

سنجش بهینه‌سازی عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده بر پایه آیین‌نامه‌های اشتو استاندارد و آشتو LRFD با بهره‌جویی از الگوریتم فاخته

زهرا حضرتی مقیم^{۱*}، علی خیرالدین^۲، حسین نادرپور^۳ و حسین رحمانی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۷	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۳	
واژگان کلیدی:	
بهینه‌سازی،	بالا بودن هزینه و زمان اجرای پروژه، به‌کارگیری بهینه‌سازی را در صنعت پل‌سازی ضرورت می‌بخشد؛ افزون بر بهره‌گیری از آیین‌نامه در هنگام طراحی، بهینه‌سازی، سبب کاهش چشمگیر مواد مصرفی شامل فولاد، آرماتور و بتن و همچنین صرفه‌جویی در زمان انجام پروژه می‌شود. در این مقاله به بررسی عوامل مؤثر در بهینه‌سازی پرداخته است. نخست، با تعریف اندازه‌های هندسی مقطع، مقاومت بتن، محل و شمار کابل‌های پیش‌تنیدگی به عنوان متغیر و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، بهترین اندازه‌ها برای متغیرها انتخاب و بهترین مقطع با رعایت دستورهای آیین‌نامه‌ای بر پایه دو آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۵-LRFD و استاندارد ۲۰۰۲ با هم سنجیده شده‌اند. از نتایج پژوهش می‌توان به عدم رابطه مستقیم کمینگی وزن و طرح اقتصادی به دلیل تأثیر سه عامل بتن، فولاد و کابل‌های پیش‌تنیده و همچنین تأثیر بهره‌جویی از بتن با مقاومت بالا در دهانه‌های بلند اشاره کرد. در پایان، برای مقایسه تأثیر طول دهانه، بهینه‌سازی بالا برای دهانه‌های ۳۰ تا ۷۰ متر، با بهره‌جویی از آیین‌نامه‌های ذکر شده انجام و نتایج با هم سنجش شده است.
عرشه پل،	
بتن،	
پیش‌تنیده،	
الگوریتم فاخته،	
آیین‌نامه آشتو LRFD آشتو استاندارد.	

۱- مقدمه

بهینه‌سازی در عرشه پل‌های بتنی بپردازیم، در ادامه، مطالعه‌های مرتبط با این موضوع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۶۶، ترس به بهینه‌سازی اندازه و شمار تیرها در طول مشخصی از دهانه پرداخت [۴]. در سال ۱۹۷۶، کوهن و مک، بهینه‌سازی غیرخطی تیرهای I شکل را آغاز کردند، ولی هنوز بحث قید مطرح نبود. در همین سال ساوما و موراد، روش تابع جریمه را بیان کردند و با این روش، مسئله قید مطرح شد. در سال ۱۹۷۶، بحث سنجش بهینه‌سازی هزینه و وزن بیان شد و نم، با بررسی تیرهای مستطیلی به این نتیجه رسید که اگر نسبت یک یارد مکعب بتن به هزینه یک پوند فولاد پیش‌تنیدگی بزرگ‌تر از ۶۰ باشد، نتیجه هر دو طرح یکسان است [۵].

از حدود هفتاد سال پیش، بحث بهینه‌سازی سازه‌های عمرانی مورد پژوهش قرار گرفته است. تمرکز اصلی بیشتر مطالعات، در خصوص کمینه کردن وزن بوده، تلاش شده تا حد امکان، وزن سازه را کاهش دهند؛ درحالی‌که بهینه‌سازی وزن به معنای بهینه‌سازی کامل سازه نیست. از طرفی بیشتر این پژوهش‌ها بر پایه اعضای سازه‌ای پل از قبیل تیرها بوده است. در پژوهش‌های انجام شده، اصولاً پل‌ها از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند که می‌توان به مطالعات رفتارهای دینامیکی [۱]، آسیب‌شناسی سازه‌ها [۲] و طراحی و بهینه‌سازی [۳] اشاره کرد. از آنجایی که در این پژوهش، در نظر داریم به بحث

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Maria.Hazrati@gmail.com

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۴. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

در سال ۱۹۸۵، بهینه‌سازی هزینه پل‌های قوطی‌شکل توسط جونز انجام گرفت و کمینه هزینه برای مقاطعی که از بتن با مقاومت $5/5 \text{ksi}$ و شمار ۱۰ کابل ساخته شده بود، مبلغ $2/488$ دلار محاسبه شد [۶].

تا پیش از سال ۱۹۹۰، بهینه‌سازی هزینه سازه‌های سه بعدی در شمار معدودی از مقاله‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته بود؛ به همین دلیل، پژوهش درباره سازه‌ها در اندازه‌های واقعی با شمار عضوهای زیاد، که سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه خواهد شد، بسیار مورد نیاز بود.

از دلیل‌های دیگر نیاز به بهینه‌سازی، رفع پیچیدگی طراحی سازه و مکانیزه کردن فرایند پیچیده طراحی است.

در سال ۱۹۹۶ بهینه‌سازی عرشه I شکل و جعبه با هم سنجیده و در پل با دهانه ۲۰ متر، سیستم تیری I شکل پیش‌تنیده از نظر اقتصادی، بهتر از سیستم جعبه‌ای تک یا دو سلولی شناخته شد.

در سال ۲۰۰۳، میرطلابی و همکاران از آیین‌نامه آشتو LRFD، برای طراحی تیر I شکل بهره بردند. با افزایش دهانه، هزینه عرشه افزایش یافت و در مقایسه، آشتو LRFD هزینه بالاتری نسبت به آشتو استاندارد داشت [۷].

در سال ۲۰۱۲ برای پل با عرشه قوطی‌شکل، بهینه‌سازی هزینه توسط چانگ و همکاران انجام گرفت و بر پایه پژوهش برای دهانه ۳۰ تا ۹۰ متر با افزایش دهانه، هزینه عرشه بیشینه شد که در مقایسه، آشتو LRFD هزینه کمتری نسبت به آشتو استاندارد داشت [۸].

نادر پور و همکاران، به بهینه‌سازی عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده جعبه‌ای، بر پایه آیین‌نامه بارگذاری پل ایران پرداخته‌اند. در این بهینه‌سازی، متغیرهای گوناگون از جمله اندازه اجزای مختلف سطح مقطع عرشه، شمار تاندون‌ها و شمار کابل‌های هر تاندون فرمول‌بندی و با بهره‌جویی از روش الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه محاسبه شده است [۹].

در سال ۲۰۱۶، برای پل با عرشه قوطی‌شکل دو و سه سلولی مقایسه برش و خمش و تغییرشکل انجام گرفت و جعبه دوسلولی کارآمدتر از سه سلولی تشخیص داده شد [۱۰].

الگوریتم استفاده‌شده در این پژوهش، فاخته نام دارد که علت انتخاب آن، امکان پشتیبانی الگوریتم از شمار متغیرهای زیاد است. این الگوریتم بر روی الهام از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته بود. همانند سایر الگوریتم‌های

تکاملی، فاخته هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند (جمعیتی متشکل از فاخته‌ها). این جمعیت از فاخته‌ها شماری تخم دارند که آن‌ها را در لانه تعدادی پرنده میزبان خواهند گذاشت. شماری از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرنده میزبان دارند، شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها توسط پرنده میزبان شناسایی شده، از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهد. هر چه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند، به همان اندازه، سود بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌یابد. بنابراین، موقعیتی که در آن بیشترین شمار تخم‌ها نجات یابند، عاملی خواهد بود که الگوریتم فاخته قصد بهینه‌سازی آن را دارد. فاخته‌ها برای بیشینه کردن نجات تخم‌های خود، دنبال بهترین منطقه می‌گردند. پس از آنکه جوجه‌ها از تخم در آمدند و تبدیل به فاخته بالغ شدند، جوامع و گروه‌هایی تشکیل می‌دهند. هر گروه، منطقه سکونتی برای زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه‌ها، مقصد بعدی فاخته‌ها در سایر گروه‌ها خواهد بود. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. هر گروه در منطقه‌ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می‌شود. با در نظر گرفتن شمار تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته‌ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت شعاع تخم‌گذاری محاسبه شده، شکل می‌گیرد.

برای بهینه کردن تابع هزینه و وزن سازه، متغیرهای بهینه سازی، بیشتر از متغیرهای هندسی انتخاب شده‌اند. سپس با استفاده از قیود استخراج‌شده از آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۴-LRFD کنترل و طراحی عرشه توسط برنامه‌ای که در محیط MATLAB نوشته شده، انجام می‌شود.

در پایان، جواب بهینه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB و تابع بهینه فاخته استخراج شده است.

۲- تحلیل و طراحی

برای تحلیل و طراحی به منظور بهینه کردن عرشه، به تعریف مقادیر زیر نیاز است:

- اندازه‌های ثابت
- متغیرهای طراحی
- قیدهای ضمنی
- قیدهای مشخصه

می‌شوند و الزامات عملکردی در طراحی را کنترل می‌کنند. این قیدها در ادامه آمده و روابط و محدودیت‌های آنها بیان شده است.

۲-۴-۱- قیدهای تنش خمشی در فولاد پیش‌تنیدگی

این قیدها، تنش فشاری و کششی را در تارهای بالا و پایین بتن کنترل می‌کنند. برای محاسبه برون‌محوری، از قیدهای تنش استفاده می‌شود. با توجه به تغییرات لنگر خمشی (ناشی از بار مرده خارجی، زنده و وزن تیر) لازم است برون‌محوری به گونه‌ای تغییر یابد که در هیچ مقطعی تنش‌های بیشینه بتن از تنش مجاز، بیشتر نشود. این قید به صورت ریاضی در رابطه ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- قیود بهینه‌سازی [۱۱]

مقدار عامل	نام عامل
$2/20 \leq h \leq 4$	ارتفاع تیر (m)
$17/50 \leq t_b \leq 35$	ضخامت بال بالا (cm)
$17/50 \leq t_b \leq 30$	ضخامت بال پایین (cm)
$25 \leq t_w \leq 55$	ضخامت جان (cm)
$2 \leq l_c \leq 3$	طول طره (m)
$3 \leq t_{ec} \leq 17/50$	ضخامت انتهای طره (cm)
$35 \leq t_{bc} \leq 50$	ضخامت ابتدای طره (cm)
$50 \leq l_m \leq 200$	طول ماهیچه (cm)
$25 \leq w_m \leq 100$	عرض ماهیچه (cm)
$1 \leq N_c \leq 19$	شمار کابل تاندون
$75 \leq F_j \leq 90$	نیروی کشش جک (%)
$\rho_{\min} \leq R_t \leq \rho_{\max}$	نسبت آرماتور دال بالا
$\rho_{\min} \leq R_b \leq \rho_{\max}$	نسبت آرماتور دال پایین
$\rho_{\min} \leq R_c \leq \rho_{\max}$	نسبت آرماتور طره
$50 \leq F_c \leq 300$	مقاومت فشاری بتن (Kg/cm^2)
$y_{\min} \leq h_{br} \leq 100$	پایین‌ترین محل مهار
$1 \leq N_{br} \leq 3$	شمار مهار در هر ردیف

$$\sigma = -\frac{F_j}{A} + \frac{F_j \times e_j}{S} + \frac{M_j}{S} \quad (1)$$

$$\sigma_L \leq \sigma \leq \sigma_U$$

که σ_L تنش فشاری مجاز، σ_U تنش کششی مجاز، F_j نیروی محوری تاندون، e_j برون‌محوری بارهای مختلف، S اساس مقطع تیر و A مساحت سطح مقطع تیر است. کنترل تنش در نقاط بحرانی دهانه پل و در سه مرحله انتقال، مرحله ۲ و مرحله بهره‌برداری انجام می‌شود. در مرحله انتقال، عرشه زیر نیروی پیش‌تنیدگی قرار گرفته، افت

۲-۱- عامل‌های ثابت طراحی

این مقادارها در تحلیل و طراحی به صورت ثابت بوده، تأثیر تغییر آنها در بهینه‌سازی کنترل نمی‌شود [۵]. در جدول ۱ این عوامل و اندازه آنها نشان داده شده است.

۲-۲- متغیرهای طراحی

برای بهینه‌سازی باید تابع هدف در الگوریتم فاخته تعریف شود. تابع هدف با انتخاب تصادفی، بهترین متغیرها را انتخاب می‌کند. در قیدهای مشخصه بر پایه دستوره‌های آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۴-LRFD و محدودیت‌های هندسی و ساخت، محدوده‌ای برای متغیرها تعریف می‌شود.

جدول ۱- عامل‌های ثابت [۵]

مقدار عامل	نام عامل
۴۵	دهانه پل (L) (m)
۸/۵	عرض پل (m)
۲۴۰۰	وزن مخصوص بتن (Kg/m^3)
۱۹ تا ۱۵ میلی‌متر	اندازه کابل فولاد پیش‌تنیدگی
۱۸۶۰۰	مقاومت کششی فولاد پیش‌تنیدگی (Kg/cm^2)
۷۸۵۰	وزن مخصوص فولاد پیش‌تنیدگی (Kg/m^3)
۴۰۰۰	مقاومت تسلیم فولاد معمولی (Kg/cm^2)
۷۸۵۰	وزن مخصوص فولاد معمولی (Kg/m^3)
HL-93K HL-93M	بار زنده
۹۰cm	بار مرده اضافی
۲۰cm	ارتفاع جان‌پناه فلزی
۷cm	عرض جان‌پناه فلزی
	ضخامت آسفالت
۲۲۰۰	وزن مخصوص آسفالت (Kg/m^3)

۲-۳- قیدهای مشخصه

قیدهای مشخصه، حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی هستند که بر اساس شرایط عملی ساخت و محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۲ قیدهای مشخص شده برای بهینه‌سازی آمده است. این قیدهای مربوط به اندازه‌های فیزیکی عرشه جعبه‌ای و کابل‌ها بر پایه آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD است.

۲-۴- قیدهای ضمنی

این قیدها بر پایه آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۴-LRFD مشخص

لنگر نهایی مقاومت حاصل از بار مرده و زنده:

$$M_u = 1.25 \times M_{DC} + 1.5 \times M_{DW} + 1.75 \times M_{(LL+IM)} + M_{PS} \quad (3)$$

در رابطه ۳، M_{PS} ممان پیش‌تنیدگی، M_{DC} ممان بار مرده، M_{DW} ممان بار مرده اضافی و $M_{(LL+IM)}$ ممان بار زنده و ضربه را نشان می‌دهد.

۲-۴-۵- قیدهای بیشینه و کمینه فولاد پیش‌تنیدگی

قید بیشینه به صورت $\omega_u \leq \omega$ است که در این رابطه، ω نشانگر شاخص فولاد و ω_u شاخص بالای فولاد است. در قید کمینه، کمترین مقدار عبارت زیر به‌عنوان کنترل، برای حداقل آرماتور در نظر گرفته می‌شود که M_{cr} لنگر ترک خوردگی است.

$$\phi \cdot M_n \geq 1.33 \cdot M_u \quad (4)$$

$$\phi \cdot M_n \geq 1.2 M_{cr} \quad (5)$$

۲-۴-۶- قید خیز $L/800$

خیز زیر بار سرویس برای بار مرده، زنده و پیش‌تنیدگی، با در نظر گرفتن خزش، محدود به $1/800$ طول دهانه است.

۲-۴-۷- قید مقاومت خمشی دال طره

مقاومت خمشی دال طره باید دارای محدودیت زیر باشد:

$$M_u \leq \phi M_n \quad (6)$$

که M_u ممان بار نهایی و ϕM_n مقاومت خمشی طراحی است.

۲-۴-۸- قید مقاومت برشی دال طره

مقاومت برشی دال طره همانند مقاومت خمشی، دارای محدودیت است؛ بنابراین در ضریب ثابتی ضرب می‌شود. در رابطه ۷ این ضرایب آمده است.

$$V_u \leq \Phi \times V_n = 0.85 \times V_n \quad (7)$$

شایان ذکر است در دال‌ها آرماتور برشی نداریم و با تغییر ضخامت بتن دال‌ها، برش تأمین می‌شود. به بیان دیگر، معمولاً در دال‌ها ضخامت طوری انتخاب می‌شود که نیاز به فولاد برشی نباشد. به همین دلیل برش تنها به‌وسیله بتن تحمل می‌شود. در رابطه بالا، V_u مقدار برش بار نهایی و V_n مقاومت برشی اسمی بتن است.

۲-۴-۹- قید مقاومت برشی نهایی

مقاومت نهایی برشی محاسبه‌شده برای جسم، باید کمتر از مقاومت برشی طراحی باشد. به همین منظور، این مقدار را در ضریبی کوچک‌تر از یک ضرب می‌کنند.

کوتاه‌مدت اتفاق می‌افتد. پل، بار وزن عرشه و نیروی پیش‌تنیدگی را تحمل می‌کند. در مرحله دوم، افت بلندمدت روی می‌دهد و عرشه زیر نیروی پیش‌تنیدگی، وزن عرشه و بار اضافی آسفالت است. در پایان، در مرحله سوم، پل تکمیل‌شده، با عبور وسایل نقلیه، زیر بار زنده نیز قرار می‌گیرد.

۲-۴-۲- قیدهای تنش در فولاد پیش‌تنیده

این تنش‌ها، برای فولادهای با خزش کم تعیین شده است. تنش در ابتدای محل استقرار باید برابر $0.9 f_{py}$ باشد. تنش، پس از تورفتگی در گیره بلافاصله پس از محکم کردن باید از $0.7 f_{pu}$ کمتر باشد. تنش در طول عضو، پس از ناحیه تورفتگی بلافاصله پس از محکم کردن، برابر $0.74 f_{pu}$ است. تنش در بارهای سرویس، پس از کسر همه افت‌ها باید کمتر از $0.74 f_{pu}$ باشد.

در روابط بالا، f_{pu} مقاومت نهایی فولاد پیش‌تنیده و f_{py} تنش تسلیم فولاد پیش‌تنیده است.

۲-۴-۳- یافتن افت‌های پیش‌تنیدگی

در تکنیک پیش‌تنیدگی، با اعمال تنش‌های فشاری اولیه به المان‌های بتنی، قابلیت باربری آن‌ها افزایش یافته، نیاز آن‌ها به میلگرد کاهش می‌یابد.

افت‌های پیش‌تنیدگی شامل موارد زیر است:

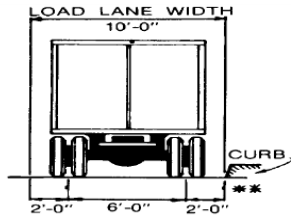
- افت اصطکاک
- افت تغییرشکل کشسان
- افت تورفتگی در گیره
- افت خزش بتن
- افت انقباض بتن
- افت شل‌شدگی تاندون

۲-۴-۴- قیدهای مقاومت خمشی طولی نهایی

مقاومت نهایی خمشی به‌دست‌آمده برای جسم، باید کمتر از مقاومت خمشی طراحی باشد؛ در نتیجه، این مقدار در ضریب ثابتی ضرب می‌شود. قیدهای مقاومت خمشی طولی نهایی به‌صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

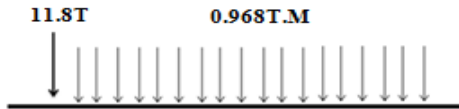
$$M_u \leq \phi M_n \quad (2)$$

در این رابطه، ϕ برای عضوهای پس‌کشیده برابر 0.95 است. که M_u ممان بار نهایی و ϕM_n مقاومت خمشی طراحی هستند. این قید، در مقاطع بحرانی، زیر ترکیب باری که در رابطه ۳ نشان داده شده است، کنترل می‌شود.



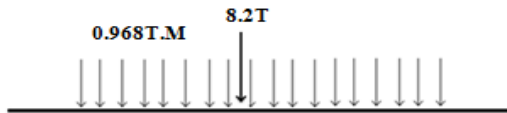
شکل ۱- خودرو مربوط به آیین‌نامه آشتو استاندارد [۱۲]

۲. بار گسترده: برای محاسبه برش ماکزیمم. (شکل ۲)



شکل ۲- بار زنده گسترده برای محاسبه برش مربوط به آیین‌نامه آشتو استاندارد [۱۲]

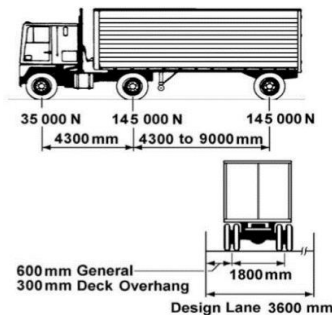
۳. بار گسترده: برای محاسبه خمش ماکزیمم. (شکل ۳)



شکل ۳- بار زنده گسترده برای محاسبه خمش مربوط به آیین‌نامه آشتو استاندارد [۱۲]

(ب) آشتو LRFD:

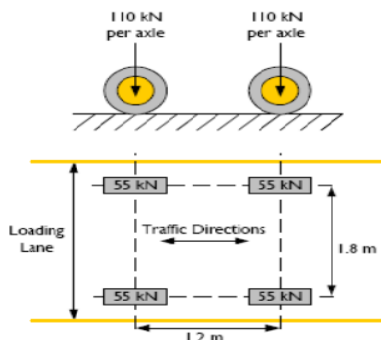
۱. بار مربوط به کامیون به نام HL-93K (شکل ۴)



شکل ۴ - خودرو مربوط به آیین‌نامه

آشتو LRFD [۱۳]

۲. بار مربوط به تانک (شکل ۵)



شکل ۵ - خودرو تانک مربوط به آیین‌نامه آشتو LRFD

[۱۳]

$$V_U < \phi V_n \quad (8)$$

$$V_n = \min(V_{Ci}, V_{cw}) + V_S \quad (9)$$

برای عضوهای پس کشیده، مقدار ضریب ظرفیت برشی برابر ۰/۹ است. V_U مقدار برش بار نهایی، V_n مقاومت برشی اسمی بتن و V_S مقاومت برش اسمی فولاد است. همچنین V_{Ci} مقاومت برش اسمی ناشی از بتن است، زمانی که ترک ایجاد شده در جان، حاصل از ترکیب ممان و برش باشد. این مقدار را در تکیه‌گاه محاسبه نمی‌کنیم و در نقطه $0.2L$ محاسبه می‌شود. V_{cw} نیز مقاومت برش اسمی ناشی از بتن بوده، زمانی که ترک ایجاد شده در جان، حاصل از تنش کششی است که در تکیه‌گاه به دست می‌آید. کنترل برش در مقاطع بحرانی در طول دهانه انجام می‌شود.

۲-۴-۱۰- قید خیز دال طره $L/300$

خیز زیر بار خودرو HL-93K یافته می‌شود؛ به همین دلیل از فرمول $L/300$ استفاده شده است.

۳- تفاوت آشتو استاندارد و LRFD

۳-۱- روش طراحی در دو آیین‌نامه

آشتو استاندارد:

در طراحی به روش LRFD بارها در ضرایب مشخصی ضرب می‌شود.

$$R = 1.3 \times (1.0 \times f_{DD} + 1.67 \times f_{L+I}) \quad (10)$$

در این آیین‌نامه، در برخی مواقع، مقاومت در ضرایبی ضرب خواهند شد که این ضرایب به صورت تجربی تعیین می‌شود. آشتو LRFD:

در طراحی با بهره‌جویی از LRFD، بار و مقاومت در ضرایب مشخصی ضرب می‌شوند.

$$\phi R = 1 \times (1.25 \times f_{DD} + 1.5 \times f_{DW} + 1.75 \times f_{L+I}) \quad (11)$$

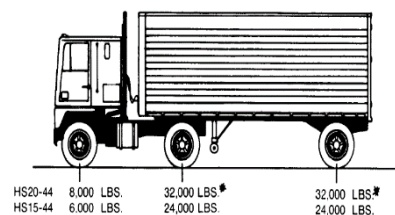
۳-۲- خودرو طراحی در دو آیین‌نامه

خودروهای طراحی در دو آیین‌نامه استاندارد و آشتو LRFD

به صورت زیر هستند:

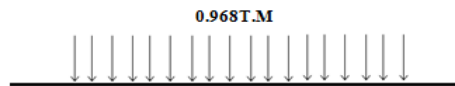
(الف) آشتو استاندارد:

۱. کامیون: در شکل (۱) نشان داده شده است.



۳- بار گسترده

این بار گسترده که در شکل (۶) نمایش داده شده است در سرتاسر پل بدون انقطاع همراه Truck به صورت تصادفی وارد می‌شود و به آن ضریب ضربه تعلق نمی‌گیرد.



شکل ۶- بار زنده گسترده مربوط به آیین‌نامه آشتو

LRFD [۱۳]

۳-۳- ضریب ضربه

تنش‌های تولیدشده در اثر حرکت وسیله نقلیه، بیشتر از تنش‌های مربوط به حالت بارگذاری استاتیک است. برای محاسبه این افزایش تنش، ضریب ضربه در نظر گرفته می‌شود. این ضرایب برای استانداردهای به‌کاررفته، در ادامه آمده است.

آشتو استاندارد:

$$I = \frac{15}{37.5 \times L} \quad (۱۲)$$

آشتو LRFD:

جدول ۳- ضریب ضربه مربوط به آیین‌نامه آشتو LRFD [۱۳]

شرایط	ضریب
انقطاع در عرشه	۰/۷۵

۳-۴- ضریب هم‌زمانی

در صورتی که عرض خط عبور محاسباتی بیشتر از یک واحد محاسبه شود، باید برای حصول شرایط بحرانی، تمام باندها بارگذاری شود؛ ولی به دلیل کم بودن احتمال هم‌زمانی بارها، از ضریب کمینه زیر بر روی عناصر بهره‌جسته، با این روش بارگذاری اصلاح می‌شود.

آشتو استاندارد:

جدول ۴- ضریب هم‌زمانی آیین‌نامه آشتو استاندارد [۱۲]

شمار خطوط عبور	ضریب
۱/۲	۱
۳	۰/۹
>۴	۰/۷۵

آشتو LRFD:

جدول ۵- ضریب هم‌زمانی آیین‌نامه آشتو LRFD [۱۳]

شمار خطوط عبور	ضریب
۱	۱/۲۰
۲	۱
۳	۰/۸۵
>۳	۰/۶۵

۳-۵- شمار خطوط طرح

آشتو استاندارد:

در جدول ۶، شمار خطوط طرح مربوط به آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD نشان داده شده است. آشتو LRFD:

$$N = \left[\frac{W - 2 \times b}{3.65} \right]$$

W عرض عبور و b عرض جدول است.

جدول ۶- شمار خطوط طرح مربوط به آیین‌نامه آشتو

استاندارد و LRFD [۱۲]

شمار خطوط طرح	عرض سواره‌رو آشتو LRFD	عرض سواره‌رو استاندارد
۲	۱۰/۸	۶/۱۰-۹/۱۵
۳	۱۴/۴	۹/۱۵-۱۲/۸۱
۴	۱۸	۱۲/۸۱-۱۶/۴۷
۵	۲۱/۶	۱۶/۴۷-۲۰/۱۲
۶	۲۵/۲	۲۰/۱۲-۲۳/۷۹
۷		۲۳/۷۹-۲۷/۴۵
۸		۲۷/۴۵-۳۱/۱۱
۹		۳۱/۱۱-۳۴/۷۷
۱۰		۳۴/۷۷-۳۸/۴۳

۳-۶- ضریب پخش بار چرخ

بارگذاری ناشی از چرخ‌ها به صورت متمرکز نیست و با توجه به عرض چرخ، پخش می‌شود. به همین منظور، از ضرایب زیر استفاده می‌شود:

آشتو استاندارد:

- آرماتورهای اصلی دال موازی با جهت ترافیک:

$$E = 0.35 \times X + 0.92 \quad (۱۳)$$

- آرماتورهای اصلی دال عمود بر جهت ترافیک:

$$E = 0.8 \times X + 1.143 \quad (۱۴)$$

آشتو LRFD:

$$\begin{aligned} +M : E &= 26.0 + 6.6S \text{ in} \\ -M : E &= 48.0 + 3.0S \text{ in} \end{aligned} \quad (۱۵)$$

۳-۷- قیوذهای تنش در فولاد پیش‌تنیده

تنش در تاندون‌ها به دلیل افت‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در مقاطع و مراحل بارگذاری مختلف، تغییر می‌کند. به همین دلیل، دارای محدودیت‌هایی است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

آشتو LRFD:

نوع تنش	Release		Service	
	۱/۱۰ انتهای دهانه	نواحی دیگر	۱/۱۰ انتهای دهانه	نواحی دیگر
فشار	۰/۶	۰/۶	۰/۴	۰/۴
کشش	۰/۰	۷/۵	۶	۶

تنش مجاز کششی: ضریب $\times \sqrt{f_c}$

تنش مجاز فشاری: ضریب $\times f_c$

۳-۹- ضریب توزیع بار

این ضریب که در واقع بیانگر میزان انتقال نیرو به تیرهاست، به صورت زیر بیان می‌شود:
آشتو LRFD:

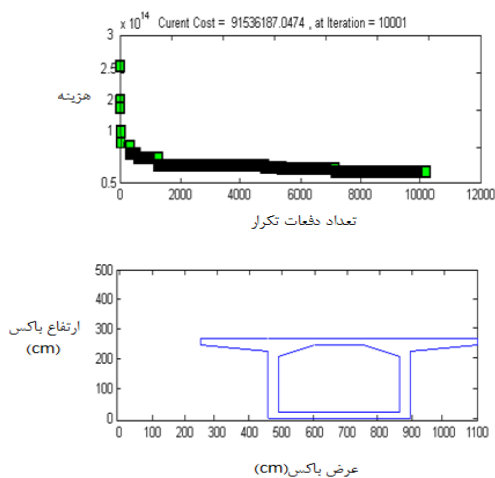
$$DF = \left(\frac{13}{N_c}\right)^{0.3} \left(\frac{S}{5.8}\right) \left(\frac{1}{L}\right)^{0.25} \quad (16)$$

S فاصله جان‌ها بر حسب فوت، L طول دهانه بر حسب فوت و N_c شمار سلول‌ها است.
آشتو استاندارد:

از ضریب ۱۴/S استفاده می‌شود.

۴- نتایج بهینه‌سازی بر پایه دو آیین‌نامه

در جدول ۸، مقدارهای بهینه متغیرها بر پایه محاسبه آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD مشخص شده است. همچنین شکل (۷) و (۸) به ترتیب مربوط به نتایج تحلیل بهینه‌سازی برای دهانه ۴۵ متر بر پایه دو آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD بوده، برای مقایسه شمار کابل‌ها و هزینه اختصاص یافته، شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است.



شکل ۷- نتایج تحلیل بهینه‌سازی پل با دهانه ۴۵ متر و عرض ۸/۶ متر و اجرای ۱۰۰۰۰ تایی طبق آشتو استاندارد

- تنش در ابتدای محل استقرار f_{py} ۰/۹ باشد.

- تنش بعد از تورفتگی در گیره بلافاصله بعد از محکم کردن باید کمتر از f_{pu} ۰/۷ باشد.

- تنش در طول عضو بعد از ناحیه تورفتگی بلافاصله بعد از محکم کردن باید کمتر از f_{pu} ۰/۷۴ باشد.

- تنش در بارهای سرویس بعد از کسر همه افت‌ها باید کمتر از f_{py} ۰/۸ باشد.

آشتو استاندارد:

-قیدهای تنش در فولاد پیش تنیده:

این تنش‌ها برای فولادهای با خزش کم تعیین شده است.

-تنش در انتهای ناحیه افت تورفتگی کوچک‌تر از f_{py} ۰/۸۳ باشد.

- تنش پس از تورفتگی در گیره بلافاصله پس از محکم کردن باید از f_{pu} ۰/۷ کمتر باشد.

-تنش در بارهای سرویس پس از کسر همه افت‌ها باید کمتر از f_{py} ۰/۸ باشد.

۳-۸- کنترل تنش کششی و فشاری بتن

تنش‌های کششی و فشاری بتن باید در هنگام طراحی کنترل شود. این تنش‌ها با بهره‌گیری از معیارهای زیر کنترل می‌شود:

آشتو LRFD:

- تنش‌های طولی و عرضی کششی در محل اتصال عرشه‌های انتقال پیش از کسر افت‌ها برابر صفر است.

- تنش‌های طولی و عرضی فشاری در محل اتصال عرشه‌های انتقال پیش از کسر افت‌ها برابر $0.55f_c$ (ksi) است.

- تنش‌های طولی و عرضی کششی در مرحله بهره‌برداری پس از کسر افت‌ها در محل اتصال عرشه‌ها صفر است.

- تنش‌های فشاری حاصل از نیروهای پیش‌تنیدگی و بار مرده در مرحله بهره‌برداری پس از کسر افت‌ها برابر $0.45f_c$ (ksi) است.

- تنش‌های فشاری حاصل از نیروهای پیش‌تنیدگی و بار مرده و زنده در مرحله بهره‌برداری پس از کسر افت‌ها برابر $0.6 \times f_w \times f_c$ (ksi) است.

اگر نسبت لاغری بال و جان بیشتر از ۱۵ نباشد، مقدار ϕ_w برابر ۱ است.

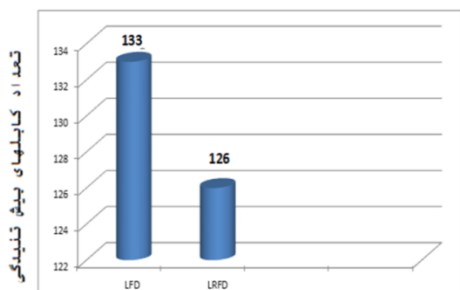
آشتو استاندارد:

در جدول ۷ قیدهای تنش آشتو استاندارد نشان داده شده است.

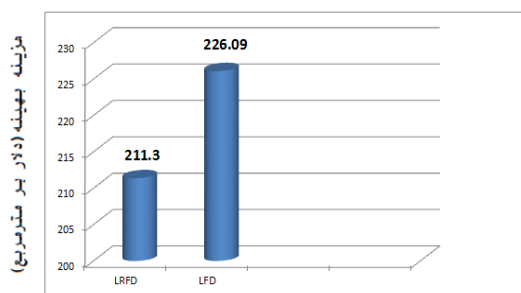
جدول ۷- قید تنش آشتو استاندارد

۵- سنجش شمار کابل و هزینه عرشه

در شکل (۹) شمار کابل‌های پیش‌تنیده در دو استاندارد آشتو استاندارد و آشتو LRFD با هم سنجیده شده است. در شکل (۱۰) نیز نمودار هزینه بهینه‌سازی عرشه بر پایه دو استاندارد بالا نشان داده شده است.



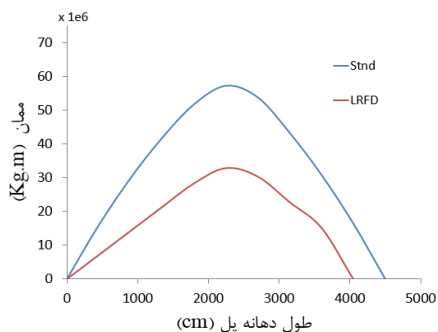
شکل ۹- سنجش شمار کابل‌های پیش‌تنیدگی در روش آشتو استاندارد و LRFD



شکل ۱۰- مقایسه هزینه مقطع در روش آشتو استاندارد و LRFD

۶- نمودارهای مربوط به سنجش آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD با مقطع عرشه ثابت

این سنجش‌ها، برای دهانه ۴۵ متری و عرشه جعبه‌ای شکل انجام گرفته است. برای نمایش اثر تغییر مقطع عرشه بر طرح بهینه، نمودارهای شکل‌های (۱۱-۱۶) برای سنجش ارائه شده است.



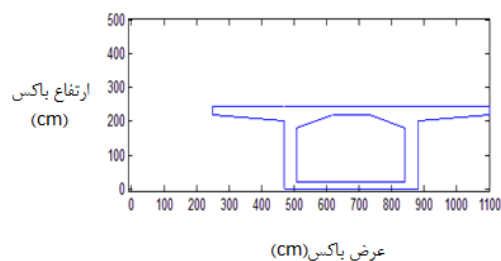
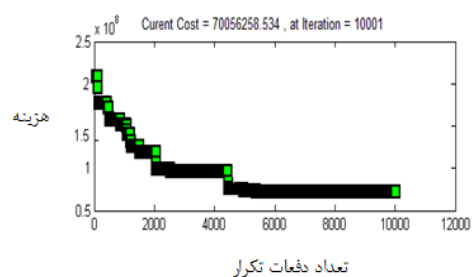
شکل ۱۱- مقایسه لنگر بار زنده زیر خودرو آشتو استاندارد و LRFD

با توجه به ترکیب بار گسترده ۰/۹۶۸T.m و بار

جدول ۸- مقدارهای بهینه متغیرها طبق محاسبه بر پایه

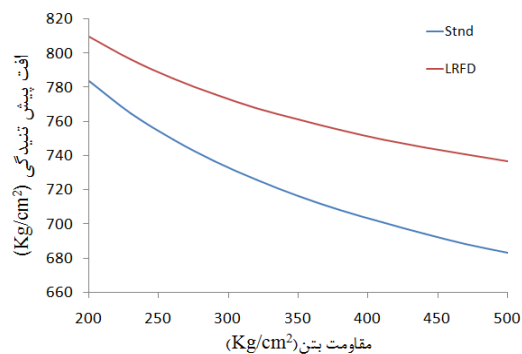
آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD

اختلاف	مقدارهای بهینه استاندارد	مقدارهای بهینه LRFD	قیدهای مشخصه
٪۸	۲۶۴	۲۴۳	ارتفاع تیر
-٪۸	۲۵	۲۶	ضخامت بال بالا (cm)
٪۰	۲۲	۲۲	ضخامت بال پایین (cm)
٪۳	۴۱	۴۰	ضخامت جان (cm)
-٪۶	۲۰.۸	۲۱.۹	طول طره
-٪۴	۲۰	۲۱	ضخامت انتهای طره (cm)
٪۰	۴۲	۴۲	ضخامت ابتدای طره (cm)
٪۰	۱۱۲	۱۰۹	طول ماهیچه (cm)
٪۰	۳۷	۳۶	عرض ماهیچه (cm)
٪۲۳	۷	۹	شمار کابل‌های هر تاندون
٪۵	٪۸۳	٪۷۹	نیروی کشش جک (%)
٪۱۳	۰/۳۲	۰/۲۸	نسبت آرماتور دال بالا
٪۷	۰/۳۱	۰/۲۹	نسبت آرماتور طره
٪۱	۳۷۲	۳۷۵	مقاومت فشاری بتن
٪۵	۶۲	۵۹	پایین‌ترین محل مهار
٪۰	۲	۲	شمار مهار در هر ردیف
٪۲۷	۱۹	۱۴	شمار تاندون‌ها
٪۶/۳	۲۲۳/۰۹\$	۲۱۱/۳۶۱\$	هزینه بهینه (دلار/ مترمکعب)



شکل ۸- نتایج تحلیل بهینه‌سازی پل با دهانه ۴۵ متر و اجرای ۱۰۰۰۰ تایی طبق آشتو LRFD

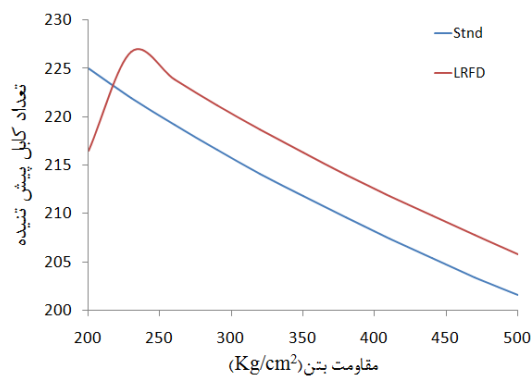
در شکل (۱۴)، افت‌های ایجادشده برای عرشه بر پایه آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد نشان داده شده است.



شکل ۱۴- سنجش افت‌های ایجادشده برای عرشه طبق آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد

تغییر مقاومت بتن سبب کم شدن ۷ درصدی افت شده است (فقط کوتاه‌شدگی کشسان و سرخوردگی گیره می‌توانند تحت تغییر مقاومت بتن تغییر کنند).

در شکل (۱۵)، شمار کابل‌های استفاده‌شده بر پایه آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد با تغییر مقاومت بتن نشان داده شده است.



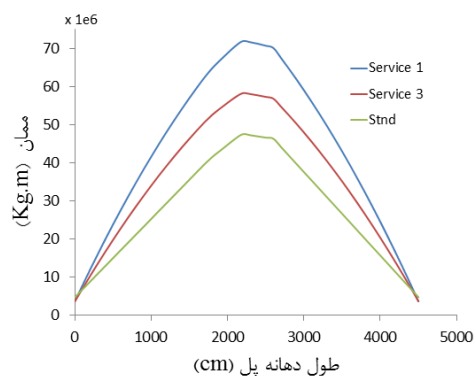
شکل ۱۵- سنجش شمار کابل‌های استفاده‌شده طبق آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد با تغییر مقاومت بتن

بر پایه نمودار ۱۵، شمار کابل‌های استفاده‌شده با تغییر مقاومت بتن برای روش LRFD بیشتر از استاندارد است. مقدار افزایش کابل با تغییر مقاومت بتن از ۲۰۰ به ۵۰۰ kg/cm²، حدود ۱۰ درصد است. در شکل (۱۶)، شمار کابل‌های استفاده‌شده بر پایه آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد با تغییر طول دهانه دیده می‌شود.

بر پایه نمودار ۱۶، شمار کابل‌های استفاده‌شده، با تغییر دهانه پل برای روش LRFD بیشتر از استاندارد است. مقدار افزایش کابل با تغییر دهانه پل از ۳۰ متر به ۷۰ متر برابر ۲۹ درصد است. این افزایش به دلیل افزایش بار زنده

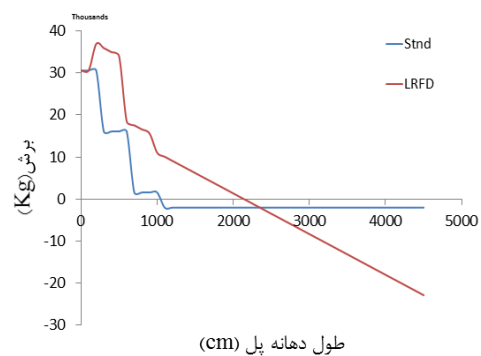
کامیون HL-93، ما شاهد افزایش بار زنده در روش LRFD هستیم و حدود ۵۰ درصد افزایش ممان در روش LRFD آشکار است. ولی به جهت کم کردن ضریب بارهای

مرده و زنده، در روش LRFD، این تفاوت کم می‌شود. در شکل (۱۲)، سنجش ترکیب بار سرویس ۱ و ۲ برای LRFD و طراحی به روش استاندارد نشان داده شده است. در ترکیب بار مرده و زنده دو نوع ترکیب بار سرویس تحت سرویس ۱ و ۲ برای کنترل کردن تنش کششی و فشاری مجاز برای بتن پیش‌تنیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آشتو استاندارد، ترکیب بار استاندارد داریم.



شکل ۱۲- سنجش ترکیب بار سرویس ۱ و ۲ برای LRFD و طراحی به روش استاندارد

در شکل (۱۳) برش بار زنده در آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD نشان داده شده است.



شکل ۱۳- سنجش برش بار زنده در آیین‌نامه آشتو استاندارد و LRFD

همان طور که دیده می‌شود، بیشینه بار زنده در آیین‌نامه LRFD نسبت به استاندارد حدود ۱۱۰ درصد است، ولی با توجه به کم شدن ضریب بارها در ترکیب بار LRFD و افزایش ضریب بار مقاومت در LRFD این روش طراحی از لحاظ هزینه، مقرون به صرفه‌تر و از لحاظ مقاومت سازه‌ای، مطمئن‌تر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهینه‌سازی عرشه جعبه‌ای شکل پیش‌ساخته و پیش‌تنیده بتنی با الگوریتم فاخته برای پل تک‌دهانه انجام و تأثیر تغییر اندازه‌های سطح مقطع در محاسبه طرح بهینه بررسی شد. برای طراحی از آیین‌نامه آشتو LRFD استفاده و با الگوریتم فاخته در محیط MATLAB، سازه بهینه شد. این روش سرعت و دقت بالاتری نسبت به روش سعی و خطا دستی داشته، امکان کنترل مقاطع قابل‌قبول برای هزینه بهینه وجود دارد.

پس از محاسبه هزینه بهینه بر پایه آیین‌نامه آشتو LRFD، هزینه بهینه با کمک طراحی به روش آشتو استاندارد نیز محاسبه و با هم مقایسه شد.

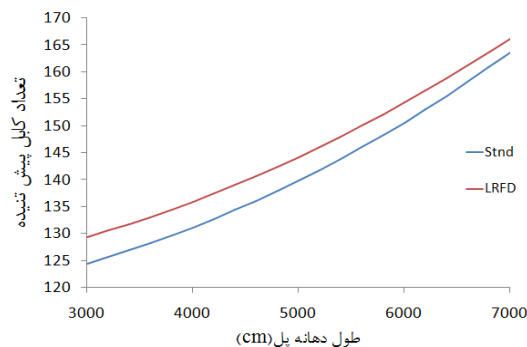
با توجه به بتنی بودن مقطع و تأثیر آرماتورها و کابل‌های پیش‌تنیدگی و مصالح در بهینه‌سازی، نتیجه گرفته می‌شود که کمینگی وزن در خصوص عرشه بتنی اقتصادی نیست. همچنین برای افزایش دهانه پل‌ها استفاده از بتن HSC و بالا بردن مقاومت بتن، اقتصادی است.

نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی، همچنین نشان می‌دهد که تغییر مقاومت بتن، سبب کم شدن ۷ درصدی افت شده است. شمار کابل‌های استفاده شده با تغییر دهانه پل، برای روش LRFD بیشتر از استاندارد است. مقدار افزایش کابل با تغییر مقاومت بتن از ۲۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، حدود ۱۰ درصد و نیز مقدار افزایش کابل با تغییر دهانه پل از ۳۰ متر به ۷۰ متر برابر ۲۹ درصد است. با افزایش مقاومت بتن از ۲۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، حدود ۴ درصد افزایش ظرفیت خمشی خواهیم داشت.

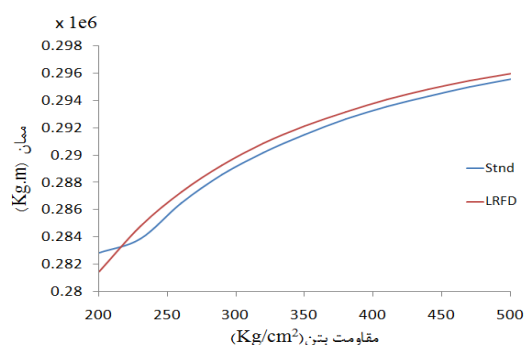
در ادامه، هزینه عرشه برای مقاطع با سطح مقطع ثابت برای دو آیین‌نامه آشتو LRFD و استاندارد بررسی و تأثیر تغییر مقاومت بتن و تغییر طول دهانه بر هزینه مقطع محاسبه شد.

با توجه به تغییر ضریب مقاومت و ضرایب بار و نیز تنش مجاز و...، در نهایت، برای پل تک‌دهانه با طول دهانه ۴۵ متر و با تغییر آیین‌نامه از آشتو LRFD به استاندارد، افزایش هزینه ۶/۳ درصدی خواهیم داشت.

آیین‌نامه LRFD نسبت به استاندارد است و با وجود کاهش ضریب بار زنده در روش LRFD از مقدار ۰/۸ به مقدار ۱ در روش استاندارد، شاهد افزایش شمار کابل‌ها هستیم. در شکل (۱۷)، ظرفیت خمشی تغییر یافته با تغییر مقاومت بتن بر پایه آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد نشان داده شده است.



شکل ۱۶- سنجش شمار کابل‌های استفاده شده طبق آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد با تغییر طول دهانه



شکل ۱۷- سنجش ظرفیت خمشی تغییر یافته با تغییر مقاومت بتن طبق آیین‌نامه LRFD و آشتو استاندارد

ظرفیت خمشی اعضای خمشی وابسته به مقاومت فشاری بتن نبوده، بلکه وابسته به ظرفیت کابل‌ها و عمق مؤثر است [۵].

با ثابت نگه داشتن شمار کابل‌ها، عمق مؤثر با افزایش مقاومت فشاری بتن افزایش یافته، این امر سبب افزایش ظرفیت خمشی مقطع خواهد شد.

با افزایش مقاومت بتن از ۲۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، حدود ۴ درصد افزایش ظرفیت خمشی خواهیم داشت.

مراجع

- [۱] م.م. اتفاق و د. بهکام کیا، «بررسی آماری پاسخ دینامیکی پل بر اثر عبور خودرو با خصوصیات و کلاس‌بندی اتفاقی در شرایط مختلف سطح جاده»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۷۷-۹۳.
- [۲] ز. تبریزیان، م. حسینعلی‌بیگی و غ. قدرتی امیری، «تشخیص آسیب در سازه‌های فلزی با استفاده از اطلاعات خیز استاتیکی و الگوریتم ژنتیک»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۴۷-۱۵۸.
- [۳] ف. قلی‌پور و ن. ظریف مقدم باصفت، «طراحی بهینه شکل و ابعاد هندسی عرشه فولادی در سقف مرکب بر اساس مطالعات عددی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۳، شماره ۴۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۹-۴۵.
- [4] G. Guzman Barron Torres, J.F. Brotchie and C.A. Cornell, C.,(1966). "A program for optimum design of prestressed concrete highway bridges", journal prestressed concrete institute, Vol. 11, No. 3, 1966, pp. 63-73.
- [۵] ش. طاحونی، طراحی پل (پل‌های بتن مسلح، فولادی، و پیش‌تنیده)، انتشارات دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۲.
- [6] H.L. Jones, "Minimum cost prestressed concrete beam design", Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 11, 1985, pp. 2464-2478.
- [7] S.K. Mirtalaei, PS. Yang, H. Henry and T. Tang, "Economic Impact of AASHTO, LRFD Specifications and its Optimization for the Prestressed I-Girder Bridges Using High Strength Concrete in Arizona Department of Transportation", The 2004 Concrete Bridge Conference.
- [8] B. Chang, K. Mirtalaei, S. Lee, and K. Leitch, "Optimization of Post-Tensioned Box Girder Bridges with Special Reference to Use of High-Strength Concrete Using AASHTO LRFD Method", Advances in Civil Engineering, Vol. 2012.
- [۹] ح. نادرپور، ع. خیرالدین، م. نائینی عرب، «طراحی بهینه عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده جعبه‌ای بر اساس آیین‌نامه بارگذاری پل ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، مجله مهندسی حمل و نقل، سال ۶، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۳۵۵-۳۶۹.
- [10] R. Khadiranaikar and T. Venkateshwar, "effect of number of cells in psc box girder bridge", Development, Vol.3 ,No. 6, 2016.
- [11] F. Prestressing, The system of the inventor of prestressed concrete, 2010.
- [12] AASHTO, Standard specifications for highway bridges (17th edition), 1989
- [13] L. Aashto, Bridge design specifications, edited by American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC,2014.