

بهینه‌سازی پل‌های قوسی بتنی با جان باز

مجید پورامینیان^{۱*} و محسن قائمیان^۲

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران

۲. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

mpouraminian@iauramsar.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۶]

چکیده - طرح بهینه پل قوسی بتنی به تعدادی از پارامترها وابسته است. طراحی پل‌های گفته شده به گونه‌ای که تمامی محدودیت‌های طراحی و اجرایی را تامین کند کار دشواری است. در این مقاله با استفاده از روش الگوریتم *SPSA* شکل زیرسازه‌ی پل بهینه‌سازی شده است. پل قوسی مورد مطالعه در این پژوهش از نوع پل‌های با جان باز است. هدف از طرح بهینه، شکلی از پل است که حجم بتن‌آرمه مصرفی برای ساخت قوس و پایه‌های آن حداقل باشد. ارتفاع قوس در وسط دهانه، ارتفاع قوس در تکیه‌گاه قوس، خیز قوس و شعاع چپ و راست سطوح بالا و پایین قوس به عنوان متغیرهای طراحی مساله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. قیود در نظر گرفته شده در بهینه‌سازی زیرسازه‌ی پل شامل قیود تنش، تغییرشکل و هندسی است. در پایان نشان داده شده است که الگوریتم *SPSA* روشی موثر در بهینه‌سازی شکل پل قوسی با جان باز است و برای مطالعه‌ی موردی پل ستینا، حجم بتن آرمه زیرسازه‌ی پل ۲۳ درصد کاهش نسبت به طرح اجرا شده داشته است.

واژگان کلیدی: پل قوسی جان باز، بهینه‌سازی شکل، الگوریتم *SPSA*، زیرسازه پل، پل ستینا.

۱. مقدمه

ارماپولاس و همکاران [۱] در سال ۱۹۸۵ در مطالعه‌ای پارامتری خیز بهینه پل‌های فولادی جان باز برای دو حالت قوس با تکیه‌گاه گیردار و مفصلی با دهانه ۶۰ الی ۲۴۰ متر و نسبت خیز به دهانه ۰/۱۰ الی ۰/۴۰ را بررسی کردند. در این پژوهش هدف کمینه کردن وزن فولاد مصرفی در سازه بود. نتایج پژوهش آن‌ها در قالب گراف‌هایی دو بعدی بر اساس خیز به دهانه و وزن بهینه نشان داده شده است. برای قوس‌های دو سر مفصل، بهترین نسبت خیز به دهانه ۰/۱۶ و برای حالت دو سر گیردار بین ۰/۱۳ الی ۰/۲۰ به دست آمده است.

لونیس و همکاران [۲] در سال ۱۹۹۵ با کمک روش بهینه‌سازی چند هدفه‌ی مقید، بهترین سیستم عبورگاه پل را از میان مقاطع تیرهای پیش ساخته *I* شکل، شاهتیر قوطی

طرح سازه‌ای مناسب مستلزم تامین هم‌زمان ایمنی و هزینه کمینه است. بهینه‌سازی هزینه، به ویژه در سازه‌های بزرگ مقیاس حائز اهمیت است. پل‌های قوسی جان باز عموماً جزو بناهای بزرگ مقیاس محسوب می‌شوند. از این‌رو کمینه‌سازی هزینه ساخت پل قوسی زمینه پژوهش‌های مهمی محسوب می‌شود. طراحان سازه در عمل برای طراحی سازه‌ی پل از روش سعی و خطا برای کمینه‌سازی هزینه ساخت پل استفاده می‌کنند. اما به کارگیری روش سعی و خطا نیازمند تجربه و مطالعات اولیه طرح است در حالی که روش بهینه‌سازی در یک مرحله برآورد دقیقی از طرح بهینه را می‌دهد.

تحت بارگذاری استاتیکی خواهد شد. آنها نشان دادند که استفاده از چنین سیستمی مزایای زیادی از جمله ساخت و اجرای راحت قوس و کاهش وزن پل می‌شود.

لوته و همکاران [7] در سال ۲۰۱۱ در مقاله‌ای الگوریتمی برای بهینه‌سازی پل کابلی به کمک الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. هزینه مصالح مورد نیاز در ساخت پل به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. رفتار غیرخطی هندسی مصالح در این پژوهش لحاظ شده است. همه‌ی المان‌های به کار رفته در نرم‌افزار المان محدود پژوهش گفته شده المان‌های خطی است. برای عبورگاه نیز از مقطع جعبه‌ای با یک سلول استفاده شده است. آن‌ها نشان دادند که برای پل‌های قوسی با دهانه ۶۰ متر ۲۵٪ کاهش هزینه و برای دهانه تا ۵۰۰ متر این صرفه جویی تا ۴۵٪ نیز رسیده است.

مکی آبادی و همکاران [8] در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ای پل فولادی یک دهانه را به کمک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه آموزش-یادگیری ارائه کردند؛ نشان دادند که به کارگیری این روش برای بهینه‌سازی پل‌های با دهانه بلند مفید است. به منظور ساده‌سازی، بارگذاری یکنواختی برای در نظر گیری بار مرده و زنده عبورگاه لحاظ شده است. متغیرهای طراحی سطح مقطع اعضای فولادی در نظر گرفته شده است.

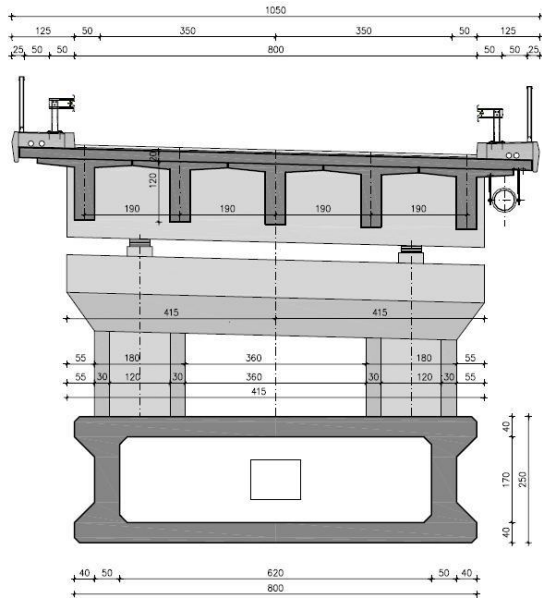
آیدین و همکاران [9] در سال ۲۰۱۳ به کمک الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی پلی با عبورگاه بتنی پیش کشیده را ارائه کردند. تابع هدف کمینه‌سازی هزینه کلی پل، هزینه کلی، شامل مجموع هزینه شاه تیر، تیرفرعی، پایه و پی است. هزینه مصالح با واحد پولی محل انجام پروژه برآورد شده است. تعداد دهانه، ابعاد مقطع تیر پیش کشیده، مساحت فولاد مصرفی در تیر پیش‌تینده به عنوان متغیرهای طراحی معرفی شده است. در مراجع [۱۰] الی [۱۴] نیز مطالعاتی انجام شده است.

هدف از پژوهش حاضر بهینه‌سازی شکل پل‌های قوسی جان باز است. بهینه‌سازی سازه‌ی بزرگ مقیاس پل قوسی دهانه بلند به دلیل تعداد متغیرهای طراحی زیاد کاری دشوار است و برای امکان‌پذیر شدن حل چنین

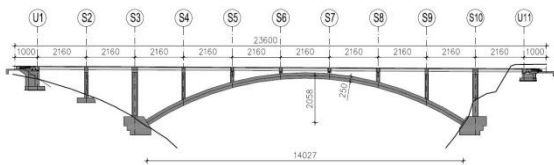
شکل تک سلوله، دو سلوله، دال توپر پیش کشیده و دال با حفره‌های متعدد انتخاب کردند. عرض عبورگاه در روند بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است. متغیرهای طراحی برای سیستم‌های عبورگاه مختلف جداگانه در نظر گرفته شده‌اند. برای نمونه در مقطع قوسی با یک سوراخ، ضخامت جداری مقطع، عرض عبورگاه پیاده و ارتفاع کلی مقطع به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. معیار انتخاب جواب‌های نامغلوب آن‌ها فاصله با نرم‌های مختلف از نقطه‌ی آرمانی است. پژوهش مشابهی به وسیله‌ی اوکوبو و همکاران [۳] در سال ۱۹۹۸ برای بهینه‌سازی چند هدفه‌ی عبورگاه پل‌های بتنی پیش کشیده به کمک بهینه‌سازی فازی با در نظر گرفتن هزینه ساخت و زیبایی پل انجام گرفته است. مقاله‌ای جامع به وسیله‌ی خی و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۳ راجع به بهینه‌سازی توپولوژی انواع پل‌ها با در نظر گرفتن قیود تنش، تغییرمکان و قیود فرکانسی ارائه شده است.

بهینه‌سازی پل‌های کابلی با دهانه‌ی بلند به وسیله‌ی بالدومیر و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ انجام شده است. المان‌های مورد استفاده در مدل‌سازی، المان تیری ۳ گرهی سه بعدی که هر گره قابلیت انتقال در سه جهت را دارد است. برای جلوگیری از انتقال لنگر خمشی، دو انتهای کلیه‌ی المان‌ها مفصلی مدل‌سازی شده است. تابع هدف کمینه‌کردن حجم فولاد مصرفی در پل در نظر گرفته شده است. قید تغییر مکان افقی پایه‌ی نگهدارنده‌ی کابل‌ها، قید تغییر مکان قائم عبورگاه پل و تنش کششی در کابل از قیود در نظر گرفته شده در این پژوهش است. سه ترکیب بارگذاری برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. تعداد و سطح مقطع کابل‌ها از متغیرهای طراحی این پژوهش است.

وی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ پیشنهاد طراحی پلی قوسی با دهانه ۴۲۰ متر را ارائه کردند. مقطع قوس گفته شده، جعبه‌ای با بال بتنی و جان فولادی است. در اثر جایگزینی جان فولادی با جان بتنی مقداری از صلبیت قوس کاسته می‌شود و ایجاد تغییرمکان‌های بزرگتری



شکل (۱). برش عرضی پل ستینا



شکل (۲). نیمرخ طولی پل ستینا



شکل (۳). نمای پل ستینا

۳. مدل سازه و تحلیل

به منظور بهینه سازی شکل پل قوسی، مدل پارامتری سه بعدی نشان داده شده در شکل (۴) به کمک نرم افزار اجزای محدود Ansys ایجاد شده است. برای مدل سازی قوس از المان های هشت گرهی ایزوپارامتریک خطی استفاده شده است. [۱۶] به منظور مدل سازی ستون، کوله

مسایلی نیاز است مساله تا جایی که امکان پذیر است و خطای کمی در پاسخ ایجاد کند ساده سازی شود. از این رو از تغییرات اندازه و شکل روسازه ی پل در روند بهینه سازی چشم پوشی شده است و مشخصات آن مطابق طرح اجرا شده در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد و مقطع ستون های متصل کننده ی روسازه به قوس در طول بهینه سازی ثابت و برابر با طرح سازه ی موجود در نظر گرفته شده است. به عبارتی بهینه سازی برای زیر سازه ی پل انجام گرفته است. تغییرات در شکل قوس و مقطع قوس و ارتفاع ستون ها دیده شده است. ارتفاع قوس در وسط دهانه، ارتفاع قوس در تکیه گاه قوس، خیز قوس و شعاع چپ و راست سطوح بالا و پایین قوس به عنوان متغیرهای طراحی مساله ی بهینه سازی در نظر گرفته شده است که در قالب بردار متغیرهای طراحی در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$V = \{T_C; T_{AL}; T_{AR}; U_{UpoS}; R_{LL}; R_{RL}; R_{LU}; R_{RU}\} \quad (1)$$

۲. توصیف پل

مطالعه موردی پژوهش حاضر، پل واقع بر رودخانه ستینا با دهانه ۱۴۰/۳۰ متر در نزدیکی شهر Trilj است. زمان ساخت این پل در سال ۲۰۰۵ میلادی است که در سال ۲۰۰۷ به بهره برداری رسیده است. این پل قوسی با جان باز از عبورگاه بتن مسلح با عرض ۱۰/۵۰ متر که شامل دو خط تردد اتومبیل و دو مسیر عابر پیاده ۱/۲۵ متری است. شیب طولی پل ۰/۵ درصد است. [۱۰] در شکل (۱) مقاطع عبورگاه، ستون و قوس پل موجود نشان داده شده است. در شکل (۲) نیز مشخصات هندسی پل نشان داده شده است. در شکل (۳) نیز نمایی از پل قابل مشاهده است. خیز به دهانه قوس ۱۵/۴ درصد اجرا شده است. شیب طولی پل ۰/۵ درصد از وسط به طرفین پل اجرا شده است. مدول الاستیسیته ی بتن مصرفی در پایه ها و تیرهای عرشه ۲۸ گیگاپاسکال و برای قوس زیرسازه ۳۳/۵ گیگاپاسکال است.

مراحل اجرایی الگوریتم SPSA را در شش گام به صورت زیر می‌توان بیان نمود: [۱۷]

گام اول: در این مرحله شمارنده $k=1$ انتخاب شده و یک مقدار X اولیه به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید می‌شود. ثوابت غیرمنفی α, γ, A, c, a مقادیر c_k و a_k بترتیب از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند.

$$c_k = \frac{c}{k^\gamma} \quad (2)$$

$$a_k = \frac{a}{(A+k)^\alpha} \quad (3)$$

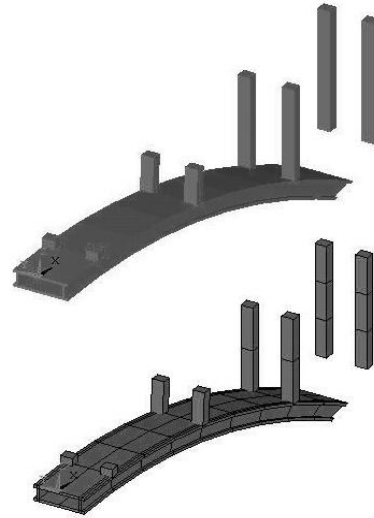
گام دوم: تولید بردار آشفتگی تصادفی Δ_k که باید شرایط خاصی را ارضاء نماید. هر یک از n مولفه این بردار به طور مستقل به وسیله یک تابع توزیع احتمال با میانگین صفر تولید می‌شود. یک انتخاب ساده و مناسب برای هر درایه استفاده از توزیع برنولی ± 1 با احتمال مساوی $\frac{1}{2}$ برای هر یک است. برای نمونه بردارهای تولید شده با توزیع برنولی با ده درایه است.

گام سوم: برای تولید مقادیر تابع هدف، حد بالا و پایین تابع را در نقطه مورد نظر برای اغتشاش هم‌زمان تمام درایه‌های بردار X محاسبه می‌کنیم، بدین منظور دو مقدار $y(X_k + c_k, \Delta_k)$ و $y(X_k - c_k, \Delta_k)$ به وسیله C_k و Δ_k محاسبه شده از مراحل قبل محاسبه می‌شوند.

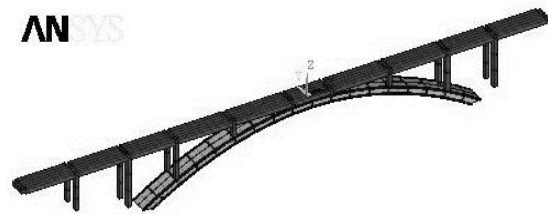
گام چهارم: در این مرحله گرادیان تقریبی تابع از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. $\hat{G}_k(X_k)$ گرادیان تقریبی تابع در تکرار k ام فرآیند بهینه‌سازی، و Δ_{kj} ، Z_{amin} درایه از بردار Δ_k است.

$$\hat{G}_k(X_k) = \frac{y(X_k + c_k, \Delta_k) - y(X_k - c_k, \Delta_k)}{2.c_k} \begin{bmatrix} \Delta_{k1}^{-1} \\ \Delta_{k2}^{-1} \\ \vdots \\ \Delta_{kj}^{-1} \\ \vdots \\ \Delta_{kp}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

و عبورگاه پل از المان سه بعدی الاستیک Beam4 با یک گره در هر انتهای تیر استفاده شده است. مدل اجزای محدود از ۶۸۲ گره، ۳۸۰ المان شامل ۲۸۶ المان حجمی و ۹۴ المان خطی تشکیل شده است. مدل اجزای محدود پل در شکل (۵) قابل مشاهده است.



شکل (۴). مصالح اختصاص داده شده به المان‌های پل



شکل (۵). مدل اجزای محدود پل

۴. فرمول‌بندی و مسئله‌ی بهینه‌سازی

الگوریتم گرادیان پایه‌ی SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) یک الگوریتم قدرتمند برای بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده است که توسط اسپال در سال ۱۹۹۴ توسعه و گسترش یافت. از جمله ویژگی‌های الگوریتم SPSA این است که در هر تکرار بهینه‌سازی، مستقل از تعداد متغیرهای طراحی، تنها به دو بار ارزیابی تابع هدف (تحلیل سازه) نیازمند است. ماهیت تصادفی این الگوریتم احتمال رسیدن به بهینه کلی را افزایش می‌دهد.

مقدار X به دست آمده در این مرحله باید کنترل شود تا از حدود مجاز X تجاوز نکرده باشد. حدود مجاز همان قیدهای مرزی X است که باید در هر مرحله از فرآیند بهینه‌سازی کنترل شوند؛ به عبارت دیگر باید X_{k+1} به دست آمده در این مرحله در رابطه (۶) صدق کند.

$$X^l \leq X_{k+1} \leq X^u \quad (6)$$

که X^l حد بالا و X^u حد پایین بردار X است در صورت تخطی از این حدود باید مقدار X اصلاح شود و با مقدار اصلاح شده به مرحله بعد رفت.

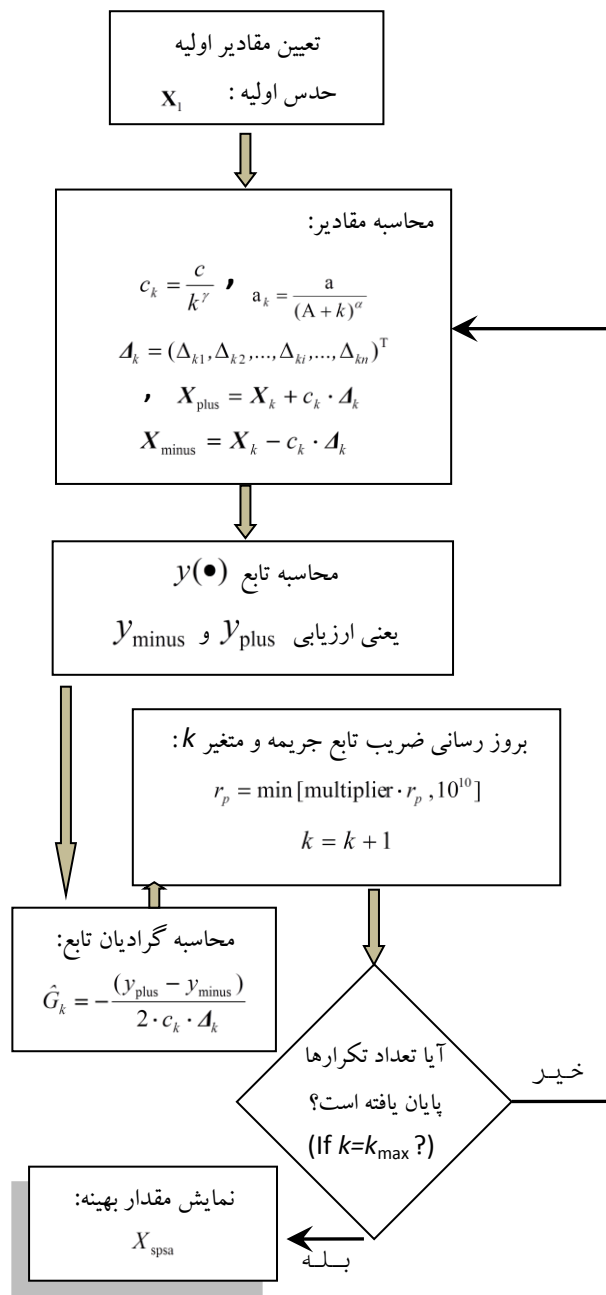
گام ششم: در این مرحله اگر تعداد تکرارهای مجاز بهینه سازی پایان یافته باشند برنامه متوقف می‌شود، در غیر این صورت باید مراحل دو تا پنج تکرار شوند. پس از پایان برنامه کمترین مقدار تابع هدف به دست آمده در طول فرآیند بهینه‌سازی که به ازای آن تمامی قیود نیز ارضا شده باشند به عنوان جواب بهینه در نظر گرفته می‌شود.

۵. توصیف برنامه

برنامه نوشته شده دارای سه مرحله است:

۱. تولید تصادفی هندسه پارامتری پل به کمک برنامه متلب
۲. فراخوانی نرم افزار المان محدود انسیز برای تحلیل سازه
۳. بهینه سازی مقطع، شکل پروفیل طولی قوس.

مقاطع اختصاص یافته به المان‌های یک بعدی تیری برای ستون، کوله و عبورگاه به ترتیب، مقاطع جعبه‌ای، مستطیلی و T شکل است که در طول روند بهینه سازی ثابت می‌مانند. از شیب عبورگاه در مدلسازی صرفنظر شده است. ارتفاع ستون‌های بین قوس و عبورگاه قابل تغییر است. هدف از بهینه سازی کمینه‌سازی حجم مصالح زیر سازه شامل ستون‌ها و قوس پل است که در

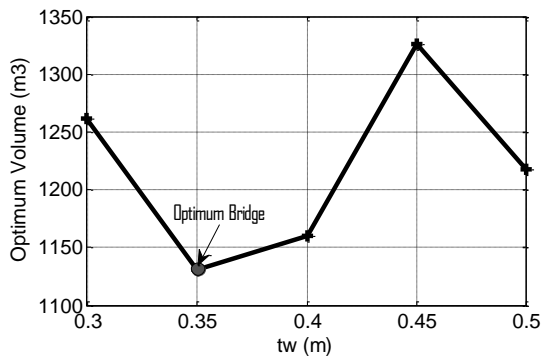


شکل (۶). فلوجارت الگوریتم SPSA

گام پنجم: در این مرحله با استفاده از گرادینان تقریبی به دست آمده از مرحله قبل مقدار X را با استفاده از رابطه (۵) بروز می‌کنیم که در این تغییر صورت X_k به X_{k+1} برای محاسبات در مرحله بعد تبدیل می‌شود.

$$X_{k+1} = X_k - a_k \cdot \hat{G}_k(X_k) \quad (5)$$

رابطه (۷) نشان داده شده است. برنامه نوشته شده قادر است قیدهای تنش فشاری و کششی در نقاط گوسی به ترتیب در رابطه (۸) و (۹) آورده شده است. قید تغییرمکان قائم قوس در رابطه (۱۰) قابل مشاهده است. روابط (۱۱) الی (۱۴) نیز قیدهای هندسی قوس است. قیدهای (۱۱) و (۱۲) سبب می‌شود ضخامت تکیه‌گاه قوس بیشتر از وسط قوس باشد. شعاع سطح پایین قوس از شعاع بالایی کوچکتر است که به وسیله قیدهای (۱۳) و (۱۴) کنترل شده است. ماکزیمم تنش اصلی کششی مجاز ۱۰٪ ماکزیمم تنش اصلی فشاری مجاز مصالح در نظر گرفته شده است. معیار گسیختگی مصالح ویلام- وارنکه در نظر گرفته شده است.



شکل (۷). حجم بهینه برای انواع ضخامت جان قوس

جدول (۱). متغیرهای طراحی پل بهینه

متغیر طراحی	علامت	اولیه	بهینه
ارتفاع میانی قوس	T_C	۲/۵	۱/۹۹
ارتفاع چپ قوس	T_{AL}	۲/۵	۳/۷۵
ارتفاع راست قوس	T_{AR}	۲/۵	۳/۵۰
فاصله قوس بالا از مبدا	U_{Upos}	۰	۰/۹۰
شعاع چپ سطح پایین	R_{LL}	۱۲۰	۱۲۵/۱
شعاع راست سطح پایین	R_{RL}	۱۲۰	۱۲۵/۷
شعاع چپ سطح بالا	R_{LU}	۱۲۴	۱۲۷/۶
شعاع راست سطح بالا	R_{RU}	۱۲۴	۱۲۷/۸
حجم بهینه: ۱۱۳۱ مترمکعب $h/l=0/136$			Optimum

یکی از پارامترهایی کلیدی عملکرد سازه‌ای قوس‌ها نسبت ارتفاع به دهانه است. این نسبت از مقدار ۰/۱۴۷ در طرح بهینه کاهش در طرح اجرا شده، به مقدار ۰/۱۳۶ در طرح بهینه کاهش یافته است. کاهش ۷/۵ درصدی نسبت فوق با کاهش طول قوس همراه است. نسبت ارتفاع مقطع میانی به کناری قوس در طرح اجرا شده ۱، و در طرح بهینه حدود

Minimize: $V_{Substr.} = V_{Arch} + V_{Column}$ (۷)

Subject to:

$\sigma_i \geq \sigma_{max}^c \quad i = 1, 2, \dots, nip$ (۸)

$\sigma_i \leq \sigma_{max}^t \quad i = 1, 2, \dots, nip$ (۹)

$\delta_i \leq \delta_{max} \quad i = 1, 2, \dots, nip$ (۱۰)

(۱۱) (۱۲)

$\frac{T_C}{T_{AL}} - 1 \leq 0$

$\frac{T_C}{T_{AR}} - 1 \leq 0$

$\frac{R_{RL}}{R_{RU}} - 1 \leq 0$ (۱۳)

$\frac{R_{LL}}{R_{LU}} - 1 \leq 0$ (۱۴)

nip نشان دهنده ی تعداد نقاط گوسی است که تنش در آنها قابل محاسبه است. ماکزیمم تغییرمکان قائم $\delta_{max} = \frac{S}{800}$ در نظر گرفته شده است [۲] و [۶].

۶. نمونه کاربردی

پس از ایجاد مدل هندسی با استفاده از قابلیت‌های برنامه تهیه شده، بارگذاری زنده مطابق آیین‌نامه

۷. نتیجه گیری

- روش SPSA روشی موثر در بهینه سازی شکل پل قوسی با جان باز است و برای مطالعه موردی پل ستینا حجم بتن آرمه‌ی زیر سازی پل ۲۳ درصد کاهش نسبت به طرح اجرا شده داشته است. همچنین نسبت خیز به ارتفاع طرح بهینه برای پل ستینا ۰/۱۳۶ به دست آمده است.
- برای این دسته از پل‌ها باید نسبت ارتفاع مقطع میانی به کناری قوس کمتر از یک باشد.
- با کاهش ضخامت جداره‌ی قائم مقطع قوس، بتن مصرفی کاهش پیدا می‌کند، اما کاهش بیش از اندازه‌ی ضخامت جداره‌ی قائم مقطع قوس، باعث غیراقتصادی شدن طراحی خواهد شد. همچنین افزایش بیش از اندازه‌ی ضخامت جداره‌ی قائم مقطع قوس، باعث غیراقتصادی شدن طراحی خواهد شد.

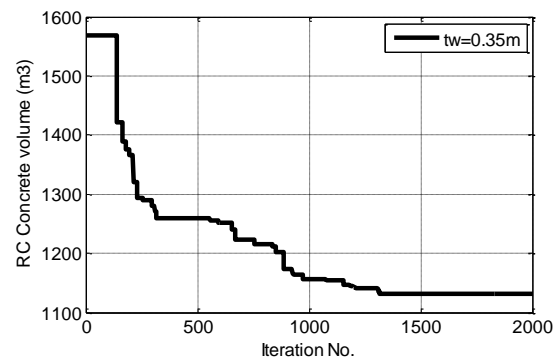
۸. فهرست علائم

σ_{max}^c	ماکزیمم تنش اصلی فشاری
σ_{max}^t	ماکزیمم تنش اصلی کششی
δ_{max}	تغییر مکان ماکزیمم قائم
S	طول دهانه

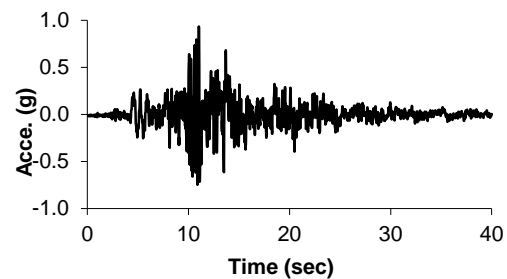
۹. مراجع

- [1]. Ermopoulos, I.Ch., " Optimum rise design of steel arch bridge", J. Construct. Steel research, 5, 1985, pp.303-310.
- [2]. Lonis,Z. , " Approach to multi criteria optimization of bridge structure", microcomputers in civil engineering, 10, 1995, pp. 233-238.
- [3]. Ohkubo, S., Dissanayake, P.B.R., Taniwaki, K., " An approach to multicriteria fuzzy optimization of prestressed concrete bridge system considering cost and aesthetic feeling ", Structural Optimization, 15, 1998, pp.132-140.
- [4]. Guan, hong, Chen, Yin-Jung, Loo, Yew-Chaye, " Bridge Topology Optimization with Stress, Displacement and Frequency Constraints ", Computer & Structures, 81, 2003, pp.131-145.
- [5]. Baldomir, A., Hernandez, S., Nieto, F., Jurado, J.A., " Cable optimization of a long span cable stayed bridge in La Coruna (Spain) ",

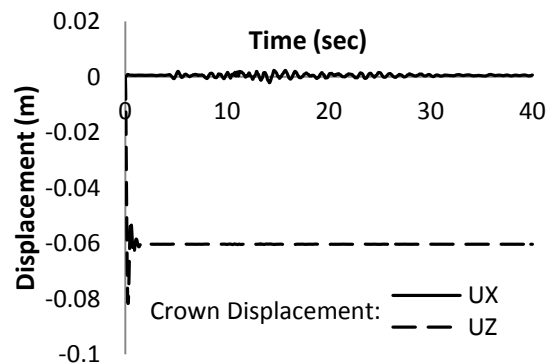
۰/۷ به دست آمده است. تغییر ارتفاع مقطع میانی و کناری قوس به ترتیب ۲۰- و ۳۵+ درصد است. در شکل (۸) تغییرات تابع هدف در ۲۰۰۰ تکرار قابل مشاهده است. به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای طرح بهینه، پل تحت شتاب‌نگاشت افقی زلزله طیس نشان داده شده در شکل (۹)، بارگذاری شده است. در شکل (۱۰) ماکزیمم تغییر مکان افقی و قائم بالای قوس نشان داده شده است که از مقادیر مجاز کمتر است.



شکل (۸). تغییرات تابع هدف



شکل (۹). مولفه‌ی افقی شتاب زلزله طیس



شکل (۱۰). مولفه‌ی افقی شتاب

- [12]. Adeli, Hojjat, Sarma, Kamal C., " Cost Optimization of Structures ", USA, John Wiley & Sons, Ltd,2006, 1-16.
- [13]. Strasky, Jiri, Bollman, Jim, " Two multi-span arch bridges built in Oregon, USA ", 7th International Conference on Arch Bridges, Croatia, 2013, pp.341-348.
- [14]. Hepola, Iida, Marwedel, Ronja, "Arch Bridges", Aalto University, 2012, Rak-11.3001 Design of Bridges.
- [15]. Zderic, Zeljko, Runjic, Ante, Hrelja, Gordana, " Design and Construction of Cetina Arch Bridge ", Chinese-Croatian Joint Colloquium, Brijuni Islands, 2008, pp.285-292.
- [16]. Zong, Zhouhong, Xia, Zhanghua, " Field testing and performance evaluation of a reinforced concrete box arch bridge ", Chinese- Croatia Joint Colloquium, Brijuni Islands, 2008, pp.301-308.
- [17]. Seyedpoor, S.M., Salajegheh, j., Salagegheh. E., Gholizadeh, S., " optimal design of arch dams subject to earthquake loading by combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and practice swarm algorithms", Journal of applied soft computing, 11,2011, pp.39-48.
- [18]. AASHTO, " Standard specifications for highway bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials", Washington, D.C., 2002.
- [19]. ANSYS. Inc, "Guide to Ansys Parametric Design Language (APDL)", USA, 2012.
- Advances in Engineering Software, 41, 2010, pp. 931-938.
- [6]. Wei, Jiangang, Huang, Qingwei, Chen, Baochun, " Trial design of arch bridge of composite box section with steel web-concrete flange ", Front. Archit. Civ. Eng. China, 4(3), 2010, pp.370-375.
- [7]. Lute, Venkat, Upadhyay, Akhil, Kumar Singh, Krishna, " Genetic Algorithms- Based Optimization of Cable Stayed Bridges ", J. Software Engineering & Applications, 4, 2011, pp. 571-578.
- [8]. Makiabadi, M.H., Baghlani, A., Rahnama, H., Hadianfard, M.A., " Optimal Design of Truss Bridges using Teaching-Learning- Based Optimization Algorithm ", International Journal of Optimization in Civil Engineering, 3(3), 2013, pp.499-510.
- [9]. Aydin, Zekeriya, Ayvaz, Yusuf, " Overall Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridge using Genetic Algorithm ", KSCE Journal of Civil Engineering, 17(4),2013, pp. 769-776.
- [10]. Togan, Vedat, Daloglu , Ayese, " Design and Reliability Based Optimization of a 2D Arch Bridge ", Journal of Engineering and Natural Sciences, 25(1), 2006, pp.17-26.
- [11]. Lute, Venkat, Upadhyay, Akhil, Kumar Singh, Krishna, " Computationally efficient analysis of cable-stayed bridge for GA-based optimization ", Engineering Application of Artificial Intelligence, 22, 2009, pp. 750-758.