود.

به طول ۲۴۰							
نوع pos	۱	۳۹	۷	...	۲۶	۱۸	۳۲
شماره برش	۳	۱۴	۱۹	...	۲۰	۳۱	۹

شکل ۸- شیوه نمایش پاسخ برای مسئله میلگرد ۱۴ سگمنت ویژه

به طول ۲۹۰							
------------	--	--	--	--	--	--	--

^۱Crossover rate



نوع pos	۱	۵	۱	...	۳	۶	۸	۱۰ ویژه
شماره برش	۵	۳۱	۱۲	...	۲۰	۲	۹	

شکل ۹- شیوه نمایش پاسخ برای مسئله میلگرد ۱۰ سگمنت ویژه

به طول ۳۴۲							
نوع pos	۵	۸	۳۲	...	۴۵	۱	۶
شماره برش	۱۲	۵۴	۳	...	۴۳	۱۴	۲۹

شکل ۱۰- شیوه نمایش پاسخ برای مسئله میلگرد ۱۰ سگمنت نرمال

هر کروموزوم دارای ۲ ردیف از ژن ها است. ردیف اول شامل یک ماتریس با اندیس های شماره pos ها است. که در آن شماره هر pos چندین بار می تواند تکرار شود.

ردیف دوم ماتریس تصادفی شامل اعداد حداقل تعداد شاخه های ۱۲ متری مورد نیاز برای برش همه pos ها به تعداد مورد نیاز است. به عنوان مثال برای میلگرد ۱۰ ویژه داریم:

$$\frac{361.11}{12} = 30.083$$

یعنی حداقل به ۳۱ شاخه ۱۲ متری نیاز است. بنابراین در ردیف دوم یک ماتریس با اعداد ۱ تا ۳۱ وجود دارد. طول کروموزوم برای میلگرد ۱۰ ویژه برابر است با ۲۹۰ که مجموع همه pos هایی که باید تولید شود.

به عنوان مثال

جدول ۴- قسمتی از کروموزوم مسئله میلگرد ۱۴ سگمنت ویژه

نوع pos	۱	۳۹
شماره برش	۳	۱۴

دو ژن جدول ۴ از کروموزوم مربوط به میلگرد ۱۴ سگمنت ویژه نشان دهنده این است که در شاخه شماره ۳ یک عدد pos به طول ۰.۳۹ متر و در شاخه شماره ۱۴ یک عدد pos به طول ۴.۴۲ متر برش داده می شوند.

براین اساس الگوهای برش مشخص می شوند.

۲-۳-۱ نحوه انجام عملگر تقاطع

مهمترین عملگر در الگوریتم ژنتیک، عملگر تقاطع است. تقاطع فرآیندی است که در آن نسل قدیمی کروموزوم ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می شوند تا نسل تازه ای از کروموزوم ها به وجود بیاید. جفت هایی که در قسمت انتخاب به عنوان والد در نظر گرفته شوند در این قسمت ژن هایشان را با هم مبادله می کنند و اعضای جدید را به وجود می آورند. تقاطع در الگوریتم ژنتیک باعث از بین رفتن پراکندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می شود زیرا اجازه می دهد ژن های خوب یکدیگر را بیابند. عملگر تقاطع در نظر گرفته شده برای کروموزوم های تعریف شده، تقاطع یک نقطه ای است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شیوه تقاطع ابتدا تمامی ژن های قبل از نقطه تقاطع از والد اول و تمامی ژن های پس از نقطه تقاطع از والد دوم به فرزند اول



کپی شده و پیش‌نمایش فرزند اول ایجاد می‌گردد. سپس به‌منظور ایجاد یک جواب شدنی در صورتی که ژن‌ها سبب این شوند که طول یک شاخه بیشتر از ۱۲ متر شود، با ژن‌های با شماره کوچکتر از خود جایگزین می‌شوند تا حدی که این محدودیت رفع گردد.

فرزند دوم نیز به‌صورت مشابه تولید می‌گردد. لازم به ذکر است که برای هر ردیف از کروموزوم‌ها نقطه تقاطع می‌تواند متفاوت باشد.

والد ۱	۲	۳۵	۱	...	۱۲	۱	۸	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	
والد ۲	۳۱	۱	۵	...	۲۲	۱	۳	ویژه ۱۴
	۳	۳۰	۲۴	...	۸	۱۲	۵	
پیش‌نمایش فرزند ۱	۲	۳۵	۱	...	۲۲	۱	۳	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	
فرزند ۱	۲	۳۵	۱	...	۲۲	۱	۱	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	
پیش‌نمایش فرزند ۲	۳۱	۱	۵	...	۱۲	۱	۸	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	
فرزند ۲	۳۱	۱	۱	...	۱۲	۱	۸	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	

شکل ۱۱- نحوه انجام عملگر تقاطع

۲-۳-۲ نحوه انجام عملگر جهش

جهش نیز عملگر دیگری است که جواب‌های ممکن دیگری را ایجاد می‌کند. در الگوریتم ژنتیک بعد از اینکه یک عضو در جمعیت جدید به وجود آمد هر ژن آن با احتمال جهش، جهش می‌یابد. در جهش ممکن است ژنی از مجموعه ژن‌های جمعیت حذف شود یا ژنی که تابه‌حال در جمعیت وجود نداشته است به آن اضافه شود. جهش یک ژن به معنای تغییر تصادفی آن ژن است. در اینجا از روش جایگزینی جفتی^۱ مطابق شکل ۱۲ به‌منظور عملگر جهش استفاده شده است.

پاسخ اولیه	۲	۳۵	۱	...	۱۲	۱	۸	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	
پاسخ همسایگی	۲	۱۲	۱	...	۳۵	۱	۸	ویژه ۱۴
	۱	۵	۷	...	۲۲	۳	۱۲	

شکل ۱۲- نحوه انجام عملگر جهش

^۱Swap



شبه کد الگوریتم ژنتیک اعمال شده :

Initialize the algorithm parameters, including:

maximum number of generations (N_g), population size (N_p), probability of crossover (P_c) and probability of mutation (P_m); Generate random population based on the N_p ; Set the generation counter to zero;

Repeat

Set the individual counter to zero;

Repeat

If $random(0,1) < P_c$

Select two parent individuals using the roulette wheel selection method;

Apply the crossover operator to generate offspring

End (If)

If $random(0,1) < P_m$

Select a random individual

Apply the mutation operator to modify it

Evaluate the objective function for the mutated individual

End (If)

Counter ++;

Until counter $< N_p$;

Create merged population and save the N_p individuals for next generation.

generation ++;

Until generation $< N_g$;

Return the best solution found during the process;

۳. نتایج و بحث

هر ۳ مسئله با الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب نسخه R۲۰۱۹a حل شده و پاسخ آن‌ها به شرح زیر می‌باشد.

۳-۱. پاسخ‌های حل مدل‌های سه‌گانه با GA

جدول ۵- نتایج حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی برش میلگرد ۱۴ سگمنت ویژه با الگوریتم ژنتیک

برشها	پرتی	طول	دفعات تکرار	ردیف	برشها	پرتی	طول	دفعات تکرار	ردیف
$6 \times 0.39 + 3.16 + 3.21$	۰	۱۲	۱	۱	$0.39 + 3.61 + 3.76 + 4.24$	۰	۱۲	۱	۱۶
$4 \times 0.39 + 3.38 + 3.51 + 3.55$	۰	۱۲	۱	۲	$2 \times 0.39 + 3.62 + 3.68 + 3.92$	۰	۱۲	۱	۱۷
$3 \times 0.39 + 3.41 + 3.44 + 3.98$	۰	۱۲	۱	۳	$3.57 + 4.14 + 4.24$	۰.۰۵	۱۲	۱	۱۸
$3 \times 0.39 + 3.51 + 3.55 + 3.77$	۰	۱۲	۱	۴	$11 \times 0.39 + 3.67 + 4.04$	۰	۱۲	۱	۱۹



۲۰	۱	۱۲	۰	$۰.۳۹+۳.۶۶+۳.۸۶+۴.۰۹$	۵	۱	۱۲	۰	$۳ \times ۰.۳۹+۳.۵۱+۳.۵۵+۳.۷۷$
۲۱	۱	۱۲	۰.۰۱	$۳.۸۶+۴.۰۴+۴.۰۹$	۶	۱	۱۲	۰	$۲ \times ۰.۳۹+۲ \times ۳.۷۳+۳.۷۶$
۲۲	۱	۱۲	۰	$۰.۳۹+۳.۶۸+۳.۸۶+۴.۰۷$	۷	۱	۱۲	۰	$۲ \times ۰.۳۹+۳.۷+۲ \times ۳.۷۶$
۲۳	۱	۱۲	۰.۰۱	$۳.۷۹+۴.۰۴+۴.۱۸$	۸	۱	۱۲	۰	$۳ \times ۰.۳۹+۳ \times ۳.۶۱$
۲۴	۱	۱۲	۰	$۳.۸۶+۲ \times ۴.۰۷$	۹	۱	۱۲	۰	$۹ \times ۰.۳۹+۴.۰۷+۴.۳$
۲۵	۱	۱۲	۰.۰۱	$۱۰ \times ۰.۳۹+۴.۰۴+۴.۰۷$	۱۰	۱	۱۲	۰.۳۱	$۳.۵+۳.۸+۴.۳۹$
۲۶	۱	۱۲	۰.۰۲	$۱۱ \times ۰.۳۹+۳.۸۳+۳.۸۶$	۱۱	۱	۱۲	۰	$۱۰ \times ۰.۳۹+۳.۸+۴.۳$
۲۷	۱	۱۲	۰.۰۳	$۰.۳۹+۳ \times ۳.۸۶$	۱۲	۱	۱۲	۰	$۳.۹۵+۳.۹۸+۴.۰۷$
۲۸	۰.۶۷*	۱۲	۰.۲	۳۰×۰.۳۹	۱۳	۴	۱۲	۰	$۱۱ \times ۰.۳۹+۳.۸۱+۳.۹$
-	۳۰.۶۷	۳۶۷.۴	۰.۶۴	مجموع	۱۴	۱	۱۲	۰	$۲ \times ۰.۳۹+۳.۷۲+۳.۷۳+۳.۷۷$
					۱۵	۱	۱۲	۰	$۱۱ \times ۰.۳۹+۳.۷۶+۳.۹۵$

* الگوی برش شماره ۲۸ به نحوی برنامه ریزی شده که در هر سه رینگ، دو بار مورد استفاده قرار گیرد.

در فرآیند حل مدل مربوط به میلگرد شماره ۱۴ در سگمنت های ویژه با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک، در مجموع ۲۸ الگوی برش مختلف استخراج شد. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان کل ضایعات میلگرد در تولید یک رینگ برابر با ۰.۶۴ متر بوده است. با توجه به مصرف کل ۳۶۷.۴ متر میلگرد در هر رینگ، نسبت ضایعات به مصرف کل معادل ۰.۱۷٪ محاسبه می شود، که بیانگر عملکرد بسیار مطلوب الگوریتم در کاهش پرتی است.

جدول ۶- نتایج حاصل از حل مسئله بهینه سازی برش میلگرد ۱۰ سگمنت ویژه با الگوریتم ژنتیک

برشها	پرتی	طول	دفعات تکرار	ردیف	برشها	پرتی	طول	دفعات تکرار	ردیف
$۲ \times ۰.۵+۰.۹+۵ \times ۲.۰۲$	۰	۱۲	۱۰	۱	$۶ \times ۰.۵+۴ \times ۱.۳۵+۲ \times ۱.۸$	۰	۱۲	۲	۶
$۹ \times ۰.۵+۰.۹+۵ \times ۱.۳۲$	۰	۱۲	۲	۲	$۲ \times ۰.۵+۸ \times ۱.۳۵$	۱.۴	۱۱.۸	۷	۷
$۰.۵+۰.۹+۵ \times ۱.۳۲$	۰	۱۲	۳	۳	۲۴×۰.۵	۰	۱۲	۰.۲*	۸
$۲ \times ۰.۸۵+۰.۹+۱.۳۲+۴ \times ۲.۰۲$	۰	۱۲	۵	۴	مجموع	۱.۴۱	۳۶۱	۳۰.۲	-
$۸ \times ۰.۵+۳ \times ۱.۳۲+۳ \times ۱.۳۵$	۰	۱۲	۱	۵					

* الگوی برش شماره ۸ به گونه ای طراحی شده که در هر پنج رینگ یک بار مورد استفاده قرار گیرد.

پس از اجرای مدل بهینه سازی مربوط به میلگرد شماره ۱۰ در سگمنت های ویژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، هشت



الگوی برش مختلف به دست آمد. بر اساس نتایج حاصل از این مدل، مجموع ضایعات میلگرد برای تولید یک رینگ معادل ۱.۴۱ متر بوده است. با توجه به مصرف کل ۳۶۱ متر میلگرد در هر رینگ، نسبت ضایعات به کل مصرف برابر با ۰.۳۹٪ محاسبه می شود.

جدول ۷- نتایج حاصل از حل مسئله بهینه سازی برش میلگرد ۱۰ سگمنت نرمال با الگوریتم ژنتیک

برشها	پرتی	طول	دفعات تکرار	ردیف	برشها	پرتی	طول	دفعات تکرار	ردیف
$2 \times 0.5 + 3.62 + 3.66 + 3.72$	۰	۱۲	۱	۱	$0.85 + 5 \times 1.47 + 3.8$	۰	۱۲	۱	۱۷
$0.9 + 3.67 + 3.7 + 3.73$	۰	۱۲	۱	۲	$6 \times 1.35 + 3.09$	۰	۱۲	۱	۱۸
$0.5 + 3.73 + 3.79 + 3.98$	۰	۱۲	۱	۳	$3 \times 1.47 + 3.76 + 3.83$	۰	۱۲	۱	۱۹
$3.81 + 3.95 + 4.24$	۰	۱۲	۲	۴	$3 \times 1.35 + 3.86 + 4.09$	۰	۱۲	۲	۲۰
$0.5 + 1.32 + 3.29 + 3.38$	۰	۱۲	۱	۵	$4.05 + 2 \times 1.35 + 3.57 + 3.73$	۰	۱۲	۱	۲۱
$3.9 + 3.92 + 4.18$	۰	۱۲	۱	۶	$0.5 + 2 \times 3.76 + 3.98$	۰	۱۲	۱	۲۲
$3.44 + 4.14 + 4.42$	۰	۱۲	۱	۷	$0.5 + 3.61 + 3.86 + 4.04$	۰.۰۱	۱۲.۰۱	۱	۲۳
$0.5 + 3.21 + 3.9 + 4.39$	۰	۱۲	۱	۸	$2 \times 0.5 + 1.47 + 2.02 + 2 \times 3.76$	۰.۰۱	۱۲.۰۱	۱	۲۴
$3.8 + 3.9 + 4.3$	۰	۱۲	۱	۹	$0.5 + 2 \times 3.81 + 3.86$	۰.۰۲	۱۱.۹۸	۱	۲۵
$1.35 + 1.47 + 2.02 + 3.55 + 3.61$	۰	۱۲	۳	۱۰	$3 \times 1.35 + 3.86 + 4.04$	۰.۰۵	۱۱.۹۵	۱	۲۶
$3.86 + 2 \times 4.07$	۰	۱۲	۳	۱۱	$3 \times 0.5 + 2 \times 1.35 + 3.68$	۰.۱۶	۱۱.۹۲	۲	۲۷
$5 \times 1.32 + 3 \times 1.8$	۰	۱۲	۱	۱۲	$0.5 + 1.35 + 5 \times 2.02$	۰.۰۵	۱۱.۹۵	۱۰.۰۰	۲۸
$8 \times 0.5 + 3 \times 1.32 + 2 \times 2.02$	۰	۱۲	۴	۱۳	$0.5 + 7 \times 1.35 + 2.02$	۰.۱۲	۱۱.۹۷	۴.۰۰	۲۹
$6 \times 0.5 + 1.8 + 3.16 + 4.04$	۰	۱۲	۱	۱۴	$13 \times 0.5 + 4 \times 1.35$	۰.۰۵	۱۱.۹	۱	۳۰
$0.5 + 3 \times 1.35 + 3.41 + 4.04$	۰	۱۲	۱	۱۵	24×0.5	۰	۱۲	۱/۴۸*	۳۱
$2 \times 1.35 + 2.02 + 3.51 + 3.77$	۰	۱۲	۳	۱۶	مجموع	۰.۹۲	۶۴۱.۳۷	۵۳.۵	-

*الگوی برش شماره ۳۱ به گونه ای طراحی شده است که در هر ۴۸ رینگ، یک بار مورد استفاده قرار گیرد.

در نتیجه اجرای مدل بهینه سازی مربوط به میلگرد شماره ۱۰ در سگمنت های نرمال با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مجموعاً ۳۱ الگوی برش متفاوت استخراج گردید. طبق نتایج حاصل، میزان کل ضایعات میلگرد در تولید یک رینگ برابر با ۰.۹۲ متر محاسبه شده است. با توجه به مصرف کلی ۶۴۱.۳۷ متر میلگرد در هر رینگ، نسبت ضایعات به مصرف کل برابر با ۰.۱۴٪ خواهد بود.



۳-۲. صرفه اقتصادی کاهش پرتی میلگرد در سال

مطابق جدول، با اعمال این کاهش در ضایعات، هزینه سالیانه تولید رینگ‌های ویژه از حدود ۳۷ میلیارد تومان به ۳۵.۹ میلیارد تومان و رینگ‌های نرمال از ۲۲.۶ میلیارد تومان به ۲۱.۹ میلیارد تومان کاهش یافته است.

جدول ۸ - محاسبه صرفه اقتصادی در صورت اجرایی شدن الگوهای بدست آمده (هزینه ها به ریال)

۱۲۸۳	تعداد تولید رینگ ویژه در سال
۱۲۸۳	تعداد تولید رینگ نرمال در سال
۴۰۰,۰۰۰	هزینه هر کیلوگرم میلگرد (ریال)
۴۰۰,۰۰۰	هزینه هر کیلوگرم میلگرد ۱۴ (ریال)
۲۸۸,۳۶۸,۴۱۳	هزینه یک رینگ ویژه با پرتی ۳ درصد
۱۷۶,۱۶۲,۹۶۰	هزینه یک رینگ نرمال با پرتی ۳ درصد
۲۷۹,۹۶۹,۳۳۳	هزینه یک رینگ ویژه با پرتی ۰.۲۸ درصد
۱۷۱,۰۳۲,۰۰۰	هزینه یک رینگ نرمال با پرتی ۰.۱۴ درصد
۳۷۰,۰۷۲,۷۹۷,۱۱۱	هزینه رینگ‌های ویژه در سال با پرتی ۳ درصد
۲۲۶,۰۷۵,۷۹۸,۶۶۷	هزینه رینگ‌های نرمال در سال با پرتی ۳ درصد
۳۵۹,۲۹۳,۹۷۷,۷۷۸	هزینه رینگ‌های ویژه در سال با پرتی ۰.۲۸ درصد
۲۱۹,۴۹۱,۰۶۶,۶۶۷	هزینه رینگ‌های نرمال در سال با پرتی ۰.۱۴ درصد
۱۰,۷۷۸,۸۱۹,۳۳۳	اختلاف هزینه تولید سگمنت‌های ویژه
۶,۵۸۴,۷۳۲,۰۰۰	اختلاف هزینه تولید سگمنت‌های نرمال
۱۷,۳۶۳,۵۵۱,۳۳۳	مجموع اختلاف هزینه

در مجموع، کاهش پرتی مصرف میلگرد موجب صرفه‌جویی سالیانه‌ای بالغ بر ۱۷ میلیارد ریال در هزینه‌های خرید و مصرف میلگرد برای کارخانه تولید سگمنت سامانه انتقال آب سد لار می‌شود. با در نظر گرفتن دوره زمانی اجرای پروژه، پیش‌بینی می‌شود که این بهینه‌سازی در مجموع تا پایان پروژه، منجر به کاهش هزینه‌ای بیش از ۱۰ میلیارد تومان گردد. این صرفه‌جویی نقش بسزایی در کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری اقتصادی پروژه خواهد داشت.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، با هدف کاهش ضایعات میلگرد در فرآیند سبدهای قالب‌های سگمنت تونلی، مدلی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه شد. تحلیل نتایج نشان داد که با استفاده از این الگوریتم و طراحی الگوهای بهینه برش، میزان پرتی میلگرد به‌طور چشمگیری کاهش یافت؛ به‌طوری‌که پرتی میلگرد ۱۰ و ۱۴ در سگمنت‌های نرمال و ویژه از حدود ۳٪ به مقادیر کمتر از ۰.۵٪ رسید. این بهینه‌سازی موجب صرفه‌جویی سالیانه‌ای بالغ بر ۱۰.۷ میلیارد تومان در هزینه‌های پروژه گردید. با در نظر گرفتن استمرار تولید در سال‌های آینده، صرفه‌جویی تجمعی ناشی از این کاهش پرتی تا پایان پروژه، بیش از ۱۰ میلیارد تومان برآورد می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر اقتصادی قابل توجه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی در پروژه‌های عمرانی و صنعتی است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک با توانایی بالا در تولید پاسخ‌های نزدیک به بهینه و زمان اجرای مناسب، گزینه‌ای مناسب برای حل مسائل پیچیده‌ای مانند برش بهینه مصالح محسوب می‌شود.

در پژوهش‌های آتی، می‌توان تمرکز را بر موضوعاتی از جمله بهینه‌سازی سایر اقلام مصرفی در چرخه تولید سگمنت‌های تونلی (مانند سیمان، مصالح سنگی، افزودنی‌ها و...)، مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری نظیر کلونی مورچگان،



شبیه‌سازی تبرید، و الگوریتم گرگ خاکستری در حل مسائل مشابه، و همچنین بررسی روش‌های اصلاح طول برش میلگردها با هدف کاهش بیشتر پرتی بدون آسیب به کیفیت سبدهای آرماتور معطوف نمود. این مسیرها می‌توانند موجب توسعه جامع‌تر راهکارهای بهینه‌سازی و افزایش بهره‌وری در کل فرآیند تولید سگمنت شوند.

۱۲. مراجع

- [1]. Holland, J.H., *Genetic algorithms*. Scientific american, 1992. **267**(1): p. 66–73.
- [2]. Kennedy, J. and R. Eberhart. *Particle swarm optimization*. in *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. 1995. ieee.
- [3]. Ghaemi, M. and M.-R. Feizi-Derakhshi, *Forest optimization algorithm*. Expert systems with applications, 2014. **41**(15): p. 6676–6687.
- [4]. Atashpaz-Gargari, E. and C. Lucas. *Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition*. in *2007 IEEE congress on evolutionary computation*. 2007. Ieee.
- [5]. Salem, O., A. Shahin, and Y. Khalifa, *Minimizing cutting wastes of reinforcement steel bars using genetic algorithms and integer programming models*. Journal of construction engineering and management, 2007. **133**(12): p. 982–992.
- [6]. Santoso, B. and H. Haerudin, *Genetic algorithm approach for cutting stock problems in construction industries*. Int. J. Integr. Sci, 2023. **2**(7): p. 957–970.
- [7]. Khalifa, Y., O. Salem, and A. Shahin. *Cutting stock waste reduction using genetic algorithms*. in *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. 2006.
- [8]. Rácz, A., *A MILP model for one dimensional cutting stock problem with adjustable leftover threshold and cutting cost*. An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications, 2025. **15**(2): p. 215–224.
- [9]. Bertolini, M., D. Mezzogori, and F. Zammori, *Hybrid heuristic for the one-dimensional cutting stock problem with usable leftovers and additional operating constraints*. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2024. **15**(1): p. 149–170.
- [10]. Mougeotte, C., et al., *Novel approach to conducting blast load analyses using Abaqus/Explicit-CEL*. 2010.
- [11]. Masoumi Pasand, H., Rezaei Moghaddam, H., Hatami, N., & Mohammadi, R., *Application of hollow guide rods in segmental joints in mechanized tunneling: Case study of Mashhad Metro Line 3*. Journal of Construction Science and Technology. (In Persian), 2022. **3**(1): p. 1–10.
- [12]. Kwon, K., D. Kim, and S. Kim, *Cutting waste minimization of rebar for sustainable structural work: A systematic literature review*. Sustainability, 2021. **13**(11): p. 5929.
- [13]. Widjaja, D.D. and S. Kim, *Reducing Rebar Cutting Waste and Rebar Usage of Beams: A Two-Stage Optimization Algorithm*. Buildings, 2023. **13**(9): p. 2279.
- [14]. S. Rostami*, M.R.K.M., M. Nazari Sarem, *Optimizing Well Placement Via Metaheuristic Algorithms*. Journal of “Science and Technology Construction”, 2021: p. 55–69.
- [15]. Holland, J.H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. 1992.: MIT press.
- [16]. Taghavi Parsa, M.H., H. Sharifi, and P. Amirchoupani, *Optimization of Tunnel Reinforcements by Genetic Algorithm with the Aim of Replacing with Fibers*. AUT Journal of Civil Engineering, 2022. **6**(1): p. 35–50.