

بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا با ساده‌سازی مدل سازه به همراه مطالعه‌ی موردی: پل لالی

میثم رون (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیررضا قیامی آزاد* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران

پل‌های کابلی ایستا به پل‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها، عرشه مستقیماً توسط کابل‌های مورب به برج‌ها وصل شده است. پل‌های کابلی ایستا، جزء سازه‌های بزرگ و با نام‌معنی زیاد محسوب می‌شوند، بنابراین بهینه‌سازی آن‌ها، همواره یک چالش بزرگ و پرهزینه بوده است. از طرفی تغییرشکل عرشه و برج‌ها وابسته به مقدار نیروی پیش‌کشش وارد شده به کابل‌هاست که به کمک فرایند بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. پژوهش حاضر قصد دارد با افزایش سرعت تحلیل، زمان فرایند بهینه‌سازی را کاهش دهد. لذا به جای تحلیل مدل سه‌بعدی و کامل سازه، از تحلیل جداگانه‌ی مدل‌های دو‌بعدی عرشه و برج بدون در نظر گرفتن کابل استفاده شده و پل کابلی لالی در خوزستان به عنوان نمونه به کار رفته است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که خطای محاسبه‌ی نیروی بهینه در روش ذکر شده نسبت به فرایند بهینه‌سازی مدل کامل ناچیز بوده و زمان محاسبه‌ی آن کمتر شده است.

واژگان کلیدی: پل کابلی ایستا، بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، پل لالی، نیروی کابل.

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (صص. ۱۲۵-۱۳۲)، (پنداشت فنی) دردی ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۲۵-۱۳۲، (پنداشت فنی)

meysamravan@ut.ac.ir
rghiami@ut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه با توجه به مسائل زیست‌محیطی و هزینه‌ی بالای ساخت و اجرای سازه‌های بزرگ، بهینه‌سازی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. در پل‌های کابلی ایستا، به منظور کنترل تغییرشکل و توزیع لنگر خمشی در عرشه و برج، کابل‌ها کشیده می‌شوند که این امر موجب کاهش سختی خمشی مورد نیاز المان‌های عرشه و برج و نیز بهبود عملکرد و سبک‌سازی سازه می‌شود.

طبق مرور ادبیاتی که مارتینز^[۱] و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱] در زمینه‌ی بهینه‌سازی پل‌های کابلی ایستا انجام داده‌اند، تا سال ۲۰۲۰ حدود ۴۲٪ از نوشتارهای مربوط به بهینه‌سازی پل‌های کابلی ایستا به بحث محاسبه‌ی نیروی کابل‌ها پرداخته‌اند. چهار راه‌حل کلی در نوشتارهای مختلف برای محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به منظور کمینه‌سازی تغییرمکان عرشه و برج مشاهده می‌شود که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2022.60867.3128

استاد به این مقاله:

رون، میثم و قیامی آزاد، امیررضا، ۱۴۰۲. بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا با ساده‌سازی مدل سازه به همراه مطالعه‌ی موردی: پل لالی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۲۵-۱۳۲.

۱.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با روش تغییرمکان صفر

وانگ^۲ و همکاران (۱۹۹۳)،^[۳] روش تغییرمکان صفر را پیشنهاد کرده‌اند که در آن، نیروی کابل‌ها به گونه‌ی محاسبه می‌شوند که تغییرمکان عرشه، در نقاط اتصال کابل‌ها به عرشه تحت بار مرده صفر شوند. برای این کار، ابتدا پل با فرض صفر بودن نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها تحلیل می‌شود. سپس نیروی لازم برای صفر شدن تغییرمکان عرشه در نقاط اتصال کابل‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه، با نیروهای محاسبه شده تحلیل و مشاهده می‌شود که هنوز تغییرمکان عرشه به صفر نرسیده است؛ پس دوباره نیروی لازم برای صفر شدن تغییرمکان مذکور محاسبه می‌شود و فرایند تکراری اخیر تا همگرا شدن پاسخ‌ها ادامه می‌یابد. این عملیات سبب بهینه‌سازی پل می‌شود، اما لزوماً منجر به صفر شدن تغییرمکان عرشه نمی‌شود و همواره خطا دارد. همچنین فرایند همگرایی، بسیار کند است.^[۴] ژانگ و او^۳ (۲۰۱۴)،^[۵] با در نظر گرفتن مشکلاتی، نظیر فشردگی محاسبات و عدم همگرایی پاسخ بهینه در روش تغییرمکان صفر به بهبود آن پرداخته‌اند. روش بهبود یافته به این صورت است که در هر مرحله از

جست‌وجوی جواب بهینه، یک درون‌یابی انجام می‌شود و فرایند طراحی را یک‌نواخت می‌کند.

۲.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با روش تعادل نیرو

چن^۴ و همکاران (۲۰۰۰)^[۶] از تعادل نیرو، برای محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی کابل‌ها استفاده کرده‌اند. در روش تعادل نیرو، نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به گونه‌ی محاسبه می‌شود که توزیع لنگر خمشی روی عرشه و برج بهینه شود. ابتدا، پل با فرض صفر بودن نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها تحلیل و لنگر خمشی آن محاسبه می‌شود. سپس ماتریس تأثیر کابل‌ها محاسبه می‌شود. برای این کار لازم است که سازه به تعداد کابل‌های موجود در پل تحلیل و در هر مرحله از تحلیل، نیروی پیش‌کشیدگی یکی از کابل‌ها، واحد فرض شود. در نهایت، با حل معادله‌ی ۱، نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها محاسبه می‌شود:

$$D^T \cdot X = \Delta t \quad (1)$$

که در آن، D ماتریس تأثیر، X بردار نیروهای مجهول پیش‌کشیدگی کابل‌ها و Δt بردار اختلاف بین نیروی پیش‌کشیدگی کابل در حالت ابتدایی و حالت بهینه هستند. نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در حالت بهینه، براساس توزیع لنگر خمشی یک‌نواخت روی عرشه محاسبه می‌شود. فابرسیانو^۵ و همکاران (۲۰۱۷)^[۷]، برای محاسبه‌ی توزیع لنگر خمشی یک‌نواخت روی عرشه، عرشه را یک تیر سراسری در نظر گرفته و هر کابل را یک تکیه‌گاه فرض کرده‌اند. سپس آن را تحلیل و توزیع لنگر خمشی عرشه را محاسبه کرده‌اند. ویژگی کارآمد روش تعادل نیرو، بی‌نیازی به محاسبات عددی در حل است.

۳.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با روش نیرو واحد

جانجیک^۶ و همکاران (۲۰۰۳)^[۸]، روش نیروی واحد را پیشنهاد داده‌اند. ایشان از توزیع لنگر خمشی بهینه‌ی روی عرشه، برای محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها استفاده کرده‌اند. در روش نیروی واحد، ابتدا یک توزیع مناسب برای لنگر خمشی روی عرشه، در محل اتصال عرشه و کابل‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس با اعمال نیروی واحد به هر یک از کابل‌ها، لنگر خمشی زیر هر کابل محاسبه و در نهایت، با استفاده از رابطه‌ی ۲، نیروی پیش‌کشیدگی هر یک از کابل‌ها محاسبه می‌شود:

$$M^K = M_P^K + \sum_{m=1}^n M_{T_m}^K \cdot X_m \quad (2)$$

که در آن، $M_{T_m}^K$ مقدار لنگر خمشی عرشه در زیر کابل K است که از طریق اعمال بار واحد بر کابل T_m محاسبه شده است، M_P^K لنگر ناشی از بار مرده در زیر کابل K ، M_{K_i} لنگر خمشی مطلوب در زیر کابل K و X_m نیروی پیش‌کشیدگی مجهول در کابل‌ها هستند. در بهینه‌سازی به روش نیروی واحد ممکن است پاسخ بهینه‌سازی به اکستریم‌های موضعی همگرا شود؛ از این رو لی^۷ و همکاران (۲۰۰۸)^[۹] یک روش دو مرحله‌ی براساس روش بار واحد ارائه کرده‌اند. در روش نیروی واحد، پیشینه و کمینه‌ی نیروی کششی کابل‌ها در مرحله‌ی دوم معرفی می‌شوند و سپس از این طریق، پاسخ بهینه‌ی مطلق به دست می‌آید. البته روش نیروی واحد فقط برای سازه‌هایی با رفتار خطی مناسب است و برای پل‌هایی که دهانه‌های بزرگی دارند، روش مناسبی نیست.

۴.۱. محاسبه‌ی نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با بهینه‌سازی

از طریق تشکیل تابع هدف و محاسبه‌ی اکستریم آن

در روش تشکیل تابع هدف، به منظور دست‌یابی به اهداف مختلف (نظیر کمینه‌سازی تغییرمکان و انرژی خمشی در سازه) یک تابع هدف تعریف می‌شود. سپس با تغییر دادن پارامترهای طراحی سعی می‌شود که تابع هدف اکستریم شود. در روش مذکور، امکان همگرا شدن پاسخ‌های بهینه‌سازی به سمت اکستریم‌های موضعی وجود دارد. از این روش استفاده از الگوریتم‌های متنوع حائز اهمیت است. همان‌گونه که در روش چهارم بیان شد، یکی از روش‌های محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستا، استفاده از الگوریتم‌های متنوع حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، برای جلوگیری از همگرا شدن پاسخ بهینه‌سازی به پاسخ‌های موضعی و همچنین کاهش هزینه‌ی بهینه‌سازی، از الگوریتم‌های متنوع و با اهداف گوناگون استفاده شده است. در ادامه، به مرور تاریخچه‌ی نوشتارهای موجود در این زمینه پرداخته شده است.

در مطالعات انجام شده توسط نگر^۸ و همکاران (۱۹۹۷)^[۱۰]، و سیمونس^۹ و همکاران^[۱۱] (۲۰۰۰)، ابتدا بردار نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به صورت رابطه‌ی ۳ به عنوان متغیر طراحی تعریف می‌شود:

$$x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}^T \quad (3)$$

سیس محدودیت‌های مسئله به کمک توابع g تعریف می‌شود. شماری از محدودیت‌های مسئله به صورت روابط ۴ و ۵ است:

$$g_1(x) = \frac{|\delta|}{\delta_{Max}} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

$$g_2(x) = \frac{|\sigma|}{\sigma_{Max}} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

که در آن‌ها، δ و σ به ترتیب تغییرمکان و تنش در سازه هستند. در نهایت، با استفاده از تحلیل‌های متوالی به ازاء x ‌های مختلف و کمینه‌سازی یک تابع اسکالر محدب، نیروی بهینه‌ی پیش‌کشیدگی کابل‌ها محاسبه می‌شود. در ریاضیات، تابعی اسکالر محدب^{۱۰} نامیده می‌شود که مشتق دوم آن در کل دامنه، منفی باشد. تابع مذکور، در مسئله‌ی حاضر به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$F(x) = \frac{1}{\rho} \ln \sum_{i=1}^M e^{\rho \times g_i(x)} \quad (6)$$

که در آن، M تعداد محدودیت‌ها و ρ وزنی است که به نسبت اهمیت هر محدودیت به آن داده می‌شود. این روش براساس یک رویکرد مبتنی بر آنتروپی^{۱۱} است. آنتروپی، معیاری برای گسسته‌سازی محدودیت‌هایی نظیر تغییرشکل و تنش مجاز در سازه است. در روش اخیر به دلیل مشکلات عددی و هزینه‌ی محاسباتی بسیار بالا، امکان لحاظ کردن اثر جابه‌جایی‌های بزرگ و تأثیر لنگر ثانویه^{۱۲} در تحلیل سازه وجود ندارد. مارتینز^{۱۳} و همکاران^[۱۲-۱۴] در ادامه‌ی مطالعات ذکر شده، سعی کردند که نیروهای وارد بر سازه در هنگام اجرای پل به روش طره‌ی متعادل^{۱۴} و تأثیر عوامل وابسته به زمان را در تحلیل خود لحاظ کنند.

حسن^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳)^[۱۴، ۱۵] روش جدیدی برای محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی بهینه در کابل‌ها تحت بار دائمی پل ارائه کرده‌اند که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک^{۱۶} و منحنی‌های B-Spline بوده است. در روش مذکور، ابتدا نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با منحنی B-Spline جایگزین و در نهایت نقاط کنترل منحنی B-Spline با استفاده از الگوریتم ژنتیک و فرایند تحلیل متوالی محاسبه

تعالد را به عنوان متغیر طراحی و انرژی خمشی سازه را به عنوان تابع هدف تعریف کردند. وانگ^{۲۴} و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۸] نیز برای بهینه‌سازی پل‌های کابلی ایستای نامتقارن از وزنه‌ی تعادل و همچنین از یک تابع دو هدفه به منظور کمینه‌سازی انرژی خمشی عرشه و وزن وزنه‌های تعادل استفاده کرده‌اند.

فرایند بهینه‌سازی نیاز به تحلیل‌های متوالی و با تعداد زیاد دارد و از طرفی تحلیل پل‌های کابلی ایستا با توجه به بزرگی آن‌ها، پرهزینه و زمان‌بر است. به همین علت در نوشتار حاضر، روش جدیدی برای محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها ارائه شده است، که زمان فرایند بهینه‌سازی در آن را کاهش می‌دهد.

در روش‌هایی که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای محاسبه‌ی نیرو یا سطح مقطع کابل‌ها استفاده می‌شود، نیاز به به‌روزرسانی ماتریس سختی و وارون کردن آن پس از هر بار تحلیل وجود دارد که این امر خود موجب زمان‌بر شدن تحلیل می‌شود. از طرفی پل‌های کابلی ایستا، معمولاً دهانه‌های بزرگی دارند و زمان تحلیل در آن‌ها زیاد است. در پژوهش حاضر، مدلی ارائه شده است که مدل اصلی را ساده‌تر می‌کند و همچنین نیاز به به‌روزرسانی و وارون کردن ماتریس سختی در هر تحلیل وجود ندارد.

۲. روش مدل‌سازی توسعه‌یافته

بیشتر پل‌های کابلی ایستا به صورت متقارن ساخته می‌شوند، پس می‌توان به جای تحلیل کل سازه نصف آن را مدل کرد و در وسط آن از تکیه‌گاه غلطکی گیردار استفاده کرد. از طرفی با توجه به مفصلی بودن اتصال کابل‌ها به عرشه و برج، نیرویی که هر کابل به عرشه و برج وارد می‌کند، مطابق رابطه‌ی ۹ برابر با مجموع نیروی پیش‌کشیدگی و نیروی حاصل از کرنش آن کابل است:

$$F_C = E_{Eg} \varepsilon_{CAC} + F_{PT} \quad (9)$$

که در آن، F_C و F_{PT} نیروی پیش‌کشیدگی و نیروی کابل موردنظر هستند و همچنین پارامترهای E_{Eg} ، AC و ε_c به ترتیب: مدول کشسانی معادل غیرخطی، سطح مقطع و کرنش هر یک از کابل‌ها هستند. پل‌های کابلی ایستا نیز به گونه‌ی طراحی می‌شوند که پل تحت بار مرده‌ی خود به صورت ثابت و بدون تغییرشکل زیاد باقی بماند، یعنی بار مرده و نیروهای پیش‌کشیدگی کابل‌ها هم دیگر را ارضا می‌کنند. در واقع، نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با هدف کمینه ساختن تغییرشکل سازه تحت بار مرده و به کمک فرایند بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که در هنگام محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها، می‌توان نیروی کابل را برابر با نیروی پیش‌کشیدگی آن کابل در نظر گرفت؛ زیرا کرنش کابل‌ها در این حالت ناچیز است و به سمت صفر میل می‌کند.

در پژوهش حاضر، کابل‌ها مدل نشده و به جای آن‌ها نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به عرشه و برج وارد شده است. همچنین برای ساده‌سازی مدل، عرشه و برج نیز به صورت جداگانه مدل‌سازی می‌شوند؛ در نتیجه، با ثابت بودن تمام مدل در فرایند بهینه‌سازی ماتریس سختی سازه برخلاف مدل‌سازی کل سازه نیاز به به‌روزرسانی ندارد. در ضمن با توجه به مفصلی بودن اتصال عرشه به برج و بالا بودن سختی محوری برج در زیر عرشه می‌توان عرشه و برج را به صورت جداگانه در نظر گرفت و محل اتصال را با یک تکیه‌گاه مفصلی جایگزین کرد. در شکل ۱، نحوه‌ی این تبدیل مشاهده می‌شود.

در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و به منظور کمینه ساختن مجذور مجموع مربعات کرنش کابل‌ها، نیروی پیش‌کشیدگی آن‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه،

می‌شود. ایشان در روش اخیر، به کمینه‌سازی تغییرشکل قائم عرشه و تغییرمکان افقی سر برج‌ها پرداخته‌اند. روش جدید برای پل‌های کابلی ایستا با دهانه‌ی بزرگ که در آن‌ها متغیرهای طراحی زیاد هستند، بسیار کارآمد است؛ زیرا در روش ارائه شده از مختصات x و y نقاط کنترل منحنی‌های B-Spline به جای نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به عنوان متغیر طراحی استفاده می‌شود. استفاده از نقاط کنترل منحنی‌های B-Spline به جای نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها سبب کمتر شدن متغیرهای طراحی و در نتیجه کاهش زمان محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها می‌شود. در روش مذکور، تابع هدف مجذور مجموع مربعات تغییرمکان‌ها در عرشه و برج است.

گوا^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۷] روشی برای بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در پل‌های کابلی ایستای قوسی شکل تعریف کرده‌اند. ایشان نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها را با منحنی B-Spline جایگزین و برای بهینه‌سازی از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یا SA^{۱۸} و نیز از مختصات نقاط کنترل منحنی B-Spline به جای مقدار نیروی پیش‌کشیدگی هر کابل استفاده کرده‌اند. از این رو تعداد متغیرهای طراحی بسیار کمتر شده و سرعت عملیات بهینه‌سازی افزایش یافته است. تابع هدف پژوهش حاضر مطابق معادله‌ی ۷ است:

$$F_{obj} = \sqrt{(d_1^{(T)} + d_p^{(T)} + \dots) + (p_1^{(T)} + p_p^{(T)} + \dots)} \quad (7)$$

که در آن، d و p به ترتیب تغییرمکان‌های قائم و افقی المان‌های عرشه و برج هستند. سان^{۱۹} و همکاران (۲۰۰۹)^[۱۹] با کمینه‌سازی انرژی حاصل از لنگر خمشی در المان‌های سازه به محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها پرداختند و پیش‌کشیدگی کابل‌ها را به عنوان متغیر طراحی و تابع ۸ را به عنوان تابع هدف تعریف کردند:

$$\min(f(T)) = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{\sqrt{E_i I_i}} M_i^T \quad (8)$$

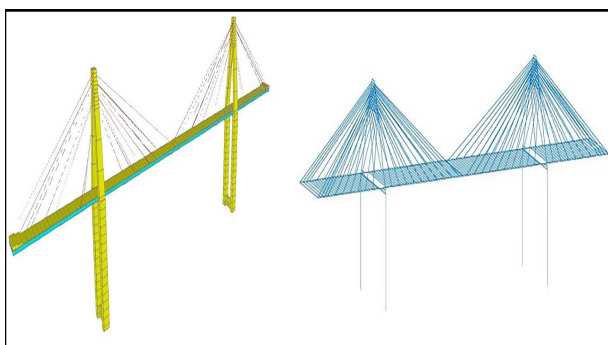
که در آن، m تعداد المان‌ها و پارامترهای d ، E ، I و M به ترتیب: طول، مدول کشسانی، ممان اینرسی و لنگر هر یک از المان‌ها هستند. در نهایت، تابع هدف به کمک (الگوریتم بهینه‌سازی ناحیه‌ی اعتماد^{۲۰}) کمینه می‌شود. در پژوهش حاضر، این فرضیات مطرح شده است:

۱. نیروی کششی کابل‌ها باید به گونه‌ی باشد که تنش ایجاد شده در کابل‌ها تحت بار مرده از ۴۰٪ تنش مجاز کابل‌ها بیشتر نشود.
۲. توزیع کشش بین کابل‌ها باید یکنواخت و معقول باشد، به صورتی که نیروی پیش‌کشیدگی دو کابل کنار هم زیاد با هم اختلاف نداشته باشند.
۳. نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها با طول آن رابطه‌ی مستقیم دارد، در نتیجه مقدار نیروی کششی کابل‌ها از دو انتها به وسط نزولی است. فنگ^{۲۱} و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۹] تعداد رشته‌های هر یک از کابل‌ها در پل کابلی ایستا را به عنوان متغیر طراحی و انرژی خمشی عرشه را به عنوان تابع هدف تعریف کرده‌اند. ایشان برای محاسبه‌ی انرژی خمشی، ابتدا ماتریس تأثیر کابل‌های پل را محاسبه کردند. ماتریس تأثیر با اختصاص دادن نیروی واحد به هر یک از کابل‌ها و محاسبه‌ی نیروهای دیگر کابل‌ها محاسبه می‌شود. آن‌ها در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سطح مقطع و نیروی کابل‌ها را محاسبه کرده‌اند.

سونگ^{۲۲} و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۰] یک روش بهینه‌سازی برای پل‌های کابلی ایستای نامتقارن ارائه کرده‌اند. ایشان برای متعادل کردن لنگر خمشی در برج، نصب وزنه‌ی تعادل^{۲۳} در زیر عرشه را پیشنهاد و اهمیت آن برای بهینه‌سازی پل را اثبات کردند. آن‌ها در روش مذکور، نیروی کششی کابل‌ها، وزن وزنه‌ی تعادل و طول وزنه‌ی

جدول ۱. تغییرشکل مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزارهای متلب و SAP2000 بدون پیش‌کشیدگی کابل‌ها به متر.

تغییرشکل		
افقی سر برج	قائم وسط عرشه	
۰/۲۴۱۳m	-۱/۰۹۴۳m	SAP2000
۰/۲۳۹۷m	-۱/۱۰۴۸m	MATLAB
درصد ۰/۶۶	درصد ۰/۹۶	درصد خطا



شکل ۳. سمت راست مدل سه‌بعدی پل لالی در نرم‌افزار متلب و سمت چپ مدل راستی آزمایشی پل لالی در نرم‌افزار SAP2000.

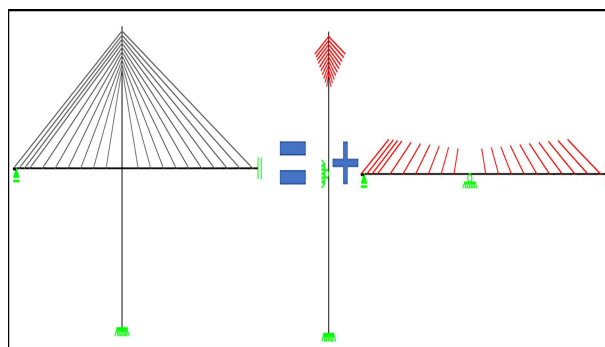
دال بتنی، پیاده‌روها، نرده‌ها، لوله‌ها و سایر تأسیسات می‌شود، بوده است. فولاد مصرفی پروژه حاضر از جنس ST52-3، مقاومت بتن مصرفی ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، مقاومت تسلیم کابل‌ها ۱۶۷۴ مگاپاسکال، و مدول کشسانی کابل‌ها ۱۹۵ گیگاپاسکال بوده است.

۱.۳. مدل اول

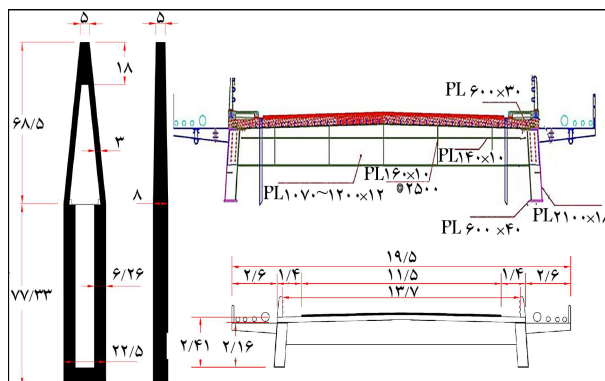
در مدل اول، کل سازه به صورت کامل و به صورت اجزاء محدود در نرم‌افزار متلب 25 مدل‌سازی شده و همچنین راستی آزمایشی آن در نرم‌افزار SAP2000 صورت گرفته است. سه عامل مؤثر در رفتار غیرخطی پل‌های کابلی ایستا، عبارت‌اند از: اثر لنگر ثانویه 26، تغییرشکل‌های بزرگ در سازه و افتادگی کابل‌ها در اثر وزن‌شان [22]، اثر افتادگی کابل‌ها را می‌توان با رابطه‌ی سختی معادل مطابق رابطه‌ی 10 لحاظ کرد: [23]

$$E_{Eq} = \frac{E}{1 + \frac{(\gamma \cdot L \cdot \cos(\alpha))^2 E}{12\sigma^2}} \quad (10)$$

که در آن، γ چگالی کابل، E مدول کشسانی کابل، α زاویه‌ی بین کابل و عرشه و σ تنش کابل هستند. دو اثر دیگر را نیز می‌توان با استفاده از تحلیل مرتبه‌ی دوم لحاظ کرد. مارتینز²⁷ و همکاران (15، 20)، اثبات کردند که اثر افتادگی کابل‌ها در غیرخطی شدن رفتار سازه بیشتر از دو عامل دیگر است و می‌توان از دو عامل دیگر در مقابل آن چشم‌پوشی کرد. لذا برای اعمال آثار غیرخطی در مدل ساخته شده با متلب، فقط اثر افتادگی کابل‌ها و با کمک مدول کشسانی معادل لحاظ شده است. برای راستی آزمایشی مدل ساخته شده، تغییرشکل افقی سر برج‌ها و تغییرشکل قائم میانه‌ی عرشه در حالتی که هیچ‌گونه نیروی پیش‌کشیدگی به کابل‌ها وارد نمی‌شود و پل فقط تحت اثر بارهای مرده قرار دارد، در دو مدل ساخته شده در نرم‌افزارهای SAP2000 و متلب در کنار هم مقایسه شده‌اند. نتایج راستی آزمایشی در جدول 1 ارائه شده است. همچنین در شکل 3، شماتیک مدل‌سازی در دو نرم‌افزار مذکور مشاهده می‌شود.



شکل ۱. تبدیل نصف پل کابلی به دو سازه‌ی مجزا (مدل دوم پل کابلی ایستای لالی).



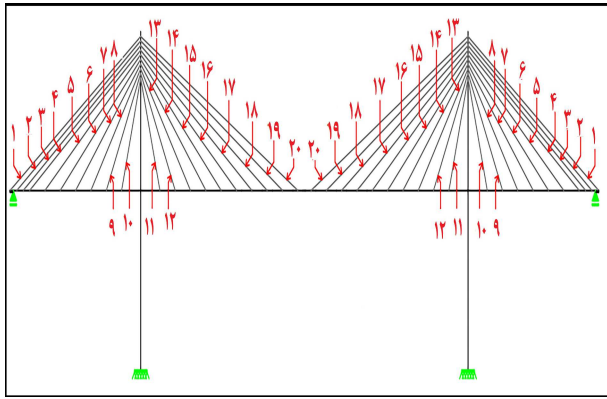
شکل ۲. جزئیات عرشه و برج پل لالی.

برای بررسی کارایی عملکرد این نوع مدل‌سازی، پل کابلی ایستای لالی به دو صورت کامل و به روش توسعه‌یافته، مدل‌سازی و تحلیل شده است.

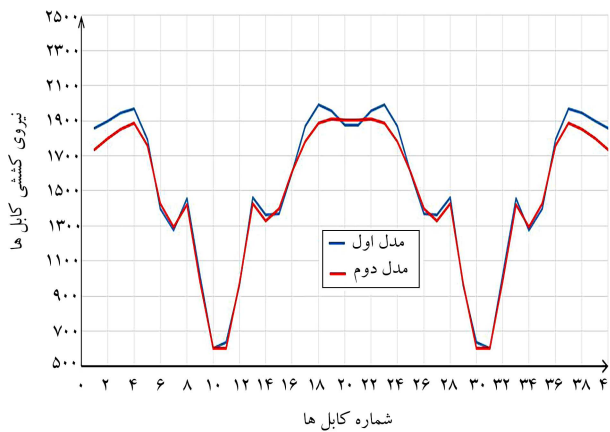
۳. پل کابلی ایستای لالی

پل کابلی لالی، راه ارتباطی بین شهرستان مسجد سلیمان و شهرستان لالی است که خطوط انتقالی نفت، آب و گاز منطقه نیز روی آن است. پل لالی در ۱۵ کیلومتری بالادست محور سد گتوند و در حدود ۳ کیلومتری بالادست پل قدیم لالی - مسجد سلیمان قرار دارد. فاصله‌ی بین کوله‌های دو طرف پل ۴۵۵/۲۵ متر است که از دو دهانه‌ی ۹۹/۶۲۵ متری و یک دهانه‌ی ۲۵۶ متری میانی تشکیل شده است. پل لالی در مجموع ۴۶۰/۵ متر طول دارد و عرض آن ۱۹/۵ متر است که ۱۱/۵ متر آن، محل عبور خودرو و مابقی آن مختص عبور پیاده‌رو و خطوط انتقالی است. آرایش کابل‌ها به صورت پنکه‌یی بوده و در هر طرف عرشه از ۴۰ کابل به فاصله‌ی ۱۲ متر استفاده شده است. عرشه‌ی پل به صورت کامپوزیت و ترکیبی از دو شاه‌تیر فولادی (U) شکل به ارتفاع ۲/۱۷ متر و یک دال بتنی ۲۵ سانتی‌متری روی آن است. همچنین تیورق‌های عرضی (I) شکل در هر ۴ متر از طول عرشه کشیده شده‌اند. همچنین پل لالی از دو برج به ارتفاع ۱۴۴/۶ متر تشکیل شده است که ۷۷/۳۳ متر آن پایین‌تر از تراز عرشه قرار دارد. برج‌ها، بتنی و با مقطع باکس به ضخامت ۶۰ سانتی‌متر هستند که به صورت منشوری ساخته شده‌اند. در شکل ۲، جزئیات عرشه و برج‌ها مشاهده می‌شود.

بارهای وارد بر سازه براساس آیین‌نامه‌های ایران فرض شده‌اند. بار مرده‌ی عرشه، شامل: تیرهای اصلی، تیرهای فرعی، طره‌ها و ۱۴۰ کیلو نیوتن دیگر (که شامل:



شکل ۴. شماره گذاری کابل‌ها.



شکل ۵. نیروی کششی محاسبه شده پس از پایان فرایند بهینه‌سازی از دو مدل ساخته شده.

عنوان متغیر طراحی استفاده شده است. متغیرهای طراحی به شرح روابط ۱۴ و ۱۵ هستند.

$$\text{Variables} : \{PT_1, PT_2, PT_3, \dots, PT_{20}\} \quad (14)$$

$$\{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{20}\} = \frac{\{PT_1, PT_2, PT_3, \dots, PT_{20}\}}{0.4 \times \sigma_a} \quad (15)$$

که در آن‌ها، PT نیروی پیش‌کشیدگی، A سطح مقطع و σ_a تنش مجاز کابل‌ها هستند و ترتیب شماره‌ی کابل‌ها نیز در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۶. بررسی نتایج

نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در هر دو مدل ساخته شده از پل کابلی ایستای لالی، بهینه‌سازی و محاسبه شده‌اند. پس از بهینه‌سازی، مقدار تابع هدف (مجذور مجموع مربعات کرنش کابل‌ها) در مدل اول به مقدار 0.17% و در مدل دوم به 0.0004% رسیده است که هر دو ناچیز هستند. این موضوع نشان می‌دهد که در حالت بهینه، کرنش کابل‌ها به سمت صفر میل می‌کند و فرض برابر بودن نیروی موجود در کابل با نیروی پیش‌کشیدگی آن کابل درست است.

نتایج بهینه‌سازی در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نیروی پیش‌کشیدگی محاسبه شده از بهینه‌سازی دو مدل تا حد قابل قبولی منطبق بر یکدیگر هستند. نیروهای محاسبه شده از بهینه‌سازی مدل دوم به صورت میانگین، 2% و نهایتاً 6%

۴. مدل دوم

در مدل دوم، مطابق توضیحات ارائه شده در بخش سوم، فقط یک برج و نصف عرشه به صورت جداگانه و دوبعدی مدل‌سازی شده‌اند. محل اتصال عرشه و برج از تکیه‌گاه مفصلی و در انتهای نصف شده‌ی عرشه از تکیه‌گاه غلطکی گیردار استفاده و به جای کابل‌ها، نیروی آن‌ها به عرشه و برج وارد شده است. همچنین با توجه به کم بودن تغییرشکل‌ها در حالت بهینه و ناچیز شدن کرنش کابل‌ها می‌توان از آثار غیرخطی سازه صرف نظر کرد.

۵. بهینه‌سازی

۱.۵. الگوریتم بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی مسئله‌ی کنونی و محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۲۸} استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی، یک الگوریتم فراابتکاری است که از حرکت پرندگان الگو گرفته است.^[۲۳] در الگوریتم مذکور، ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، سپس طبق معادلات ۱۱ و ۱۲، هر یک از ذرات جابه‌جا می‌شوند:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(x_{ib}^k - x_i^k) + c_2r_2(x_{gb}^k - x_i^k) \quad (11)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (12)$$

که در آن‌ها، c ضریبی ثابت، x_{ib}^k بهترین تجربه‌ی ذره‌ی i ام، x_{gb}^k بهترین تجربه‌ی کل جمعیت، x_i^k و v_i^k مکان و سرعت ذره‌ی i ام در تکرار k ام، r مقداری تصادفی بین 0 و 1 و w ضریب اینرسی هستند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در طی سالی‌های متوالی بهبود یافته است. به‌عنوان مثال، باررا^{۲۹} و همکاران (۲۰۱۶)^[۲۵] راجع به محدود کردن سرعت ذرات بحث کردند و نشان دادند که محدود کردن سرعت باعث بهبود عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی می‌شود. برای بهینه‌سازی مسئله‌ی مذکرشده از 200 ذره و 200 تکرار استفاده شده است، که در مجموع به 40000 بار تحلیل برای بهینه‌سازی هر مدل نیاز بوده است.

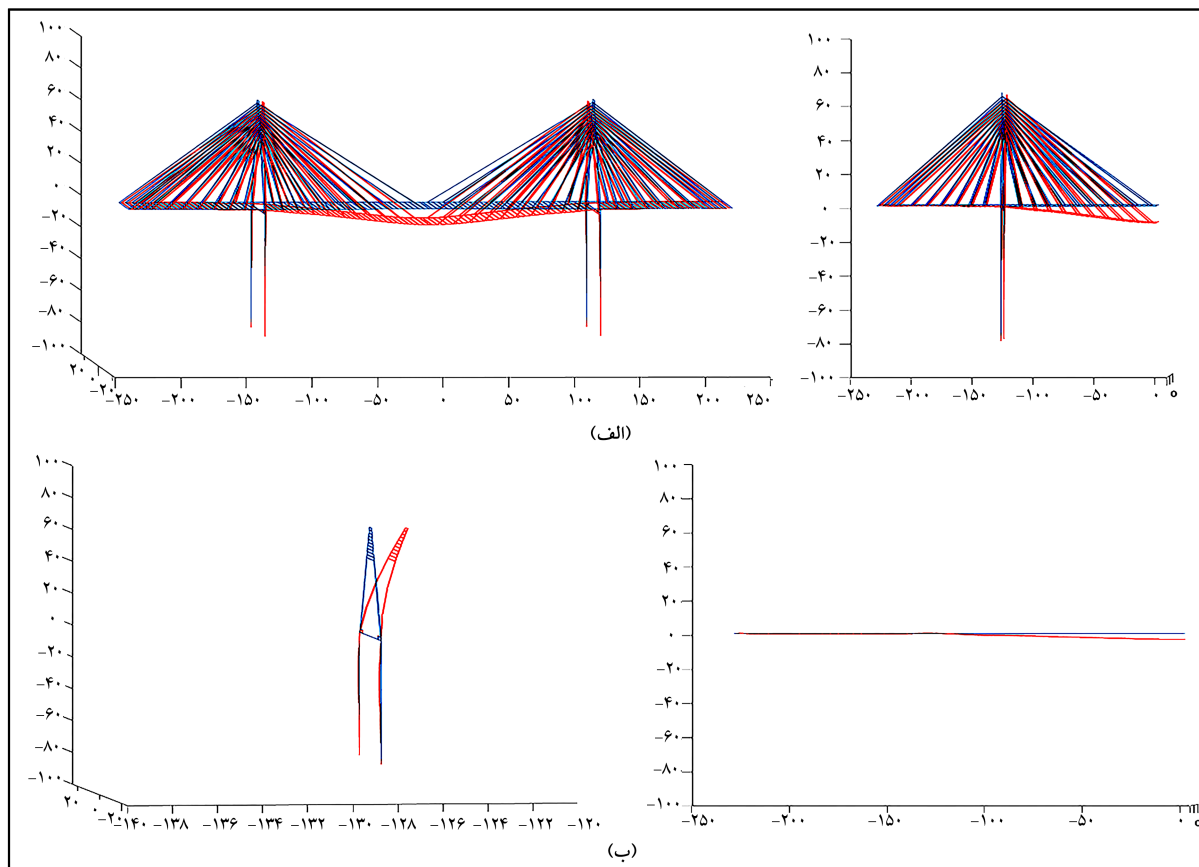
۲.۵. تابع هدف

هدف کمیته‌سازی تغییرشکل عرشه و برج است که می‌توان آن را به صورت مجذور مجموع مربعات کرنش کابل‌ها مطابق رابطه‌ی ۱۳ نوشت، تا فرض مدل دوم نیز به واقعیت نزدیک‌تر باشد. برای محاسبه‌ی کرنش هر یک از کابل‌های فرضی، از نسبت تغییر فاصله‌ی دو گره متناظر هر یک از کابل‌های فرضی پس از تغییرشکل سازه به طول اولیه‌ی آن کابل استفاده می‌شود.

$$ObjFunc = \sqrt{\varepsilon_{C_1}^2 + \varepsilon_{C_2}^2 + \varepsilon_{C_3}^2 + \dots + \varepsilon_{C_{20}}^2} \quad (13)$$

۳.۵. متغیرهای طراحی

با توجه به فرضیات سان^{۳۰} و همکاران (۲۰۰۹)^[۱۸] مقدار نیروهای پیش‌کشیدگی کمتر و یا در حدود 0.4% تنش مجاز کابل‌هاست. با توجه به رابطه‌ی تقریبی ذکر شده، فقط نیروهای پیش‌کشیدگی یا فقط سطح مقطع کابل‌ها به عنوان متغیرهای طراحی در مسائل تعریف می‌شوند. در پژوهش حاضر نیز از نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها به



شکل ۶. الف) تغییرشکل کل و نصف سازه در مدل اول، ب) تغییرشکل سازه‌های دوبعدی ساخته شده برای مدل دوم.

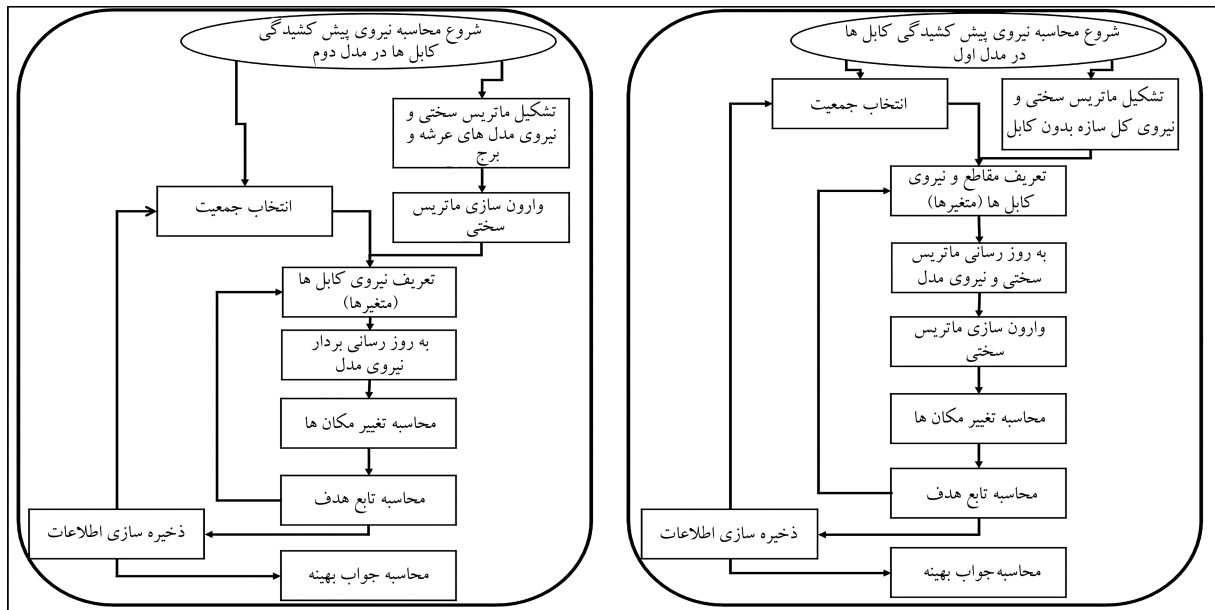
جدول ۲. جزئیات زمان لازم برای فرایند بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها در دو مدل.

مدل دوم		مدل اول		زمان عملیات (ثانیه)	عملیات
زمان کل (ثانیه)	تعداد تکرار	زمان کل (ثانیه)	تعداد تکرار		
۰/۰۶۴۲	۱	۲۵۶۸	۴۰۰۰۰	۰/۰۶۴۲	تشکیل ماتریس سختی
۰/۰۶۲۱	۱	۲۴۸۴	۴۰۰۰۰	۰/۰۶۲۱	وارون کردن ماتریس سختی
۸	۴۰۰۰۰	۸	۴۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	تشکیل بردار نیرو
۸	۴۰۰۰۰	۸	۴۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	محاسبه‌ی تغییرشکل سازه
۲۳۷۶	۴۰۰۰۰	۲۳۷۶	۴۰۰۰۰	۰/۰۵۹۴	محاسبه‌ی تابع هدف
۱۷۲۸/۲۶	۲۰۰	۱۷۲۸/۲۶	۲۰۰	۸/۶۴۱۳	اجرای الگوریتم بهینه‌سازی
۴۱۲۰/۳۹		۹۱۷۲/۲۶		مجموع زمان لازم برای فرایند بهینه‌سازی (ثانیه)	

۷. نتیجه‌گیری

پل‌های کابلی ایستا، جزء بزرگ‌ترین سازه‌های ساخته شده توسط بشر هستند و تحلیل و طراحی آن‌ها پیچیده، زمان‌بر و هزینه‌بر است. از طرفی همان‌گونه که گفته شد، روش مرسوم برای طراحی سطح مقطع کابل‌ها، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است و در فرایند استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیاز است که سازه به صورت متوالی و به تعداد دفعات زیاد مدل‌سازی و تحلیل شود. در پژوهش حاضر، با تغییر نحوه‌ی

خطا دارد که برای مسئله‌ی کنونی قابل قبول است. زمان فرایند بهینه‌سازی در مدل اول، حدود ۹۱۷۲ ثانیه و در مدل دوم حدود ۴۱۲۰ ثانیه بوده است که حدود ۵۵٪ کاهش زمان بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. جزئیات زمان لازم برای فرایند بهینه‌سازی در دو مدل مذکور، در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۶، در قسمت (الف)، تغییرشکل مدل اول و نصف آن پس از بهینه‌سازی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها و در قسمت (ب)، تغییرشکل مدل‌های دوبعدی عرشه و برج در مدل دوم مشاهده می‌شوند.



شکل ۷. روند نمای فرایند بهینه‌سازی در دو مدل اول و دوم.

اما در مدل دوم، ماتریس سختی سازه فقط یکبار ساخته و معکوس آن محاسبه شده است. مدل اول، کامل بوده و سه‌بعدی‌سازی پیچیده با درجات آزادی بالایی داشته است؛ اما مدل دوم، برخلاف مدل اول که یک مدل سه‌بعدی بوده است، به صورت دو‌بعدی مدل شده است. در نتیجه، بنا به دلایل ذکر شده انتظار می‌رود که فرایند بهینه‌سازی در مدل دوم نسبت به مدل اول کاهش چشم‌گیری داشته باشد. روند نمای فرایند بهینه‌سازی دو مدل ساخته شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی نیروهای پیش‌کشیدگی محاسبه شده از دو مدل ساخته شده برای پل کابلی ایستای لالی نشان می‌دهد که در مجموع روش مذکور، خطای نسبتاً پایینی داشته و سرعت فرایند بهینه‌سازی در آن، حدود ۵۵٪ کمتر شده است. این موضوع در مدل‌های با تعداد المان بیشتر و یا مش‌بندی‌های ریزتر بسیار با ارزش بوده است.

مدل‌سازی، سازه نیاز به مدل‌سازی مجدد در هر تکرار را ندارد. همچنین مدل جدید ارائه شده نسبت به مدل اصلی سازه ساده‌تر است، زیرا به صورت دو‌بعدی بوده و با مدل نشدن کابل‌ها در آن، تعداد المان‌ها نیز کاهش یافته است. عدم نیاز به مدل‌سازی در هر تکرار فرایند بهینه‌سازی و ساده‌تر شدن مدل سبب می‌شود که زمان فرایند بهینه‌سازی و هزینه‌ی طراحی آن کاهش یابد. به عنوان نمونه در پژوهش حاضر، دو مدل از پل کابلی ایستای لالی ساخته شد، که مدل اول آن یک مدل کامل و سه‌بعدی از پل و مدل دوم آن ترکیبی از دو مدل دو‌بعدی از عرشه و برج بوده است که کابلی در آن وجود نداشت. برای بهینه‌سازی سازه‌ی مذکور و محاسبه‌ی نیروی پیش‌کشیدگی کابل‌ها، هر یک از مدل‌ها ۴۰۰۰۰ بار تحلیل شدند. در مدل اول، برای هر تحلیل، ماتریس سختی ایجاد و وارون آن محاسبه شده است؛

پانویس‌ها

1. Martins
2. Wang
3. Zhang & Au
4. Chen
5. Fabbrocino
6. Janjic
7. Lee
8. Negro
9. Simoes
10. Convex Scalar Function
11. Entropy-based
12. $P - \Delta$
13. Martins
14. Cantilever Balanced

15. Hassan
16. Genetic Algorithm
17. Guo
18. Simulated Annealing
19. Sun
20. Trust Region Algorithm
21. Feng
22. Song
23. Counterweight
24. Wang
25. MATLAB
26. Martins
27. PSO
28. Barrera
29. H. Sun

منابع (References)

1. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. "Optimization of cable-stayed bridges: A literature survey", *Adv. Eng. Softw.*, **149**, p. 102829 (Nov. 2020). DOI:10.1016/J.advensoft.2020.102829.
2. Hassan, M.M. "Optimum design of cable-stayed bridges", Ph.D. Thesis, Western Ontario University (2010).
3. Wang, P.H., Tseng, T.C. and Yang, C.G. "Initial shape of cable-stayed bridges", *Comput. Struct.*, **47**(1), pp. 111-123 (Apr. 1993).
4. Kim, K.-S. and Lee, H.-S. "Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridge", *Comput. Struct.*, **79**(29-30), pp. 2681-2692 (Nov. 2001).
5. Zhang, J. and Au, F.T.K. "Calibration of initial cable forces in cable-stayed bridge based on kriging approach", *Finite Elem. Anal. Des.*, **92**, pp. 80-92 (Dec. 2014).
6. Chen, D.W., Au, F.T.K., Tham, L.G. and et al. "Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method", *Comput. Struct.*, **74**(1), pp. 1-9 (Jan. 2000).
7. Fabbrocino, F., Modano, M., Farina, I. and et al. "Optimal prestress design of composite cable-stayed bridges", *Compos. Struct.*, **169**, pp. 167-172 (Jun. 2017).
8. Janjic, D., Pircher, M. and Pircher, H. "Optimization of cable tensioning in cable-stayed bridges", *J. Bridg. Eng.*, **8**(3), pp. 131-137 (May 2003).
9. Lee, T.Y., Kim, Y.H. and Kang, S.W. "Optimization of tensioning strategy for asymmetric cable-stayed bridge and its effect on construction process", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **35**(6), pp. 623-629 (2008).
10. Negro, J.H.O. and Simoes, L.M.C. "Optimization of cable-stayed bridges with three-dimensional modelling", *Comput. Struct.*, **64**(1.4), pp. 741-758 (Jul. 1997).
11. Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. "Optimization of cable-stayed bridges with box-girder decks", *Adv. Eng. Softw.*, **31**(6), pp. 417-423 (Jun. 2000).
12. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. "Cable stretching force optimization of concrete cable-stayed bridges including construction stages and time-dependent effects", *Struct. Multidiscip. Optim.*, **51**(3), pp. 757-772 (Mar. 2015).
13. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. "Optimum design of concrete cable-stayed bridges", *Eng. Optim.*, **48**(5), pp. 772-791 (May 2016).
14. Martins, A.M.B., Simoes, L.M.C. and Negro, J.H.J.O. "Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities", *Comput. Struct.*, **155**, pp. 18-27 (Jul. 2015).
15. Hassan, M.M., Nassef, A.O. and El Damatty, A.A. "Determination of optimum post-tensioning cable forces of cable-stayed bridges", *Eng. Struct.*, **44**, pp. 248-259 (Nov. 2012).
16. Hassan, M.M. "Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique", *Eng. Struct.*, **49**, pp. 643-654 (Apr. 2013).
17. Guo, J., Yuan, W., Dang, X. and et al. "Cable force optimization of a curved cable-stayed bridge with combined simulated annealing method and cubic B-Spline interpolation curves", *Eng. Struct.*, **201**, p. 109813 (Dec. 2019).
18. Sun, H., Dou, Y.-Z. and Qian, Y.-J. "Optimal cable tension design for cable-stayed bridges on trust region algorithm", *International Conference on Transportation Engineering*, pp. 1826-1831 (2009).
19. Feng, Y., Lan, C., Briseghella, B. and et al. "Cable optimization of a cable-stayed bridge based on genetic algorithms and the influence matrix method", *Eng. Optim.*, **54**(1), pp. 20-39 (Jan. 2022).
20. Song, C., Xiao, R. and Sun, B. "Optimization of cable pre-tension forces in long-span cable-stayed bridges considering the counterweight", *Eng. Struct.*, **172**, pp. 919-928 (Oct. 2018).
21. Wang, Z., Zhang, N., Du, X. and et al. "Multiobjective optimization of cable forces and counterweights for universal cable-stayed bridges", *J. Adv. Transp.*, **2021**, pp. 1-13 (Jan. 2021).
22. Ju Y.-Zh., Liu, W.-Ch., Bai, J.-F. and et al. "Nonlinear static analysis of cable-stayed bridge", *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, pp. 2883-2886 (2010).
23. Xia, G.Y. and Cai, C.S. "Equivalent stiffness method for nonlinear analysis of stay cables", *Struct. Eng. Mech.*, **39**(5), pp. 661-667 (Sep. 2011).
24. Kennedy, J. and Eberhart, R. "Particle swarm optimization", *Studies in Computational Intelligence*, IEEE (1995).
25. Barrera, J., Alvarez Bajo, O., Flores, J.J. and et al. "Limiting the velocity in the particle swarm optimization Algorithm", *Comput. y Sist.*, **20**(4), pp. 635-645 (Dec. 2016).