

# طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حسین نادرپور (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

علی خیرالدین، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

ماشالله عرب نائینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

E-mail: naderpour@semnan.ac.ir

## چکیده:

در این مقاله، بهینه‌سازی عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش وزن عرشه پل علاوه بر این که باعث صرفه‌جویی در مصالح مصرفی و در نتیجه هزینه‌های روسازه و زیرسازه می‌شود، تأثیر بسزایی در کاهش نیروی زلزله وارد بر پل دارد. در این بهینه‌سازی، متغیرهای گوناگون از جمله ابعاد اجزای مختلف سطح مقطع عرشه، تعداد تاندونها، تعداد کابل‌های هر تاندون، آرایش تاندونها، نسبت آرماتور کششی دال بالا و دال طره و میزان نیروی کشش جک در نظر گرفته شده است. قیود مشخصه بر روی این متغیرها بر اساس شرایط عملی ساخت و محدودیتهای آیین‌نامه‌ای است. قیود ضمنی برای طراحی نیز طبق ضوابط استاندارد AASHTO فرمول بندی می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن بیشتر قیود، با یک مساله بهینه‌سازی غیرخطی روبرو هستیم که حداقل‌های موضعی مختلفی دارد؛ به همین دلیل نیاز به روشی است که قادر به شناسایی حداقل کلی تابع هدف باشد. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک (GA) برای بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم، توانایی قابل توجهی در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده‌های دارد که روش‌های کلاسیک برای آنها یا قابل اعمال نبوده و یا در یافتن بهینه کلی قابل اطمینان نیستند. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی نشان می‌دهد، با یک بار فرمول‌بندی مساله طراحی پل و با کمک الگوریتم ژنتیک می‌توان در مدت زمان کوتاهی به پاسخ بهینه دست پیدا کرد. الگوریتم ژنتیک به طور موفقیت آمیزی در این بهینه‌سازی بکار گرفته شد و طرح بهینه به طور دقیق محاسبه گردید. عرشه بهینه به دست آمده که دارای حداقل وزن ممکن بوده، تمام ضوابط آیین‌نامه‌ای تعریف شده و حداقل و حداکثرهای اجرایی موردنظر طراح را رعایت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، پل پیش‌تنیده، پل جعبه‌ای، الگوریتم ژنتیک.

## ۱. مقدمه

پلها از مهم ترین سازه های مهندسی هستند، به طوریکه سالانه هزینه زیادی صرف طراحی و ساخت آنها می شود. بتن پیش تنیده یکی از محبوبترین و رایج ترین مصالح در ساخت پلها است. در این میان مقطع جعبه ای تک سلولی در هر دو جهت طولی و عرضی کارآمد است که این امر منجر به یک طرح اقتصادی برای بیشتر پلهای دهانه متوسط و بلند می شود [Hewson, 2003]. در طراحی عرشه پلها، خصوصاً پلهای بتنی وزن عرشه از جهات مختلف حائز اهمیت است: (۱) وزن عرشه، ارتباط مستقیم با نیروی زلزله وارد بر زیرسازه (پایه و فونداسیون) دارد.

(۲) با بلندتر شدن دهانه، وزن مرده پل حاکم بر طراحی می شود. (۳) کاهش وزن عرشه، باعث صرفه جویی در مصالح مصرفی و متعاقباً کاهش هزینه های روسازه می شود. (۴) و در نهایت، کاهش وزن روسازه باعث کاهش هزینه زیرسازه شامل پایه ها و فونداسیونها می شود. در طراحی پلهای بتنی پیش تنیده پس کشیده جعبه ای، متغیرهای مختلفی دخیل هستند و همه این متغیرها به یکدیگر وابسته اند که این مساله منجر به طرحهای قابل قبول بسیار متنوعی برای یک پل با دهانه و عرض مشخص می شود.

در رویکرد سنتی طراحی پلها، از روش سعی و خطا استفاده می شود. به این ترتیب، دستیابی به بهینه ترین طرح با این روش، که بیشتر به تجربه طراح بستگی دارد، امری زمانبر و طاقتفرسا است. در این موارد، بهینه سازی با الگوریتمهای جدید جایگزین مناسبی برای روشهای سنتی است که با صرف هزینه و زمان کمتر بهترین نتیجه را ارائه می دهد.

این رویکرد، فرآیند سعی و خطای مرسوم را به یک فرآیند نظاممند و کاملاً بر پایه کامپیوتر تبدیل می کند که تنها در چند ثانیه بهینه ترین طرح را طبق معیار دلخواه به دست می دهد. تحقیقات زیادی در نیم قرن گذشته در زمینه بهینه سازی سازه های بتنی انجام شده است. مرور مقالات مربوط به بهینه سازی سازه های بتنی توسط Sarma و

Adeli در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است [Sarma and Adeli, 1998].

همچنین در سال ۲۰۰۳ بررسی مقالات مربوط به بهینه سازی پلهای بتنی به وسیله Hassanain و Loov انجام شده است [Hassanain and Loov, 2003]. در سال ۱۹۶۶، Torres و همکاران بهینه سازی پلهای پیش تنیده را تحت بارگذاری AASHTO با یک روش خطی ارائه دادند [Torres et al. 1966]. بهینه سازی تیرهای پیش تنیده -شکل با سطح مقطع ثابت توسط Cohn و MacRae با استفاده از یک روش برنامه نویسی غیرخطی در سال ۱۹۸۴ صورت گرفت [Cohn and MacRae, 1984]. در سال ۱۹۸۶، Yu و همکاران طراحی بهینه پلهای پیش تنیده جعبه ای را بر اساس آیین نامه انگلیس مورد بررسی قرار دادند [Yu et al. 1986].

در سال ۱۹۹۳، بهینه سازی پلهای متشکل از دالهای بتن مسلح بر روی تیرهای -شکل پیش ساخته پیش کشیده توسط Lounis و Cohn با یک رویکرد بهینه سازی سه مرحله ای انجام شد [Cohn and Lounis, 1993]. طراحی بهینه پلهای بتن مسلح درجا با دهانه ساده توسط Fereig در سال ۱۹۹۶ با تقریب زدن مساله بهینه سازی غیرخطی به یک مساله بهینه سازی خطی و با روش Simplex اجرا گردید [Fereig, 1996].

در سال ۲۰۰۵، Sirca و Adeli یک روش بهینه سازی برای پلهای -شکل پیش ساخته پیش کشیده با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف ارائه دادند [Sirca and Adeli, 2005]. در سال ۲۰۱۰، بهینه سازی پلهای -شکل پیش ساخته پیش کشیده با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط Ayvaz و Aydin با در نظر گرفتن ۹ متغیر مختلف و ۲۸ قید انجام شد [Aydin and Ayvaz, 2010]. در سال ۲۰۱۱، Ahsan و همکاران بهینه سازی پلهای -شکل پیش تنیده را بر اساس آیین نامه AASHTO و با در نظر گرفتن ۱۴ متغیر مختلف، ۲۶ قید مشخصه و ۴۶ قید ضمنی انجام دادند. [Ahsan et al., 2011]

بیشتر محققان در بهینه سازی خود ابعاد سطح مقطع عرشه پل را به عنوان متغیر در نظر نگرفته اند و معمولاً از مقاطع استاندارد مانند

## طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک

توجه قرار گرفته است؛ در جهت طولی با یک تیر بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده سر و کار داریم، در صورتی که در جهت عرضی طراحی بر اساس ضوابط طراحی اعضای بتن مسلح صورت می‌گیرد. پس از فرمول‌بندی روابط تحلیل و طراحی پل در برنامه MATLAB، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. الگوریتم ژنتیک در زمان بسیار کوتاهی قادر به شناسایی حداقل کلی توابع است. در این بهینه‌سازی تعداد ۱۶ متغیر مختلف شامل ابعاد اجزای مختلف سطح مقطع عرشه، تعداد تاندونها، تعداد کابل‌های هر تاندون، آرایش تاندونها، نسبت آرماتور کششی دال بالا و دال طره و میزان نیروی کشش جک در نظر گرفته شده است. قیود مشخصه بر اساس شرایط عملی ساخت و محدودیتهای آیین‌نامه‌ای لحاظ شده است. قیود ضمنی برای طراحی نیز طبق ضوابط استاندارد آشتو فرمول‌بندی شده است.

### ۲. بار زنده ایران

طبق نشریه ۱۳۹ سازمان برنامه و بودجه، تحت عنوان «آیین‌نامه بارگذاری پلهای»، بار زنده نوع اول شامل دو قسمت است [نشریه ۱۳۹، ۱۳۷۹]. این بار که «بار عادی» نامیده می‌شود، در شکل ۱ نشان داده شده و به قرار زیر است:

\* یک کامیون به وزن ۴۰۰ کیلو نیوتن که ۳ متر جلو و عقب آن خالی است.

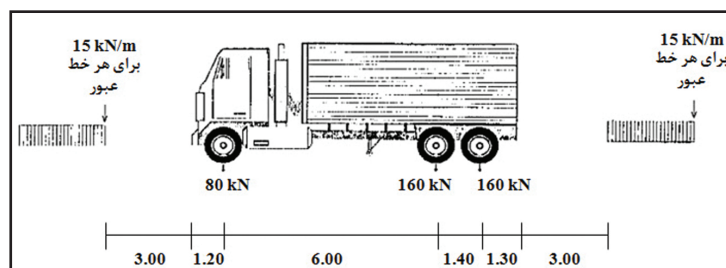
\* بار خطی یکنواخت به میزان ۱۵ کیلو نیوتن بر متر طول، به طولهای لازم که بحرانیترین اثر را ایجاد کند.

بار نوع دوم نیز معادل نیروی ۸۰ کیلو نیوتن است که سطح اثر آن

مقاطع استاندارد آشتو استفاده کرده‌اند. در صورتی که ابعاد اجزای مختلف مقطع عرشه مانند ضخامت دالها، طول طره و ... بر طرح بهینه تأثیر قابل توجهی دارد. مساله بهینه‌سازی پلهای بتنی پیش‌تنیده به دلیل دارا بودن قیود غیرخطی، یک مساله بهینه‌سازی غیرخطی است، ولی در بیشتر تحقیقات قبل از دهه اخیر، محققان مسائل بهینه‌سازی غیرخطی را با تقریب زدن به مسائل خطی تبدیل کرده‌اند و آنها را با روشهای بهینه‌سازی قدیمی اجرا کرده‌اند، که این امر باعث کاهش دقت در طرح بهینه نهایی می‌شود.

همچنین در اکثر تحقیقات گذشته برای افتهای پیش‌تنیدگی از مقادیر تقریبی که درصدی از کشش اولیه است، استفاده شده است که این مساله باعث کاهش دقت در طرح بهینه نهایی می‌شود. در صورتی که افتهای پیش‌تنیدگی توابعی ضمنی از متغیرهای مساله مانند مشخصات سطح مقطع تیر، تعداد تاندونها، تعداد کابل‌های هر تاندون، آرایش تاندونها و ... است. در نهایت، تمرکز محققان گذشته بیشتر بر روی پلهای I-شکل، T-شکل و یا مقاطع مستطیلی بوده است و تحقیقات بر روی بهینه‌سازی مقاطع جعبه‌ای امروزی که به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار ناچیز است.

در این مقاله، بهینه‌سازی وزن عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. عرشه مفروض به صورت مقطع جعبه‌ای تک سلولی بوده که بصورت درجا و با روش دهانه به دهانه اجرا میگردد. بارگذاری پل بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پلهای ایران (نشریه ۱۳۹) و طراحی آن طبق ضوابط آیین‌نامه (۲۰۰۲) AASHTO در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، طراحی پل در هر دو جهت طولی و عرضی مورد



شکل ۱. بار زنده عادی آیین‌نامه ایران

که در آن  $I$  ضریب ضربه،  $L$  طول دهانه بر حسب متر و  $h$  ارتفاع خاکریز روی پل بر حسب متر است. در پلهای ساده،  $L$  طول دهانه، در مورد تیرهای عرضی و دالها  $L$  طول دهانه مربوطه و در محاسبه اجزای طرهای،  $L$  طول طره است.

### ۳. فرمول بندی مساله

#### ۳-۱ تحلیل و طراحی عرشه

در تحلیل پل، بارگذاری بر اساس نشریه ۱۳۹ ایران صورت می‌گیرد. بار مرده پل، شامل وزن تیر و بار مرده اضافی شامل بار آسفالت و جدولها است. نیروی پیش‌تنیدگی نیز به صورت نیروی محوری و لنگر خمشی در طول تیر تغییر می‌کند.

همچنین افتهای کوتاه مدت و بلند مدت نیروی پیش‌تنیدگی به صورت دقیق محاسبه شده است. الزامات طراحی نیز طبق ضوابط استاندارد AASHTO اعمال می‌شود [AASHTO, 2002]. مقاطع

#### جدول ۲. ثابتهای طراحی

۵۰ m	دهانه پل ( $L$ )
۱۲ m	عرض عرشه ( $w$ )
۸۰ cm	ضخامت دیافراگم ( $D$ )
۴۰۰ kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت ۲۸ روزه بتن ( $f'_c$ )
۲۴۰۰ kg/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص بتن ( $\gamma_c$ )
کابلهای ۷ رشته‌ای با شل شدگی کم	نوع فولاد پیش‌تنیدگی
۱۵ mm	سایز کابل‌های پیش‌تنیدگی
۱۸۶۰ N/mm <sup>2</sup>	مقاومت کششی فولاد پیش‌تنیدگی ( $f_{pu}$ )
$0.9f_{pu}$	تنش تسلیم فولاد پیش‌تنیدگی ( $f_y^*$ )
۷۸۵۰ kg/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص فولاد پیش‌تنیدگی ( $\gamma_{ps}$ )
Freyssinet C-Range	سیستم مهار پس‌کشیدگی
۴۰۰۰ kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت تسلیم فولاد معمولی ( $f_y$ )
۷۸۵۰ kg/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص فولاد معمولی ( $\gamma_s$ )
بار نوع اول و دوم نشریه ۱۳۹ ایران	بار زنده
۷۰ cm	ارتفاع جانپناه
۴۵ cm	عرض جانپناه
۸ cm	ضخامت آسفالت
۲۲۰۰ kg/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص آسفالت

مربعی به ابعاد ۳۰ سانتیمتر بوده و موقعیت آن در سطح سواره‌رو متغیر است. آیین‌نامه ایران عرض هر خط عبور محاسباتی را ۳ متر منظور می‌کند. در هر خط عبور فقط یک کامیون قرار می‌گیرد و حداکثر تعداد آن به تعداد خطهای عبور محدود می‌شود. در مورد پلهای عریض در صورتی که به منظور حصول شرایط بحرانی، خطوط متعدد بارگذاری شوند، باید یک ضریب کاهش مربوط به احتمال همزمانی بارها در نیروهای داخلی اعمال گردد. این ضرایب بر اساس نشریه ۱۳۹ مطابق جدول ۱ است.

#### جدول ۱. ضرایب کاهش بار زنده

تعداد خطوط بارگذاری شده	۱	۲	۳	۴ به بالا
ضریب کاهش	۰/۹	۰/۷۵		

اثر بار عادی باید در ضریبی به نام ضریب دینامیکی (ضربه) ضرب شود که مقدار آن طبق آیین‌نامه ایران از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I = 1.3 - 0.005L - 0.15h > 1 \quad (1)$$

## طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک

بحرانی، به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

تاندونها، نسبت آرماتور کششی دال بالا و دال طره و میزان نیروی کشش جک (بر حسب درصدی از تنش تسلیم فولاد پیش‌تندگی) در نظر گرفته شده است.

این متغیرها به همراه نوع آنها در جدول ۳ مشخص گردیده است. همچنین یک مقطع جعبه‌ای نمونه نیز به همراه برخی از این متغیرها در شکل ۲ نشان داده شده است.

آرایش تاندونها به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است، زیرا آرایش تاندونها با تغییر پروفیل طولی تاندونها، بر روی تنشهای خمشی پیش‌تندگی و افتهای پیش‌تندگی در مقاطع مختلف تأثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد.

پروفیل طولی تاندونها به صورت سهمی در نظر گرفته شده است. سیستم مهار پس کشیدگی مورد استفاده، سیستم مهار Freyssinet C-Range است [Freyssinet, 1999]. چیدمان افقی و قائم

- مقطع ۱: وسط دهانه
- مقطع ۲: مقطع بعد از ناحیه انتقال که طبق آشتو مساوی ۵/۱ برابر عمق عرشه فرض می‌شود.
- مقطع ۳: مقطع در محل حداکثر نیروی پیش‌تندگی
- مقطع ۴: مقطع بلافاصله بعد از دیافراگم
- مقطع ۵: مقطع ابتدا

### ۲-۳ ثابتها و متغیرهای طراحی

ثابت‌های طراحی عبارتند از دهانه پل، عرض عرشه، مشخصات مصالح، سیستم مهار و کابل‌های پسکشیدگی، بار زنده ایران، بارهای مرده اضافی. ثابت‌های طراحی در جدول ۲ نشان داده شده است.

در این بهینه‌سازی، تعداد ۱۶ متغیر مختلف شامل ابعاد اجزای مختلف سطح مقطع عرشه، تعداد تاندونها، تعداد کابل‌های هر تاندون، آرایش

جدول ۳. متغیرهای طراحی به همراه قیود مشخصه مربوطه

متغیر طراحی	قیود مشخصه
$1.5 \leq h \leq 4$	ارتفاع تیر (m)
$17.5 \leq T_t \leq 35$	ضخامت بال بالا (cm)
$17.5 \leq T_b \leq 30$	ضخامت بال پایین (cm)
$25 \leq T_w \leq 55$	ضخامت جان (cm)
$2 \leq L_c \leq 3$	طول طره (m)
$17.5 \leq T_c \leq 30$	ضخامت انتهای طره (cm)
$35 \leq T_s \leq 50$	ضخامت ابتدای طره (cm)
$50 \leq L_x \leq 200$	طول ماهیچه (cm)
$25 \leq L_y \leq 100$	عرض ماهیچه (cm)
$1 \leq N_s \leq 25$	تعداد کابل‌های هر تاندون
$1 \leq N_T/2 \leq 10$	تعداد تاندونهای یک جان
$y_{min} \leq y_1 \leq 100$	پایین‌ترین محل مهار (cm)
$1 \leq N_A \leq 2$	تعداد مهار در هر ردیف
$75\% \leq \eta \leq 90\%$	نیروی کشش جک (درصدی از $f_y^*$ )
$\rho_{min} \leq \rho_s \leq \rho_{max}$	نسبت آرماتور دال بالا
$\rho_{min} \leq \rho_c \leq \rho_{max}$	نسبت آرماتور طره

$y_{min}$ : حداقل فاصله قائم لبه ای مهار

\* قیود مشخصه طول طره ( $L_c$ ): حد پایین طول طره ۲ متر و حد بالای آن ۳ متر در نظر گرفته شده است. زیرا طبق استاندارد آشتو طول طره باید کمتر از نصف فاصله جانها باشد.

\* قیود مشخصه ضخامت انتهای طره ( $T_c$ ): این ضخامت برای جایگذاری آرماتورها و کنترل خیز انتهای طره از ۵/۱۷ تا ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

\* قیود مشخصه ضخامت ابتدای طره ( $T_s$ ): برای کنترل خیز و تحمل تنش خمشی و برشی بار چرخ کامیون، این ضخامت از ۳۵ تا ۵۰ سانتیمتر متغیر فرض شده است.

\* قیود مشخصه ابعاد ماهیچه ( $L_p$  و  $L_x$ ): برای کنترل خیز دال بالا و تحمل تنش خمشی، بعد افقی ماهیچه از ۵/۰ تا ۲ متر متغیر است. عرض ماهیچه نیز از ۲۵/۰ تا ۱ متر فرض شده است.

\* قیود مشخصه تعداد کابلهای هر تاندون ( $N_p$ ): یک تاندون از چند کابل ۷ رشتهای تشکیل می شود، برای این پل، طبق کاتالوگ شرکت Freyssinet فرض می شود که تعداد کابلهای ۷ رشتهای از ۱ تا ۲۵ عدد متغیر هستند.

\* قیود مشخصه تعداد تاندونهای یک جان ( $N_j/2$ ): تعداد تاندونها ارتباط مستقیم با نیروی پیش تنیدگی دارند. فرض می شود که تاندونها بین ۱ تا ۱۰ عدد برای هر جان، متغیر باشد.

\* قیود مشخصه پایتترین محل مهار ( $Y_1$ ): حد پایین این متغیر طبق حداقل فاصله مورد نیاز برای جک و حداقل فاصله لبه ای

تاندونها به ابعاد قسمتهای مختلف تیر، قطر غلاف و فاصله آنها، فاصله مهارها و فاصله لبه ای مهارها بستگی دارد که همه این موارد نیز تابعی از متغیر تعداد کابلهای هر تاندون است.

### ۳-۳ قیود مشخصه

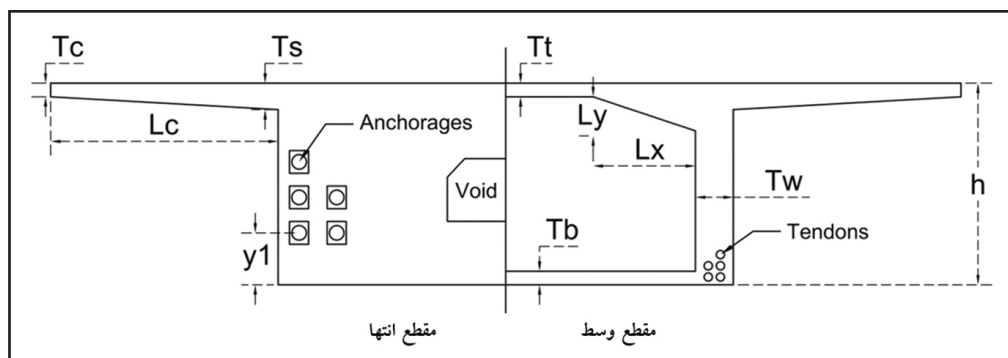
قیود مشخصه حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی هستند که بر اساس شرایط عملی ساخت و محدودیتهای آیین نامه ای در نظر گرفته می شود. این قیود در جدول ۳ مشخص شده اند و به قرار زیرند:

\* قیود مشخصه ارتفاع تیر ( $h$ ): حد پایین ارتفاع تیر ۵/۱ متر لحاظ شده تا قادر به تحمل تنشهای خمشی باشد و حداکثر ۴ متر در نظر گرفته شده تا از لحاظ زیبایی پل مناسب باشد.

\* قیود مشخصه ضخامت بال بالا ( $T_p$ ): حداقل ضخامت بال بالا ۵/۱۷ سانتیمتر فرض شده تا محل کافی برای آرماتورها تأمین شود و بتواند بار چرخ را به خوبی انتقال دهد. حد بالای این ضخامت ۳۵ سانتیمتر فرض شده است.

\* قیود مشخصه ضخامت بال پایین ( $T_b$ ): حد پایین این ضخامت مانند بال بالا لحاظ شده است و حد بالای آن ۳۰ سانتیمتر فرض می شود.

\* قیود مشخصه ضخامت جان ( $T_w$ ): حداقل ضخامت جان، ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده تا بتوان داکتها و فولاد برشی جان را با یک کاور مناسب در آن جا داد و حداکثر آن برابر ۵۰ سانتیمتر فرض شده است.



شکل ۲. مقطع جعبه ای نمونه و متغیرهای مربوطه

## طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مهار ( $Y_{MIN}$ ) و حد بالای آن ۱۰۰ سانتیمتر فرض شده است.

\* قیود مشخصه تعداد مهار در هر ردیف ( $N_A$ ): برای تغییر آرایش تاندونها و تغییر نیروی پیش‌تنیدگی در مقاطع مختلف این متغیر از ۱ تا ۲ عدد متغیر فرض شده است.

\* قیود مشخصه نیروی کشش جک ( $\eta$ ): این متغیر میزان کشش کابلها به وسیله جک را مشخص می‌کند که بر حسب درصدی از تنش تسلیم فولاد پیش‌تنیدگی است. حداکثر این مقدار طبق آیین‌نامه آشتو ۹/۰ تنش تسلیم فولاد پیش‌تنیدگی بوده و حد پایین را برای استفاده بهینه از کابلها، ۷۵/۰ در نظر می‌گیریم.

\* قیود مشخصه نسبت آرماتور دال بالا و دال طره ( $\rho_C, \rho_S$ ): طبق آیین‌نامه این مقدار باید بیشتر از  $\rho_{min}$  و کمتر از  $\rho_{max}$  باشد.

### ۳-۴ قیود ضمنی

این قیود که طبق استاندارد (AASHTO 2002) به دست می‌آیند، الزامات عملکردی پل را کنترل می‌کنند. قیود ضمنی در نظر گرفته شده در این مقاله بصورت زیر هستند:

\* قیود تنش خمشی: این قیود، تنش فشاری و کششی را در تارهای بالا و پایین بتن کنترل می‌کند:

$$\sigma_L \leq \sigma \leq \sigma_U \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{F.e}{S} + \frac{M}{S} \quad (3)$$

در روابط بالا  $\sigma$  تنش محاسبه شده در مقاطع مختلف و در مراحل مختلف بارگذاری،  $\sigma_L$  تنش فشاری مجاز،  $\sigma_U$  تنش کششی مجاز،  $F$  نیروی پیش‌تنیدگی،  $A$  مساحت سطح مقطع تیر،  $e$  خروج از مرکزیت تاندونها،  $S$  اساس مقطع تیر و  $M$  ممان ناشی از ناشی از بارهای سرویس است. این قیود در مقاطع ۱ تا ۵ که در بخش ۱-۳ معرفی شدند، در تارهای بالا و پایین مقطع و در مراحل مختلف بارگذاری در نظر گرفته شده‌اند. این مراحل به ترتیب به قرار زیر است:

۱- مرحله انتقال: در این مرحله، نیروی جک به تاندونها اعمال می‌شود. افتهای کوتاه مدت اتفاق می‌افتند و عرشه تحت نیروی

پیش‌تنیدگی و وزن خود است.

۲- مرحله ۲: در این مرحله، افتهای بلندمدت اتفاق افتاده‌اند و عرشه تحت نیروی پیش‌تنیدگی، وزن عرشه و بار مرده اضافی شامل جداول و آسفالت است.

۳- مرحله بهره‌برداری: در این مرحله، بار زنده کامیون به پل اعمال می‌شود.

۴- مرحله ۴: آیین‌نامه AASHTO مقرر می‌دارد که تنش تحت بار زنده و نصف بار مرده و نصف بار پیش‌تنیدگی نیز کنترل گردد.

• قیود تنش در فولاد پیش‌تنیدگی: تنش در تاندونها به دلیل افتهای کوتاه مدت و بلند مدت در مقاطع مختلف و مراحل بارگذاری مختلف تغییر می‌کند. طبق آشتو، قیود مربوط به کنترل تنش در تاندونها در مراحل و مقاطع مختلف به صورت زیر است:

$$F_{5i} \leq 0.7f_{pu}A_s \quad (4)$$

$$F_{3i} \leq 0.83f_y^*A_s \quad (5)$$

$$F_{3e} \leq 0.8f_y^*A_s \quad (6)$$

• به طوری که  $F_{5i}$  و  $F_{3i}$  به ترتیب نیروی تاندونها در مقاطع ۵ و ۳ بعد از افتهای آنی،  $F_{3e}$  نیروی تاندونها در مقطع ۳ بعد از افتهای بلندمدت،  $A_s$  مساحت فولاد پیش‌تنیدگی،  $F_{pu}$  و  $F_y^*$  به ترتیب مقاومت نهایی و تنش تسلیم فولاد پیش‌تنیدگی هستند.

به دلیل دقت بیشتر به جای استفاده از مقادیر تقریبی افتها، افتهای آنی و بلندمدت با استفاده از فرمولهای آیین‌نامه محاسبه شده‌اند. زیرا افتهای پیش‌تنیدگی نیز تابعی ضمنی از متغیرهای طراحی هستند. افتهای آنی شامل افت اصطکاکی، سرخوردگی در گیره و کوتاه‌شدگی الاستیک و افتهای بلندمدت شامل افت ناشی از انقباض بتن، خزش بتن و شل‌شدگی فولاد همگی در این مقاله در نظر گرفته شده‌اند.

• قیود مقاومت خمشی نهایی: این قیود بر اساس طراحی به روش مقاومت نهایی و به صورت زیر است:

$$M_u \leq \phi M_n \quad (7)$$

به طوری که  $M_n$  ممان بارهای نهایی و  $\phi M_n$  مقاومت خمشی

طراحی است. و طره بر اساس ضوابط مقاومت خمشی نهایی در نظر گرفته شده

این قیود در مقاطع ۱ تا ۴، بعد از وقوع افتهای بلندمدت و تحت

ترکیبات بارگذاری زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$M_u \leq \phi M_n \quad (14)$$

• قید مقاومت برشی نهایی دال طره: این قید به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$M_{u1} = 1.3(M_d + M_{si}) + M_{ps} \quad (8)$$

$$M_{u2} = 1.3(M_d + M_{si} + 1.67M_L) + M_{ps} \quad (9)$$

$$V_u \leq \phi V_c \quad (15)$$

معمولا در دالها ضخامت طوری انتخاب می‌شود که نیاز به فولاد برشی نباشد. به همین دلیل برش تنها به وسیله بتن تحمل می‌شود.

به طوری که  $M_{u1}$  و  $M_{u2}$  ممان بارهای نهایی،  $M_d$ ،  $M_{si}$  و  $M_L$  و

$M_{ps}$  به ترتیب ممانهای ناشی از بار مرده، بار مرده اضافی، بار زنده و نیروی پیش‌تندگی است.

• قید خیز دال طره: طبق آیین‌نامه، خیز اعضای طره باید باید به  $\frac{1}{300}$  دهانه طره محدود شود:

• قیود حداکثر فولاد پیش‌تندگی: قیود حداکثر فولاد پیش‌تندگی به صورت زیر است:

$$\Delta \leq \frac{L}{300} \quad (16)$$

$$\omega \leq \omega_u \quad (10)$$

### ۳-۵ تابع هدف

تابع هدف یا شایستگی، تابعی است که قصد به حداقل رساندن آن را داریم. هدف از این بهینه‌سازی به حداقل رساندن وزن عرشه پل پیش‌تندیده جعبه‌ای است.

به طوری که  $\omega$  شاخص فولاد و  $\omega_u$  حد بالای شاخص فولاد است.

• قیود حداقل فولاد پیش‌تندگی: قیود حداقل فولاد پیش‌تندگی به صورت زیر است:

$$1.2M_{cr}^* \leq \phi M_n \quad (11)$$

بنابراین تابع هدف فرض شده در این مقاله، وزن واحد طول عرشه بصورت زیر است:

به طوری که  $M_{cr}^*$  ممان ترک خوردگی است.

$$F = \frac{V_c \cdot \gamma_c + V_s \cdot \gamma_s + V_{ps} \cdot \gamma_{ps}}{L} \quad (17)$$

به طوری که وزن واحد طول عرشه، طول پل،  $V_c$ ،  $V_s$  و  $V_{ps}$  به ترتیب حجم بتن، حجم آرماتورها و حجم فولاد پیش‌تندگی است.

• قید خیز: طبق آیین‌نامه، خیز تحت بارهای مرده، زنده و پیش‌تندگی باید به  $\frac{1}{800}$  طول تیر محدود شود:

$$\Delta \leq \frac{L}{800} \quad (12)$$

به طوری که  $\Delta$  خیز بلندمدت تحت تمام بارها با در نظر گرفتن اثر خزش است.

### ۴. روند بهینه‌سازی

مساله بهینه‌سازی پل مورد نظر با تعریف ۱۶ متغیر، ۳۲ قید مشخصه، ۱۰۵ قید ضمنی و معرفی تابع هدف مشخص گردید. تعداد زیادی متغیر و قید در این مقاله در نظر گرفته شده است.

• قیود مقاومت برشی نهایی: این قیود به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s) \quad (13)$$

تابع هدف و بیشتر قیود ضمنی توابعی غیرخطی از متغیرهای طراحی هستند؛ در نتیجه این بهینه‌سازی، یک مساله بهینه‌سازی غیرخطی است که حداقل‌های موضعی مختلفی دارد.

که در آن  $V_u$  برش بارهای نهایی،  $V_c$  مقاومت برشی اسمی بتن و  $V_s$  مقاومت برشی اسمی فولاد برشی است.

این قیود در مقاطع ۲ تا ۴ و در مقطع یک چهارم دهانه در نظر گرفته شده است.

به همین دلیل نیاز به روشی است که قادر به شناسایی حداقل کلی

• قیود مقاومت خمشی دالها: طراحی هر سه دال بالا، پایین



## طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک

روش بهینه‌سازی GA بر پایه تئوری داروین در مورد تکامل و قانون طبیعی بقای بهترینها<sup>۲</sup> استوار است. GA یک روش بهینه‌سازی تکاملی است که به جای شروع از یک نقطه از یک مجموعه جواب اولیه (جمعیت<sup>۵</sup> اولیه) استفاده می‌کند.

هر جواب<sup>۶</sup>، مجموعه‌ای از متغیرها است که تمامی قیود را ارضا می‌کند و نمایانگر یک طرح قابل قبول است.

جوابها بصورت رشته‌های باینری (دودویی) کدنویسی می‌شود تا به وسیله GA قابل کاربرد باشد.

هر متغیر یک کروموزوم<sup>۷</sup> و هر جواب که مجموعه‌ای از کروموزومها است، یک فرد<sup>۸</sup> نامیده می‌شود. تعدادی از افراد تشکیل یک نسل<sup>۹</sup> را میدهند.

در ابتدا، یک جمعیت تصادفی از افراد که قیود را ارضا می‌کند، تولید می‌شود. این جمعیت اولیه به عنوان اولین نسل در نظر گرفته می‌شود. سپس شایستگی<sup>۱۰</sup> هر فرد ارزیابی می‌شود.

شایستگی معمولاً مقدار تابع هدف در مساله بهینه‌سازی است. در ادامه، الگوریتم ژنتیک از سه عملگر اصلی شامل انتخاب (تولید مثل)<sup>۱۱</sup>، ترکیب (ادغام)<sup>۱۲</sup> و جهش<sup>۱۳</sup> که از تکامل طبیعی الهام گرفته شده است برای تولید نسلها و بهبود جوابها استفاده می‌کند.

### ۴-۱ عملگر انتخاب

در فرآیند انتخاب یا تولید مثل افراد با شایستگی کم حذف شده و با کپیهایی از شایسته‌ترین افراد در استخر تولید مثل<sup>۱۴</sup> جایگزین می‌شوند.

در مساله بهینه‌سازی حاضر که هدف حداقل کردن تابع هدف یعنی وزن عرشه است، شایسته‌ترین افراد آنهایی هستند که مقدار وزن کمتری دارند.

افراد حاضر در استخر تولید مثل به عنوان والدین<sup>۱۵</sup> شناخته می‌شوند. عملگر انتخاب، جواب جدیدی تولید نمی‌کند.

برای رسیدن به جواب بهینه، افراد باید تغییر پیدا کنند و افراد جدیدی باید تولید شود. دو عملگر دیگر الگوریتم ژنتیک یعنی ترکیب و

با در نظر گرفتن متغیرها و قیود مختلف باشد. در این بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک که در زمان کوتاهی قادر به یافتن حداقل کلی است، استفاده شده است.

مساله بهینه‌سازی به‌مراه مراحل تحلیل و طراحی تقریباً در ۱۰۰۰ خط در برنامه MATLAB کدنویسی شد و سپس با اجرای الگوریتم ژنتیک پس از چند ثانیه طرح بهینه شامل وزن بهینه و متغیرهای مربوط به طرح بهینه به دست آمد.

در ادامه، الگوریتم ژنتیک و نحوه عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

طی دهه‌های اخیر، روشهای بهینه‌سازی خطی و غیرخطی بسیاری برای حل مسائل بهینه‌سازی توسعه داده شده‌اند.

برخی از این روشها با حرکت در یک جهت وابسته به شیب موضعی تابع هدف به دنبال یک حداقل موضعی می‌گردند؛ در حالی که برخی روشهای دیگر با اعمال شرایط لازم مرتبه اول و مرتبه دوم و با حل یک مجموعه معادلات غیرخطی به جستجوی یک حداقل موضعی می‌پردازند.

برای بهینه‌سازی سازه‌های بزرگ با تعداد زیادی متغیر و قید، این روشها به دلیل حجم محاسبات بالا و گیر افتادن در حداقل‌های موضعی، ناکارآمد می‌شوند.

بنابراین نیاز به یک الگوریتم بهینه‌سازی قوی است تا قادر باشد نقطه بهینه کلی<sup>۲</sup> تابع هدف را در یک زمان کوتاه و بدون به دام افتادن در حداقل‌های موضعی شناسایی کند [Adeli and Sarma 2006].

الگوریتم ژنتیک (GA)<sup>۳</sup> بمنظور بهینه‌سازی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است [Goldberg, 1989; Holland, 1975].

این الگوریتم در مهندسی سازه به طور وسیعی توسط محققان مختلف برای بهینه‌سازی سازه‌های گوناگون بکار رفته است [Koumousis and Arsenis, 1998; Rajeev and Krishnamoorthy, 1998; Soh and Yang, 1998; Yeh, 1999].

الگوریتم ژنتیک در دهه ۱۹۶۰ به وسیله جان هالند معرفی شد.

جهش مسئول تولید جوابهای جدید هستند.

## ۲-۴ عملگر ترکیب

پس از مرحله انتخاب که جمعیتی از بهترین افراد انتخاب می‌شوند، نوبت به عملگر ترکیب می‌رسد. در مرحله ترکیب یا ادغام، از طریق یک فرآیند تصادفی تعدادی از بیتها بین دو والد مبادله می‌شود تا دو فرزند جدید تولید شود.

در ابتدا، دو والد از استخر تولید مثل به طور تصادفی انتخاب شده و سپس بعضی از بیتها به طور تصادفی بین این دو رشته معاوضه می‌شود.

روشهای مختلفی برای ترکیب موجود است که رایجترین آنها ادغام به روش تک نقطه‌ای<sup>۱۷</sup>، دو نقطه‌ای<sup>۱۸</sup> و یکنواخت<sup>۱۹</sup> است.

## ۳-۴ عملگر جهش

جهش عملگر بسیار مهمی در الگوریتم ژنتیک است؛ زیرا این عملگر از به دام افتادن در حداقلهای موضعی جلوگیری می‌کند و تضمین می‌کند که همه فضای جستجو مورد بررسی قرار بگیرد. در طی مراحل انتخاب و ترکیب، ممکن است همه رشته‌ها در محلهای معینی یکسان باشند.

بنابراین، بعضی از جوابها با استفاده تنها از دو عملگر انتخاب و ترکیب تولید نخواهد شد.

در چنین وضعیتی، عملگر جهش با تغییر برخی از بیتهای رشته‌ها به طور تصادفی بر اساس نرخ جهش این مشکل را حل می‌کند.

نرخ جهش باید مقدار خیلی کمی اختیار شود؛ زیرا نرخ یا احتمال جهش بالا رشته‌های شایسته‌تر را نابود می‌کند. فلوجارت ساده‌های از نحوه عملکرد و مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

مزایای الگوریتم ژنتیک در مقایسه با الگوریتمهای بهینه‌سازی سنتی عبارتند از:

\* GA تنها از اطلاعات تابع هدف استفاده می‌کند، در حالی که روشهای سنتی نیازمند اطلاع از مشتقها یا اطلاعات کمکی دیگری

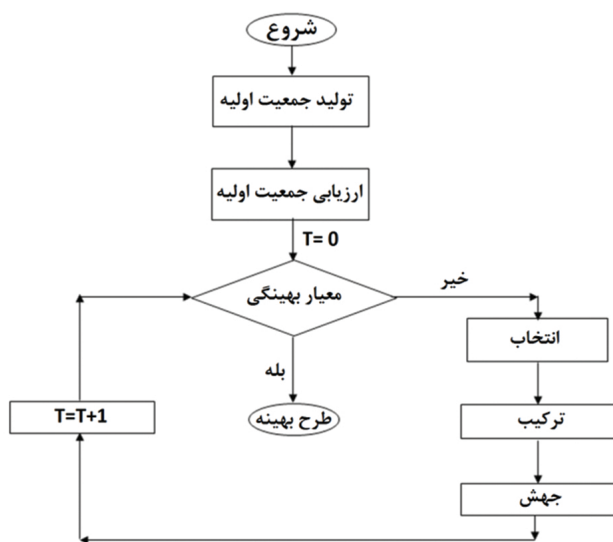
هستند.

\* الگوریتم ژنتیک از جمعیتی از جوابها بجای یک نقطه منفرد استفاده می‌کند.

این مشخصه، GA را به یک الگوریتم جستجوی سراسری که احتمال محبوس شدن در حداقلهای موضعی را کاهش می‌دهد، تبدیل می‌کند.

\* GA بسیار سریعتر از سایر روشهای بهینه‌سازی سنتی است.

\* از آنجاییکه هر کروموزوم مستقل از سایر کروموزومها است، GA می‌تواند از مزایای پردازش موازی بهره‌گیرد.



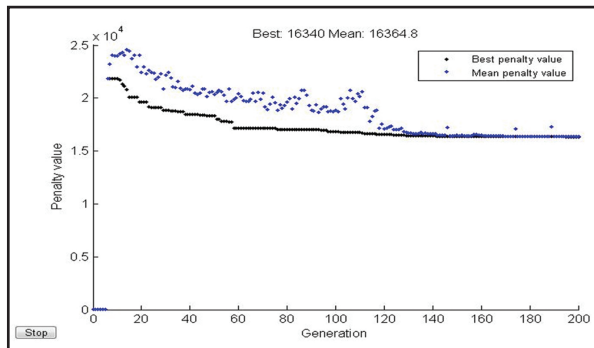
شکل ۳. فلوجارت ساده نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک

## ۵. نتایج

در بخشهای اخیر نحوه فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی و عملکرد الگوریتم ژنتیک تشریح شد. پوش ممان خمشی و پوش برش ناشی از بار زنده آیین‌نامه ایران برای پل مفروض در شکلهای ۴ و ۵ رسم شده است. رسم این پوشها بر اساس سه خط بارگذاری شده با در نظر گرفتن ضریب کاهش و ضریب ضربه انجام شده است. حداکثر ممان که در وسط دهانه اتفاق می‌افتد برابر با ۱۹۴۲۶ کیلونیوتن.متر است. نمودار پوش ممان خمشی بسیار نزدیک به سهمی است. همچنین

## طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک

می‌شود، با رسیدن تعداد نسلها به ۲۰۰ نسل تقریباً جوابها به بهینه کلی همگرا شده‌اند.

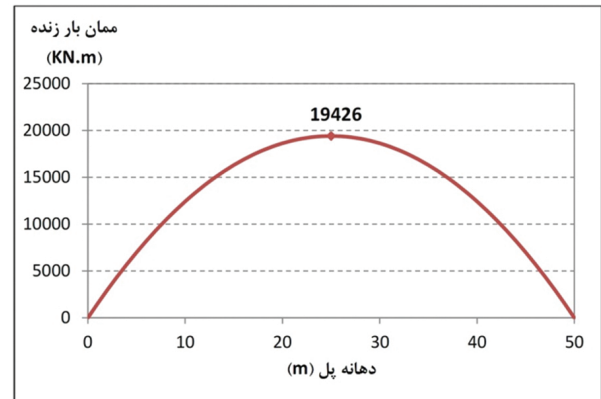


شکل ۶. همگرایی الگوریتم ژنتیک به بهینه کلی

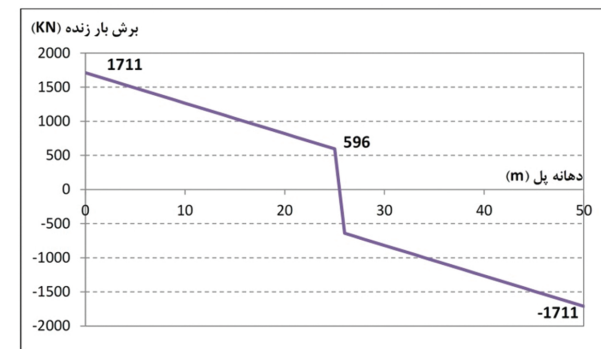
متغیرهای مربوط به طرح عرشه بهینه در جدول ۴ نشان داده شده است. مقطع بهینه به همراه برخی از متغیرها و آرماتورهای قسمتهای مختلف در شکل ۷ ترسیم شده است. همان طور که در جدول ۴ و شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقادیر تمامی متغیرها در محدوده مشخص شده توسط قیود مشخصه جدول ۳، قرار دارند. تعداد ۹ تاندون که هر یک شامل ۱۹ کابل ۷ رشته‌ای است، برای طرح بهینه به دست آمده است.

بنابراین در مجموع تعداد ۳۴۲ کابل پیش‌تندگی برای کل مقطع محاسبه شده است. مهارها در دو ستون قرار گرفته‌اند، در حالیکه تاندونها در یک ستون در جان مقطع قرار گرفته‌اند تا ضخامت جان در حداقل مقدار یعنی تقریباً ۲۷ سانتیمتر حفظ شود و وزن عرشه کاهش پیدا کند. ارتفاع مقطع بهینه حدود ۵/۲ متر و ضخامتهای بال بالا، بال پایین و انتهای کنسول تقریباً ۲۱ سانتیمتر محاسبه شده است. طول طره ۵/۲ متر و ضخامت ابتدای آن حدوداً ۴۹ سانتیمتر به دست آمده است. نیروی کشش جک نیز ۸۳ درصد تنش تسلیم فولاد پیش‌تندگی محاسبه شده است، به طوریکه از حد بالای آن یعنی ۹۰ درصد کمتر است که این مساله به دلیل ارضا قیود مربوط به کنترل تنش در فولاد پیش‌تندگی است. فولادهای برشی نیز در راستای طولی پل در شکل ۸ نشان داده شده است.

حداکثر برش در تکیه‌گاه‌ها برابر با ۱۷۱۱ کیلونیوتن و حداکثر برش در وسط دهانه برابر با ۵۹۶ کیلونیوتن است. بر اساس پوشهای ممان و برش، لنگر خمشی و نیروی برشی در مقاطع مختلف محاسبه شده و برای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴. پوش ممان بر اساس بار زنده ایران (کیلونیوتن.متر)

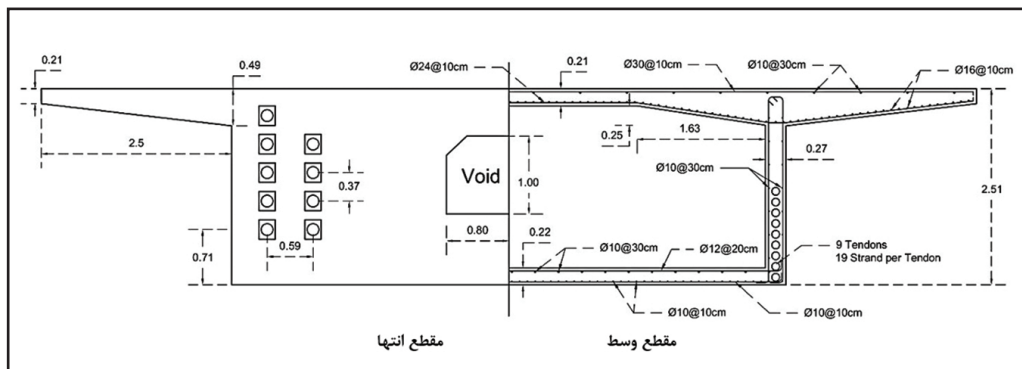


شکل ۵. پوش برش بر اساس بار زنده ایران (کیلونیوتن)

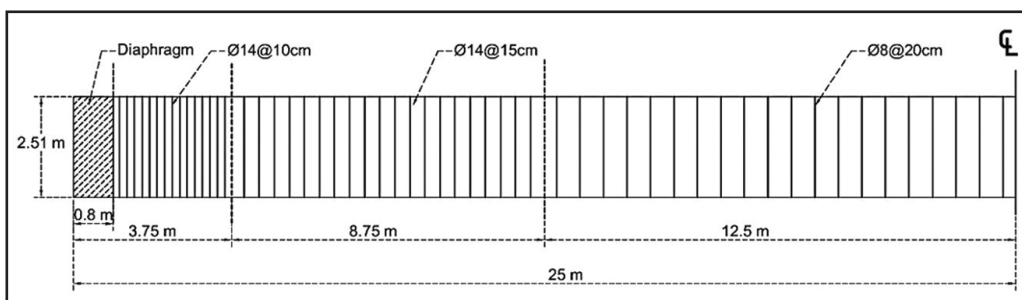
با اجرای بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم ژنتیک، طرح بهینه عرشه پل بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای مفروض، بر اساس بار زنده آیین‌نامه بارگذاری پل ایران، طی چند ثانیه به دست آمد. همان طور که پیشتر ذکر شد، تابع هدف در این بررسی، وزن واحد طول عرشه در نظر گرفته شده است. مقدار وزن واحد طول عرشه برای طرح بهینه به دست آمده از این بهینه‌سازی، مقدار ۳۴۰/۱۶ تن بر متر طول عرشه به دست آمد. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک به سمت بهینه کلی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده

جدول ۴. مقادیر متغیرهای طراحی مربوط به طرح بهینه

طرح بهینه	قیود مشخصه
۲.۵۱۰	ارتفاع تیر (m)
۲۰.۹۹۲	ضخامت بال بالا (cm)
۲۱.۵۸۰	ضخامت بال پایین (cm)
۲۶.۶۰۴	ضخامت جان (cm)
۲.۴۹۷	طول طره (m)
۲۰.۹۰۱	ضخامت انتهای طره (cm)
۴۸.۷۵۸	ضخامت ابتدای طره (cm)
۱۶۲.۷۷۴	طول ماهیچه (cm)
۲۵.۰۰۸	عرض ماهیچه (cm)
۱۹	تعداد کابل‌های هر تاندون
۹	تعداد تاندونهای یک جان
۷۱.۱۱۰	پایینترین محل مهار (cm)
۲	تعداد مهار در هر ردیف
۰.۸۳۰	نیروی کشش جک
۰.۰۲۷۳	نسبت آرماتور دال بالا
۰.۰۱۷۷	نسبت آرماتور طره
۱۶.۳۴۰	وزن واحد طول عرشه بهینه (ton/m)



شکل ۷. مقطع بهینه عرشه پل (اندازه‌ها به متر است)



شکل ۸. فولادهای برشی طرح بهینه

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی بهینه عرشه پلهای بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده جعبه‌ای بر اساس بار زنده آیین‌نامه ایران، به وسیله الگوریتم ژنتیک انجام شد. تعداد ۱۶ متغیر مختلف و مجموع ۱۳۷ قید بر اساس ضوابط آیین‌نامه آشتو و محدودیتهای اجرایی در نظر گرفته شد. وزن واحد طول عرشه به عنوان تابع هدف تعریف شد. فرمول‌بندی روابط تحلیل و طراحی عرشه در برنامه MATLAB صورت گرفت. طراحی عرشه در هر دو راستای طولی و عرضی مورد توجه قرار گرفت و تمام افتهای کوتاهمدت و بلندمدت به طور دقیق در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک تنها در چند ثانیه طرح بهینه عرشه محاسبه گردید. تمام مراحل تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی به طور همزمان و بصورت خودکار در برنامه صورت گرفت.

نتایج حاصل از این بهینه‌سازی نشان داد، با یک بار فرمول‌بندی مساله طراحی پل موردنظر و با کمک الگوریتم ژنتیک می‌توان در مدت زمان کوتاهی به پاسخ بهینه دست پیدا کرد. در حالی که این امر با استفاده از روشهای سنتی، امری غیر ممکن و یا زمانبر است. الگوریتم ژنتیک به طور موفقیت آمیزی در این بهینه‌سازی بکار گرفته شد و طرح بهینه به طور دقیق محاسبه گردید. عرشه بهینه به دست آمده که دارای حداقل وزن ممکن بوده، تمام ضوابط آیین‌نامه‌ای تعریف شده و حداقل و حداکثرهای اجرایی موردنظر طراح را رعایت می‌کند. با کاهش وزن عرشه، نه تنها در مصالح مصرفی و هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌شود، بلکه به کاهش نیروی زلزله وارد بر پل نیز کمک می‌کند.

در انتها، با توجه به افزایش سرعت کامپیوترها و توسعه تکنیکها و روشهای جدید بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک، زمان آن رسیده است که روشهای سنتی طراحی پلها که تماماً به تجربه طراح بستگی دارد، به یک روش قاعده‌مند مبتنی بر رایانه تبدیل شود و طرح به دست آمده، نهایتاً توسط طراح کنترل گردد. به این ترتیب علاوه بر دستیابی به بهترین نتیجه در کوتاهترین زمان ممکن، صرفه‌جویی در

مصالح مصرفی، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش نیروی انسانی، به حفظ محیط زیست نیز کمک قابل توجهی می‌شود.

## ۷. پی‌نوشتها

- 1- American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO)
- 2- Global Optimum
- 3- Genetic Algorithm(GA)
- 4- Survival of the Fittest
- 5- Population
- 6- Solution
- 7- Chromosome
- 8- Individual
- 9- Generation
- 10- Fitness
- 11- Selection (Reproduction)
- 12- Crossover
- 13- Mutation
- 14- Mating Pool
- 15- Parents
- 16- One-Point Crossover
- 17- Two-Point Crossover
- 18- Uniform Crossover
- 19- Mutation Rate

## ۸. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور(۱۳۷۹) « آیین‌نامه بارگذاری پلها»، نشریه شماره ۱۳۹، تجدید نظر اول، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

- Freyssinet Inc. (1999) “The C Range post-tensioning system”, excerpted from: www.freyssinet.com: (May 10, 2010).
- Goldberg, D. E. (1989) “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning”, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Hassanain, M. A. and Looy, R. E. (2003) “Cost optimization of concrete bridge infrastructure”, Canadian Journal of Civil Engineering, 30(5), pp.841–849.
- Hewson, N. R. (2003) “Prestressed Concrete Bridges: Design and Construction, Thomas Telford.
- Holland, J. H. (1975) “Adaptation in natural and artificial systems”, The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Koumoussis, V. K. and Arsenis, S. J. (1998) “Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members”, Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 13(1), pp.43–52.
- Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C. S. (1998) “Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames”, Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 13(1),
- AASHTO (2002) “Standard specifications for highway bridges”, 17th Ed. Washington DC.
- Adeli, H. and Sarma, K. C. (2006) “Cost optimization of structures”, Wiley, Chichester, UK.
- Ahsan, R., Rana S. and Ghani, S. N. (2012) “Cost optimum design of posttensioned I-girder bridge using global optimization algorithm”, Journal of Structural Engineering, 138(2), pp.273–284.
- Ayvaz, Y. and Aydin, Z. (2009) “Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm”, Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 41(1), pp.151–162.
- Cohn, M. Z. and Lounis, Z. (1993) “Optimum limit design of continuous prestressed concrete beams. Journal of Structural Engineering, ASCE, 119(12), pp.3551–3570.
- Cohn, M. Z. and MacRae, A. J. (1984a) “Optimization of structural concrete beams”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 110(7), pp.1573–1588.
- Fereig, S. M. (1996) “Economic preliminary design of bridges with prestressed I-girders”, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 1(1), 18–25.

pp.63–74.

- Sarma, K. C. and Adeli, H. (1998) “Cost optimization of concrete structures”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(5), pp. 570–578.

- Sirca, G. F., and Adeli, H. (2005) “Cost optimization of prestressed concrete bridges”, *Journal of Structural Engineering*, 131(3), pp. 380–388.

- Soh, C. K. and Yang, J. (1998) “Optimal layout of bridge trusses by genetic algorithms”, *Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13(4), pp. 247–254.

- Torres, G. G. B., Brotchie, J. F. and Cornell, C. A. (1966) “A program for the optimum design of prestressed concrete highway bridges”, *PCI Journal*, 11(3), pp. 63–71.

- Yeh, I. (1999) “Hybrid genetic algorithms for optimization of truss structures”, *Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 14(3), pp.199–206.

- Yu, C. H., Das Gupta, N. C. and Paul, H. (1986) “Optimization of prestressed concrete bridge girders” *Journal of Engineering Optimization*, 10(1), pp. 13–24.

