

بررسی عملکرد پل‌های بتن سبک اجرا شده به روش طره‌یی متعادل تحت تأثیر رفتار وابسته به زمان انواع بتن سبک و انواع فولاد پیش‌تنیده

علی عباسی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا رهایی* (استاد)

شاپور طاحونی (استادیار)

دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۰۹-۱۰۱، (پادداشت نشی)

تغییر شکل‌های تابع زمان مصالح، در پل‌های اجرا شده به روش طره‌یی متعادل، موجب آسیب‌دیدگی پل‌ها می‌شود. استفاده از بتن سبک، با کاهش قابل ملاحظه‌ی نیروهای ثقلی، امکان اجرای دهانه‌های بزرگ‌تر را فراهم می‌کند، اما به علت عدم شناخت رفتار تابع زمانی مصالح، کمتر استفاده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از روش اجزاء محدود، پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی با نتایج داده‌برداری یک پل طره‌یی، یک مدل پل بتن سبک طره‌یی متعادل با دهانه‌ی ۷۴ متری انتخاب شد و اثر خزش و جمع‌شدگی بتن سبک و وادادگی فولاد، در دوره‌ی زمانی ۳۰ سال، در عملکرد پل مطالعه شد. سه نوع بتن سبک LC۶۰، LC۴۰ و LC۲۵ و دو نوع فولاد با وادادگی نرمال و کم، در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. مطالعات نشان می‌دهد که ۷۰-۸۰ درصد تغییر شکل‌های تابع زمان پل در ۳ سال اول بهره‌برداری رخ می‌دهند. سهم عوامل تابع زمان (خزش - جمع‌شدگی - وادادگی)، در افت وسط دهانه، در طول عمر پل به خصوص ۳ سال اول، در بتن‌های سبک با مقاومت‌های متفاوت یکسان است.

واژگان کلیدی: پل، روش طره‌یی متعادل، بتن سبک، رفتار تابع زمان، خزش، جمع‌شدگی، وادادگی کابل‌های پیش‌تنیدگی، بازتوزیع نیرو.

۱. مقدمه

امروزه با توجه به اهمیت توسعه‌ی راه‌های ارتباطی، توجه ویژه‌ی به مباحث مرتبط با پل‌سازی شده است. در سال‌های اخیر، تمایل به ساخت پل‌های بتنی با دهانه‌های متوسط تا بزرگ افزایش یافته و در نتیجه، مهندسان به ساخت پل‌ها به روش طره‌یی متعادل، به‌عنوان روشی اقتصادی، سریع و زیبا برای اجرای دهانه‌های متوسط تا بزرگ روی آورده‌اند. علاوه بر مزایای ذکر شده برای اجرا به روش طره‌یی، به علت استفاده از پیش‌تنیدگی در روش طره‌یی، نه فقط امکان بهره‌برداری کامل‌تر از بیشینه‌ی مقاومت مصالح به دست می‌آید، بلکه با استفاده از آن می‌توان برخی رفتارهای سازه همچون تغییر شکل‌ها را نیز کنترل کرد. اجرای پل‌های پیش‌تنیده به روش طره‌یی متعادل، به خصوص زمانی ضروری به نظر می‌رسد که قالب‌بندی و بتن‌ریزی درجا و پیوسته‌ی عرشه، غیراقتصادی و غیرعملی باشد. با توجه به پیشرفت‌های حاصل در فناوری‌های ساخت و به‌کارگیری بتن سبک سازه‌یی و همچنین با توجه به مزایای بتن سبک، امروزه تمایل زیادی به استفاده از بتن سبک در سازه‌ها، از جمله پل‌ها برای اجرای دهانه‌های

بزرگ‌تر وجود دارد. در کشورهای پیشرفته اجرای پل‌های پیش‌تنیده با استفاده از بتن سبک، سابقه‌ی چندساله دارد، اما پل‌های بتن سبک طره‌یی متعادل به علت عدم انجام مطالعات کافی در شناخت رفتارشان از جمله رفتار تابع زمان مصالح، در کشور ایران هنوز استفاده نشده‌اند. تغییر شکل‌های درازمدت مصالح، آثار ویژه‌ی در رفتار پل‌های پیش‌تنیده‌ی قطعه‌یی دارند که در صورت استفاده از بتن سبک به جای بتن معمولی، به دلیل بیشتر بودن تغییر شکل‌های تابع زمان بتن سبک، آثار مذکور بیشتر نیز می‌شوند. افزایش تغییر شکل‌های تابع زمان بتن، از جمله خزش و جمع‌شدگی، باعث کاهش تنش ناشی از پیش‌تنیدگی در کابل‌های مصرفی می‌شود که خود باعث کاهش مقاومت مقاطع و در برخی موارد باعث آسیب‌دیدگی پل می‌شود. با توجه به آنکه کمتر به رفتار تابع زمان بتن سبک و تأثیر آن در رفتار پل‌های اجرا شده به روش طره‌یی متعادل پرداخته شده است، لازم است در موضوع ذکر شده، مطالعات بیشتری صورت گیرد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۲/۶، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۱۷.

DOI:10.24200/J30.2018.1908.2013

۱.۱. تاریخچه‌ی مطالعات

در سال ۲۰۰۰، در دانشگاه سیدنی استرالیا بر روی موضوع «رفتار بلندمدت پل‌های

بتنی» پژوهشی صورت گرفت و در آن با در نظر گرفتن خواص بلندمدت بتن، شامل خزش و جمع‌شدگی، از رفتار بلندمدت فولادهای پیش‌تشدگی صرف‌نظر شد. در پژوهش مذکور یک کار آزمایشگاهی بر روی پلی‌داسترالیا انجام و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی با استفاده از آیین‌نامه‌های مختلف مقایسه شد.^[۱]

همچنین در سال ۲۰۰۲، در یک پایان‌نامه‌ی دکتری با عنوان «تغییر شکل‌های پل‌های بتنی طریقه‌ی متعادل» با برداشت داده از ۳ پل ساخته‌شده و مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار DIANA، سه مدل پل مورد بررسی که دو پل با بتن معمولی و یک پل با بتن سبک ساخته شده بودند با ابرار بندی و برداشت داده در طول زمان و همچنین مدل‌سازی اجزاء محدود عوامل تابع زمان مصالح با روابط داده‌شده در آیین‌نامه‌های مختلف، مقایسه‌ی بین صحت نتایج مدل‌های تابع زمان ارائه‌شده در آیین‌نامه‌های مختلف انجام شد.^[۲] و نتایج پژوهش مذکور در نوشتاری با عنوان «تغییر شکل‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت پل‌های طریقه‌ی رگرده‌شده» ارائه شد.^[۳]

در سال ۲۰۰۵، نیز در یک پایان‌نامه‌ی دکتری دیگر با عنوان «خزش و جمع‌شدگی بتن سبک با عملکرد بالا، با بررسی‌های چندمقیاسی» در امریکا، عوامل تابع زمان بتن سبک شامل خزش و جمع‌شدگی در ۳ سری آزمایش، شامل: آزمایش‌های بزرگ مقیاس، آزمایش‌های با مقیاس متوسط و آزمایش‌های کوچک مقیاس مورد بررسی قرار داد و میزان تأثیر خزش و جمع‌شدگی در بتن‌های سبک با مقاومت‌های مختلف مقایسه شد.^[۴]

همچنین در پژوهشی در زمینه‌ی تغییر شکل‌های تابع زمان مصالح (۲۰۰۹)، نتیجه‌ی پژوهش انجام‌شده در نوشتاری با عنوان «تجزیه و تحلیل وابسته به زمان پل‌های اجرا شده به روش طریقه‌ی متعادل ساخته‌شده با قطعه»، علاوه بر بررسی تأثیر خزش و جمع‌شدگی، تأخیر برش نیز در نظر گرفته شده بود و با مدل‌سازی اجزاء محدودی و مطالعه‌ی موردی دو پل قطعه‌ی ساخته‌شده با بتن معمولی، سعی در بهینه‌سازی در زمینه‌ی طراحی چگونگی قرارگیری تاندون‌ها شده است.^[۵]

پس از تخریب پل کورورا^۱، در سال ۲۰۱۰، نیز برخی پژوهشگران در زمینه‌ی تغییر شکل‌های بیش از حد تابع زمان تیرهای جمع‌ی پیش‌تندیده مطالعه و با مدل‌سازی تغییر شکل‌های تابع زمان مصالح با مدل‌های ارائه‌شده در آیین‌نامه‌های مختلف و مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج حاصل از داده‌برداری در طول زمان از پل کورورا، میزان اختلاف هر یک از مدل‌ها با مقادیر تجربی واقعی را مشخص کردند.^[۶] ایشان همچنین در ادامه، با مدل‌سازی اجزاء محدود با نرم‌افزار ABAQUS و با کالیبره کردن آن با داده‌های برداشت‌شده از تعداد زیادی پل در کشورهای مختلف، مدل جدید B3-set را که بر پایه‌ی مدل B3 ارائه شده و در آیین‌نامه‌ی ACI بوده و پارامترهای آن طبق کالیبراسیون گسترده‌ی انجام‌شده به‌روز شده بود، ارائه کردند و نتایج کارشان با عنوان «تغییر شکل‌های اضافی دهانه‌های داده‌برداری شده در یک پل پیش‌تندیده‌ی صندوقه‌ی» منتشر شد.^[۷]

همچنین در سال ۲۰۱۲، در یک پایان‌نامه‌ی دکتری در دانشگاه ویرجینیا^۲ با موضوع «بررسی پل‌های شاه‌تیری پیش‌تندیده و ساخته‌شده با بتن سبک پر مقاومت سازه‌ی»، کار آزمایشگاهی گسترده‌ی انجام شد و ۱۲ تیر پیش‌تندیده‌ی پر مقاومت (۸ تیر بتن سبک و ۴ تیر بتن معمولی) در ابعاد آزمایشگاهی و همچنین ۶ تیر پیش‌تندیده‌ی پر مقاومت (۵ تیر بتن سبک و یک تیر بتن معمولی) در ابعاد واقعی آزمایش شد. تیرهای ساخته‌شده طبق نمونه تیرهای ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی آشتو^۳ بودند و در طول ۶ ماه بررسی شدند و در طول دوره‌ی آزمایش، تغییرات طول، خیز تیر، کاهش پیش‌تشدگی و ظرفیت خمشی تیر بررسی و اندازه‌گیری شدند. با مقایسه‌ی نتایج و طراحی‌های آیین‌نامه‌ی آشتو، این نتیجه به‌دست آمد که با در نظر گرفتن کمی احتیاط، نمونه تیرهای طراحی شده در

آیین‌نامه‌ی آشتو با رفتار آزمایشگاهی تیرهای پیش‌تندیده‌ی بتن سبک مطابقت دارند.^[۸]

در سال ۲۰۱۳، نیز نتایج پژوهشی با عنوان «تغییر شکل‌های درازمدت پل‌های قطعه‌ی ساخته‌شده به روش طریقه‌ی متعادل» منتشر شد و با بیان اینکه تغییر شکل‌های درازمدت پل‌های قطعه‌ی بتنی درجا که با روش طریقه‌ی متعادل اجرا می‌شوند از آنچه در طراحی پیش‌بینی و در نظر گرفته می‌شوند، بیشتر است تغییر شکل‌های درازمدت پل‌های مذکور بررسی شدند و با انجام مطالعات پارامتریک و مدل‌سازی روند اجرای پل و همچنین با بررسی موردی پل رودخانه‌ی ولتاوا^۴ در جمهوری چک و داده‌برداری از پل از همان سنین ابتدایی، به مقایسه‌ی نتایج تجربی و نتایج مدل‌سازی پرداخته شد.^[۹]

همچنین با انتشار نوشتاری (در سال ۲۰۱۴) با عنوان «ساده‌سازی آنالیز وادادگی و جمع‌شدگی بتن پل‌های قطعه‌ی»، با بیان اینکه اعمال تأثیر وادادگی و جمع‌شدگی بتن در طراحی پل‌های ساخته‌شده به روش طریقه‌ی بسیار ضروری‌تر از باقی سازه‌هاست و تأثیر آن‌ها در سنین پایین بتن بسیار بیشتر است، به معرفی یک مدل ساده‌شده برای مدل‌سازی وادادگی و جمع‌شدگی پرداخته شد و با توجه به مشکلات مدل ریاضی، که بر مبنای تشکیل ماتریس سختی است و مدنظر قرار دادن آنکه وادادگی بتن تابعی خطی از بارگذاری و تابعی غیرخطی از زمان است، در نوشتار مذکور روشی ساده‌شده با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی برای اعمال تأثیر وادادگی و جمع‌شدگی بتن معرفی شد، و در پایان هر بازه‌ی زمانی تعادلی ناشی از تغییر شکل‌های ناشی از وادادگی و جمع‌شدگی بتن صورت می‌گیرد که تغییر شکل‌های مذکور خود موجب بازتوزیع نیروها در مقاطع می‌شوند. در هر بازه‌ی زمانی، بازتوزیع نیرو به‌عنوان نیروی خارجی وارد بر سازه برای بازه‌ی زمانی بعدی مدنظر قرار می‌گیرد.^[۱۰]

در نوشتار دیگری در همان سال با عنوان «عملکرد خدمت و سرویس دهی پل‌های صندوقه‌ی بتن سبک بلنددهانه»، بیان شده است که به دنبال ایجاد پس‌زمینه‌ی برای استفاده از بتن سبک در پل‌های بلنددهانه و به‌منظور نشان دادن نقش تغییر شکل‌های درازمدت دهانه‌ی پل‌های صندوقه‌ی بتن سبک، پل صندوقه‌ی بتن سبک بشیبا - مارتینز^۵ ابرار بندی و نتایج حاصل از آن ارائه و به‌منظور بررسی نقش وادادگی و جمع‌شدگی بتن در تغییر شکل‌های بلندمدت پل‌های مذکور و در نظر گرفتن آثار عوامل ذکر شده در طراحی‌های آتی، نتایج تجربی و طراحی پل‌ها بررسی شده است.^[۱۱]

۲. روابط آنالیز درازمدت مصالح

برای مدل‌سازی رفتار تابع زمان مصالح از دو آیین‌نامه‌ی ۲۰۱۰ FIB- و ۳۱۸-۷۱ ACI استفاده شده است.

۱.۲. مدل خزش بتن

مدل خزش ارائه‌شده برای بتن سبک در آیین‌نامه‌ی FIB به این صورت است: چنانچه تنش در محدوده‌ی $\sigma_c \leq 0.4 \cdot f_{cm}(t_0)$ باشد، طبق رابطه‌ی ۱، خزش با تنش رابطه‌ی خطی خواهد داشت:^[۱۲]

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \varphi_I \quad (1)$$

که در آن $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ خزش بتن؛ $\sigma_c(t_0)$ تنش در زمان اعمال بارگذاری؛ E_{ci} مدول کشسانی بتن ۲۸ روزه بر حسب Mpa و φ_I ضریب خزش است. ضریب خزش

مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود: [۱۲]

$$\varphi_l = \eta_E \cdot \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (2)$$

که در آن، φ_l ضریب خزش (برای بتن‌های با درجه‌ی LC۱۶/۱۸ و LC۱۲/۱۳ مطابق درجه‌بندی آیین‌نامه، ضریب خزش را باید ۱/۳ برابر کرد)، φ_0 ضریب خزش فرضی؛ $\beta_c(t, t_0)$ تابع تأثیر زمان، t سن موردنظر بتن و زمان متناظر با لنگر در نظر گرفته شده بر حسب روز و t_0 زمان اعمال بار روی بتن بر حسب روز است. پارامترهای η_E و φ_0 ، به ترتیب از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند: [۱۲]

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t_0) \quad (4)$$

که در آن‌ها، ρ چگالی سنگ‌دانه‌های خشک‌شده در اون برحسب kg/m^3 و پارامترهای $\beta_{bc}(f_{cm})$ و $\beta_{bc}(t_0)$ ، به ترتیب طبق روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند: [۱۲]

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{34.2}{(f_{cm})^{0.7}} \quad (5)$$

$$\beta_{bc}(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0)^{0.7}} \quad (6)$$

که برای محاسبه‌ی، $\beta_c(t, t_0)$ از مجموعه روابط ۷ الی ۱۰ استفاده می‌شود: [۱۲]

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{A + (t - t_0)} \right]^{\gamma(t_0)} \quad (7)$$

$$A = \frac{750}{\alpha_{f_{cm}}} \quad (8)$$

$$\gamma(t_0) = \frac{1}{2.73 + 3.75/\sqrt{t_0}} \quad (9)$$

$$\alpha_{f_{cm}} = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.5} \quad (10)$$

که پارامترهای مورد استفاده در روابط مذکور، در روابط قبل تعریف شده‌اند.

۲.۲. مدل جمع‌شدگی بتن

مدل جمع‌شدگی ارائه شده برای بتن سبک در آیین‌نامه‌ی FIB به این صورت است: جمع‌شدگی بتن سبک، به صورت ضریبی از جمع‌شدگی بتن معمولی در آیین‌نامه‌ی FIB در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۱۱). جمع‌شدگی بتن معمولی در آیین‌نامه‌ی FIB طبق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود: [۱۲]

$$\varepsilon_{lcs}(t, t_s) = \eta \cdot \varepsilon_{cs}(t, t_s) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (12)$$

که در آن‌ها، $\varepsilon_{lcs}(t, t_s)$ جمع‌شدگی بتن سبک، $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ جمع‌شدگی بتن معمولی، η پارامتری ثابت برابر ۱/۵ برای بتن‌های سبک با درجه‌های LC۱۶، LC۱۲، LC۸ و برابر ۱/۲ برای بتن‌های سبک با درجه‌های LC۲۰ و بالاتر، t سن موردنظر بتن بر حسب روز، t_s زمان شروع به خشک شدن بتن بر حسب روز و $t - t_s$ دوره‌ی خشک شدن بتن بر حسب روز است.

جدول ۱. ضرایب α_i برای محاسبه‌ی کرنش در ACI.

| α_{ds2} | α_{ds1} | α_{as} | مقاومت سیمان |
|----------------|----------------|---------------|-----------------------|
| ۰/۱۳ | ۳ | ۸۰۰ | ۳۲,۵N |
| ۰/۱۲ | ۴ | ۷۰۰ | ۳۲,۵R - ۴۲,۵N |
| ۰/۱۲ | ۶ | ۶۰۰ | ۴۲,۵R - ۵۲,۵N - ۵۲,۵R |

حال برای محاسبه‌ی مقدار $\varepsilon_{cas}(t)$ از مجموعه روابط ۱۳ الی ۱۵ استفاده می‌شود: [۱۲]

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas^0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{cas^0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left(\frac{f_{cm}/10^6}{6 + f_{cm}/10^6} \right)^{2.5} \cdot 10^{-6} \quad (14)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.12 \cdot \sqrt{t}) \quad (15)$$

که در آن، F_{cm} مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن برحسب Mpa و α_{as} ضریبی برحسب نوع سیمان است که مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است.

حال برای محاسبه‌ی مقدار $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ از مجموعه روابط ۱۶ الی ۲۲ استفاده می‌شود: [۱۲]

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds^0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (16)$$

$$\varepsilon_{cds^0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad (17)$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^2 \right] \quad \text{for } 40 \leq RH < 99\% \cdot \beta_{s1} \quad (18)$$

$$\beta_{RH} = 0.25 \quad \text{for } RH \geq 99\% \cdot \beta_{s1} \quad (19)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0.75 \cdot 35 \cdot h^2 + (t - t_s)} \right)^{0.5} \quad (20)$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.1} \leq 1.0 \quad (21)$$

$$h = 2A_c/u \quad (22)$$

که در آن‌ها، α_{ds2} و α_{ds1} ضرایبی برحسب نوع سیمان هستند و مقادیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است، RH رطوبت نسبی محیط برحسب درصد، h اندازه‌ی فرضی عضو بتنی بر حسب mm ، A_c سطح مقطع عضو بتنی بر حسب mm^2 ، u محیطی از عضو بتنی است که در ارتباط با اتمسفر بوده و بر حسب mm است.

۳.۲. مدل وادادگی کابل‌های پیش‌تنیدگی

وادادگی فولادهای پیش‌تنیدگی، بسته به نوع فولاد مورد استفاده به دو دسته‌ی فولاد با وادادگی نرمال و فولاد با وادادگی کم تقسیم می‌شود. مدل وادادگی نرمال کابل‌های پیش‌تنیدگی ارائه شده در آیین‌نامه‌ی ACI به این صورت است: میزان افت تنش فولادهای پیش‌تنیدگی با وادادگی نرمال از رابطه‌ی ۲۳ به دست می‌آید:

$$\Delta \varepsilon = f_p \cdot \frac{\log t}{10} \cdot \left(\frac{f_p}{f_{pu}} - 0.55 \right) \quad (23)$$

که در آن، $\Delta \varepsilon$ میزان افت تنش پیش‌تنیدگی بر حسب Mpa ، f_p تنش پیش‌تنیدگی پس از اتلاف‌های کوتاه‌مدت بر حسب Mpa ، f_{pu} مقاومت نهایی تضمین‌شده‌ی

که در آن، E_{ci} مدول کشسانی بتن ۲۸ روزه بر حسب Mpa و φ_t ضریب خزش است. رابطه‌ی ۲۵ با استفاده از رابطه‌ی خزش بتن سبک (رابطه‌ی ۱)، به جای خزش بتن معمولی در روابط روش مدول مؤثر^۲، حاصل می‌شود.

۴.۳. مدل‌سازی جمع‌شدگی بتن سبک

کرنش ناشی از جمع‌شدگی بتن سبک طبق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود. این کرنش، با اعمال دما به هر قطعه به صورت منحصر به فرد و در بازه‌های زمانی مدنظر، مدل‌سازی می‌شود. دمای مذکور، از تناظر کرنش جمع‌شدگی و کرنش حرارتی محاسبه می‌شود. دمای محاسبه شده، با استفاده از دستور Initial Conditions, type=TEMPERATURE اعمال می‌شود.

۵.۳. مدل‌سازی وادادگی کوتاه‌مدت و بلندمدت کابل‌های پیش‌تنیدگی

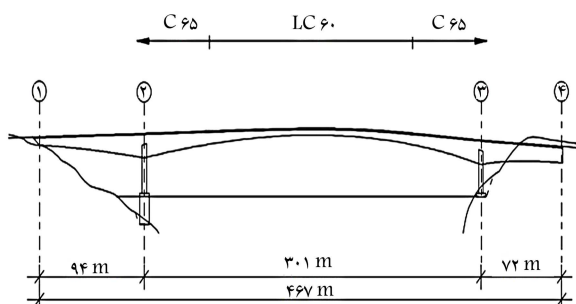
افت کوتاه‌مدت تنش پیش‌تنیدگی با اعمال ضریب ۰٫۷۵ در تنش پیش‌تنیدگی اعمال شده است در واقع افت کوتاه‌مدت پیش‌تنیدگی، از تنش اعمالی اولیه به کابل‌ها کسر شده است. وادادگی کابل‌های پیش‌تنیدگی در طول زمان مطابق رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ محاسبه می‌شود. این کرنش، با اعمال دما به هر کابل به صورت منحصر به فرد و در بازه‌های زمانی مدنظر مدل‌سازی می‌شود. دمای مذکور، از تناظر کرنش وادادگی و کرنش حرارتی محاسبه می‌شود. دمای محاسبه شده، با استفاده از دستور Initial Conditions, type=TEMPERATURE اعمال می‌شود.

۴. صحت‌سنجی مدل‌سازی

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، یک مدل پل موجود، مدل‌سازی شد و نتایج تجربی و آزمایشگاهی مقایسه شدند.

۱.۴. مشخصات پل مورد بررسی

پل مورد مطالعه، پل استولما^۲ در کشور نروژ است که بلندترین پل طره‌ی متعادل جهان و شامل سه دهانه است که طول و شکل کلی دهانه‌های آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود.^[۲] قطعات صفر روی ستون، هر یک ۶ متر و قطعات کلید دهانه برابر ۱ متر است، مابقی قطعات، طولی برابر ۴٫۹ متر دارند. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، در پل مذکور، در طول دهانه، ابعاد قطعات به کار رفته متغیر است (شکل ۲). دهانه‌ی اصلی پل شامل ۶۱ قطعه است که قطعه‌ی صفر ۶ متر، قطعه‌ی کلید ۱ متر و باقی قطعات ۴٫۹ متر طول دارند. برای اجرای طره‌ی نیمه از دهانه‌ی اصلی، در مجموع ۱۰۰ کابل نصب و ۲۰ کابل یکسرگی به کار رفته است که تمامی کابل‌ها



شکل ۱. پل استولما، [۲]

آرماتور پیش‌تنیدگی بر حسب Mpa است. میزان افت تنش فولادهای پیش‌تنیدگی با وادادگی کم از رابطه‌ی ۲۴ به دست می‌آید:

$$\Delta \epsilon = f_p \cdot \frac{\log t}{45} \cdot \left(\frac{f_p}{f_{pu}} - 0.55 \right) \quad (24)$$

که در آن، $\Delta \epsilon$ میزان افت تنش پیش‌تنیدگی بر حسب Mpa ، f_p تنش پیش‌تنیدگی پس از اتلاف‌های کوتاه‌مدت بر حسب Mpa ، f_{pu} مقاومت نهایی تضمین‌شده‌ی آرماتور پیش‌تنیدگی بر حسب Mpa است.

۳. روش تحلیل و نرم‌افزار مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS ۶٫۱۴ استفاده شده است. برای مدل‌سازی بتن، از المان سه‌بعدی C3D8 و برای مدل‌سازی کابل پیش‌تنیدگی از المان خرپایی T3D2 استفاده شده است. در پژوهش حاضر از مدل‌سازی میلگردهای غیرپیش‌تنیده صرف‌نظر شده است.

۱.۳. مدل‌سازی روند اجرای طره‌ی پل

به منظور مدل‌سازی روند اجرای طره‌ی پل‌ها، باید المان‌های عرشه را در طول زمان به مدل اضافه کرد؛ بدین منظور در ابتدای مدل‌سازی، تمامی قطعات حذف و سپس به صورت مرحله به مرحله در گام‌های زمانی معادل با اجرا و عمل‌آوری هر قطعه در واقعیت، به مدل اضافه می‌شوند. در نرم‌افزار مذکور، با استفاده از دستور change model، امکان نصب و حذف المان‌ها در مراحل مختلف وجود دارد.

۲.۳. مدل‌سازی کابل‌های پیش‌تنیدگی

به منظور مدل‌سازی کابل‌های پیش‌تنیدگی، ابتدا یک تنش کششی برابر تنش پیش‌تنیدگی مدنظر، به المان‌های خرپایی نظیر کابل‌های پیش‌تنیدگی اعمال می‌شود، سپس المان‌های مذکور در درون بتن مدفون می‌شوند که به علت وابسته بودن درجه‌های آزادی المان‌های خرپا و المان بتن، تنش اعمال شده به بتن انتقال می‌یابد. با استفاده از دستور Initial Conditions, type=Stress، می‌توان تنش پیش‌تنیدگی مدنظر را در نرم‌افزار اعمال کرد. برای مدل‌سازی دقیق روند اجرای پیش‌تنیدگی، یعنی کشش کابل‌ها، با استفاده از جک و مهار آن در دو انتهای کابل و سپس گروت‌ریزی، در مرحله‌ی اعمال پیش‌تنیدگی از دستور Prestress Hold استفاده می‌شود که در واقع شرایط کابل‌های نجس‌شده‌ی پس‌کشیده را مدل‌سازی می‌کند. در مرحله‌ی کنونی، تنش در طول کابل یکسان و ثابت است. سپس با حذف دستور Prestress Hold، شرایط کابل چسبیده (شرایط پس از تزریق گروت) اعمال می‌شود که در این حالت، تنش کابل‌ها، بسته به روند اجرای پل می‌تواند کاهش یا افزایش داشته باشد و در طول کابل نیز می‌تواند متغیر باشد.

۳.۳. مدل‌سازی خزش بتن سبک

مطابق روش مدول مؤثر، تأثیر خزش در آنالیز با در نظر گرفتن مدول کشسانی مؤثر در طول زمان در نظر گرفته می‌شود، به گونه‌ی که ابتدا مدول کشسانی مؤثر بتن در طول زمان طبق رابطه‌ی ۲۵ محاسبه می‌شود و سپس مدول کشسانی متناظر با عمر هر قطعه، در گام‌های زمانی متناظر به یکپایه قطعات، به صورت منحصر به فرد اختصاص می‌یابد.

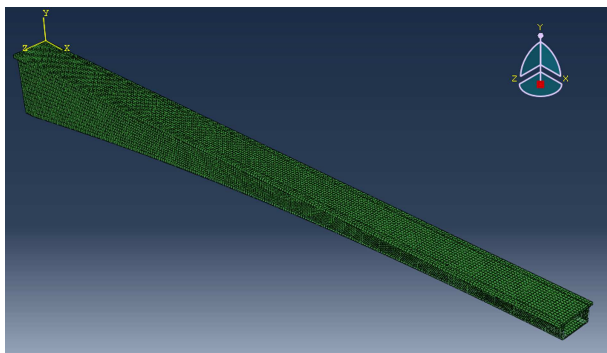
$$E(t) = \frac{E_{ci}}{1 + \varphi_t} \quad (25)$$

جدول ۲. نتایج ارتفاع دال وسط دهانه‌ی پل استولما در طول ۳ سال مورد بررسی حاصل از ابزاربندی پل.^[۲]

| تاریخ برداشت داده | ارتفاع دال پل (m) |
|-------------------|-------------------|
| ۱۹۹۸/۱۱/۱۱ | ۴۲٫۶۶۲ |
| ۱۹۹۹/۰۹/۱۶ | ۴۲٫۶۲۶ |
| ۲۰۰۱/۰۱/۱۰ | ۴۲٫۵۸۳ |
| ۲۰۰۱/۱۱/۲۷ | ۴۲٫۵۶۴ |

جدول ۳. نتایج نشست وسط دهانه‌ی پل استولما در طول ۳ سال مورد بررسی حاصل از ابزاربندی پل.^[۲]

| بازه‌ی زمانی مورد نظر | نشست وسط دهانه (mm) |
|---------------------------|---------------------|
| ۱۹۹۹/۰۹/۱۶ الی ۱۹۹۸/۱۱/۱۱ | ۳۶ |
| ۲۰۰۱/۰۱/۱۰ الی ۱۹۹۹/۰۹/۱۶ | ۴۳ |
| ۲۰۰۱/۱۱/۲۷ الی ۲۰۰۱/۰۱/۱۰ | ۱۹ |



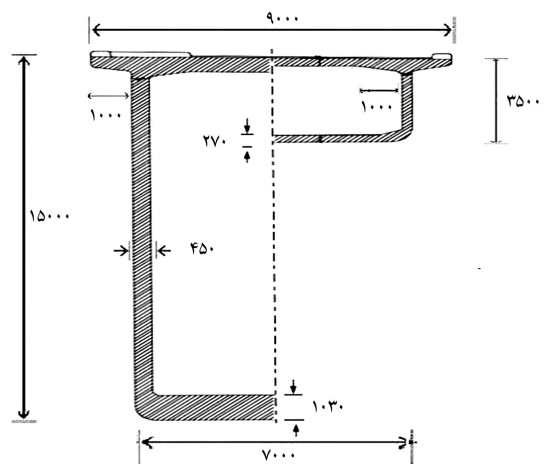
شکل ۳. مدل ABAQUS پل استولما.

۴.۴. زمان‌بندی مدل‌سازی

با توجه به آنکه یکی از اهداف پژوهش حاضر، بررسی تغییرشکل‌های تابع زمان مصالح بود، لذا در مدل‌سازی باید طول عمر هر قطعه و روند اجرای پل، مطابق با واقعیت در نظر گرفته می‌شد، لذا برای بتن‌ریزی و عمل‌آوری هر قطعه، ۱ هفته و بنابراین در مجموع، ۳۲ هفته برای اجرای دهانه و قراردادن کابل‌های پیش‌تنیدگی یکسرگی در نظر گرفته شد. پس از آن ۳ هفته برای اجرای روسازی و راه‌اندازی پل در نظر گرفته شده است. در هر یک از دوره‌های زمانی ذکرشده، در نرم‌افزار مذکور، یک مرحله‌ی (Step) مجزا در نظر گرفته می‌شود و مشخصات تابع زمان هر یک از المان‌ها، شامل مدول کشسانی و دما، مطابق با زمان سپری‌شده برای المان موردنظر، وارد نرم‌افزار می‌شود و همین روند در دوره‌های زمانی منظم تا ۳۰ سال پس از پایان ساخت پل ادامه پیدا می‌کند.

۴.۵. مقایسه‌ی نتایج حقیقی و مدل‌سازی

پل استولما پس از ساخت، ابزاربندی شد و داده‌های ابزاربندی تا ۳ سال پس از اتمام عملیات اجرایی پل موجود است. نتایج نشست وسط دهانه‌ی پل در طول ۳ سال بررسی، به صورت جدول ۲ ارائه شده است.^[۲] میزان نشست دهانه در طول زمان موردبررسی را می‌توان به صورت جدول ۳ جمع‌بندی کرد. با مدل‌سازی اجزاء محدود پل، که تصویر مدل در شکل ۳ قابل مشاهده است، نتایج جدول ۴ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میران تطابق نتایج مدل‌سازی و ابزاربندی



شکل ۲. قطع‌ت مورداستفاده در پل استولما.^[۲]

از نوع ۱۲T۱۵ هستند و سطح مقطعی برابر ۱۶۷۰ mm^2 دارند. کابل‌های نصب با تنش $۱۶۲۶٫۶۶ \text{ Mpa}$ و کابل‌های یکسرگی با تنش $۱۲۴۴٫۷۴ \text{ Mpa}$ کشیده می‌شوند.^[۱۳]

۴.۲.۴. مشخصات مصالح به کار رفته

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دهانه‌ی اصلی و میانی پل که ابزاربندی شده و موردنظر پژوهش حاضر است، از دو نوع بتن معمولی و بتن سبک تشکیل می‌شود که ۱۸۶ متر وسط دهانه، از بتن سبک ساخته شده است.^[۱۴] بتن معمولی مورداستفاده، بتن C۶۵ با مدول کشسانی $E = ۴۱۷۰۷ \text{ Mpa}$ و وزن مخصوص ۲۴۴۰ kg/m^3 است و بتن سبک مورداستفاده، بتن سبک LC۶۰ با مدول کشسانی $E = ۳۱۳۸۰ \text{ Mpa}$ و وزن مخصوص ۱۹۳۱ kg/m^3 است.^[۱۴]

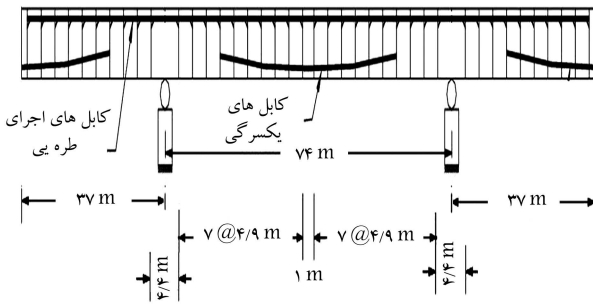
مدول کشسانی فولاد مورد استفاده برای کابل‌های پیش‌تنیدگی، برابر $E = ۱۹۰۰۰۰ \text{ Mpa}$ است.^[۱۴] از آنجا که آنالیز در محدوده‌ی سرویس است، مشخصات خمیری مصالح اهمیتی ندارند و در مدل وارد نمی‌شوند. نتایج تنش‌های وارد بر المان‌ها در طول آنالیز، نیز عدم ورود مصالح به محدوده‌ی خمیری را تأیید می‌کند. با توجه به تنش فشاری قابل‌توجهی که ناشی از کابل‌های پیش‌تنیدگی در مقاطع به وجود می‌آید، امکان وجود تنش‌های قابل‌توجه کششی وجود نخواهد داشت، که البته تنش‌های حاصل از آنالیز نیز این نکته را تأیید می‌کنند لذا از مدل‌سازی و درنظر گرفتن ترک‌خوردگی در بتن صرف‌نظر شده است.

۴.۳.۴. شرایط مرزی و بارگذاری

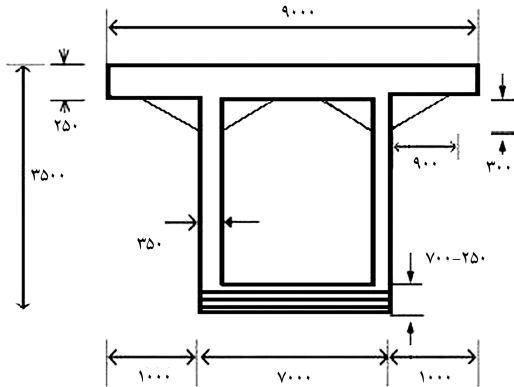
با توجه به آنکه پل به روش طریقه‌ی متعادل اجرا شده و از آنجا که پل در دو طرف مقطع وسط دهانه، متقارن است، با استفاده از اصل تقارن در مدل‌سازی انجام‌شده، فقط نیمی از دهانه‌ی میانی مدل شده است و در وسط دهانه‌ی آن، مفصل برشی (درجه آزادی قائم) در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، در بر تکیه‌گاه، با توجه به شیب عرشه و همچنین وجود طره در دو طرف ستون، فرض وجود مقطع گیردار (بدون درجه آزادی) اعمال شده است. علاوه بر بار مرده‌ی عرشه که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود، بر روی عرشه‌ی پل، بارگسترده‌ی ۱۵۰ kg/m^2 برای بار آسفالت و تجهیزات پل و همچنین بارگسترده‌ی ۳۰۰ kg/m^2 برای بار زنده‌ی وسائط نقلیه در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. نتایج نشست وسط دهانه‌ی پل استولما در طول ۳ سال مورد بررسی حاصل از مدل اجزاء محدود.

| نشست وسط دهانه (mm) | بازه‌ی زمانی مورد نظر |
|---------------------|---------------------------|
| ۳۹ | ۱۹۹۸/۱۱/۱۱ الی ۱۹۹۹/۰۹/۱۶ |
| ۴۵ | ۲۰۰۱/۰۱/۱۰ الی ۱۹۹۹/۰۹/۱۶ |
| ۲۱ | ۲۰۰۱/۱۱/۲۷ الی ۲۰۰۱/۰۱/۱۰ |



شکل ۵. پروفیل طولی، ابعاد و مکان قرارگیری قطعات در پل مورد مطالعه.



شکل ۶. شکل و ابعاد قطعات به‌کار رفته در پل مورد مطالعه.

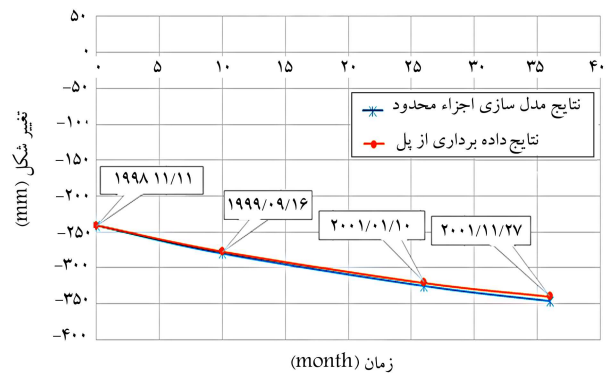
اصل تقارن، در مدل‌سازی انجام شده فقط نیمی از دهانه‌ی میانی مدل شده و در وسط دهانه، مفصل برشی (درجه آزادی قائم) و در بر تکیه‌گاه مقطع گیردار (بدون درجه آزادی) در نظر گرفته شده است. علاوه بر بار مرده‌ی عرشه، که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود، بر روی عرشه‌ی پل، بار گسترده‌ی 150 kg/m^2 برای بار آسفالت و تجهیزات پل و همچنین بار گسترده‌ی 300 kg/m^2 برای بار زنده‌ی وسائط نقلیه در نظر گرفته شده است.

۳.۵. زمان بندی مدل‌سازی

با توجه به آنکه یکی از اهداف پژوهش حاضر، بررسی تغییرشکل‌های تابع زمان مصالح بود، لذا در مدل‌سازی باید طول عمر هر قطعه و روند اجرای پل، مطابق با واقعیت در نظر گرفته می‌شد، لذا برای بتن‌ریزی و عمل‌آوری هر قطعه، ۱ هفته و در مجموع ۱۳ هفته برای اجرای دهانه و قرار دادن کابل‌های پیش‌تندگی یکسرگی، و پس از آن ۲ هفته برای اجرای روسازی و راه‌اندازی پل در نظر گرفته شده است. در هر یک از دوره‌های زمانی ذکر شده، در نرم‌افزار، یک مرحله‌ی (Step) مجزا در نظر گرفته شده و مشخصات تابع زمان هر یک از المان‌ها، شامل مدول کشسانی و دما، مطابق با زمان سپری شده بر المان مورد نظر، وارد نرم‌افزار شده و همین روند در دوره‌های زمانی منظم تا ۳۰ سال پس از پایان ساخت پل ادامه پیدا کرده است.

۴.۵. مشخصات مصالح به‌کار رفته در پل مورد مطالعه

به‌منظور بررسی پارامتریک تأثیر عوامل تابع زمان مصالح در رفتار پل‌های بتن سبک طرهبی، سه نوع بتن LC60 با مدول کشسانی $E = 31380 \text{ Mpa}$ ، LC25 با مدول کشسانی $E = 24660 \text{ Mpa}$ و LC60 با مدول کشسانی $E = 27940 \text{ Mpa}$ استفاده شد.



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی نشست وسط دهانه‌ی پل.

پل مورد قبول است، لذا می‌توان از مدل‌سازی صحیح روند اجرای طرهبی متعادل پل‌ها در نرم‌افزار ABAQUS اطمینان حاصل کرد. مقایسه‌ی نتایج جدول‌های ۳ و ۴، در شکل ۴ نشان داده شده است.

۵. آنالیز و بررسی پل مورد مطالعه و نتایج تحلیل

۱.۵. مشخصات پل مورد بررسی

پل مورد مطالعه شامل ۳ دهانه و مطابق شکل ۵ است. دهانه‌ی میانی ۷۴ متر و دو دهانه‌ی کناری هر یک ۳۷ متر طول دارند. قطعات صفر روی ستون، هر یک ۴/۴ متر و قطعات کلید دهانه برابر ۱ متر هستند، مابقی قطعات، طولی برابر ۴/۹ متر دارند.

شکل قطعات مشابه شکل ۶ و ابعاد روی شکل بر حسب میلی‌متر است. عرض بال فوقانی برابر ۹ m و عرض بال تحتانی برابر ۷ m است و ۴ ماهیچه در نقاط اتصال بال فوقانی و جان با ارتفاع ۳۰ mm و طول ۹۰۰ mm تعبیه شده است. جان مقطع ۳۵۰ mm و بال فوقانی در تمام طول دهانه، ۲۵۰ mm ضخامت دارد اما ضخامت بال تحتانی در ابتدای دهانه (روی ستون)، ۷۰۰ mm است که با تغییرات خطی در وسط دهانه به ۲۵۰ mm می‌رسد.

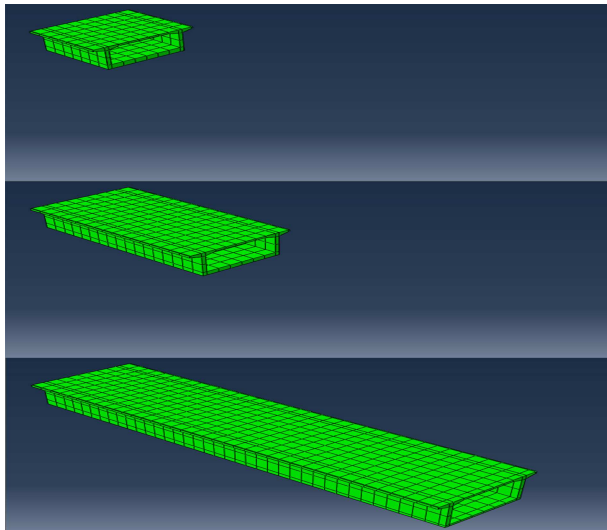
در پل مذکور، در مجموع ۱۸ کابل نصب و ۴ کابل یکسرگی به‌کار رفته است، که تمامی کابل‌ها از نوع $12T15$ و با سطح مقطعی برابر 1670 mm^2 هستند. کابل‌های نصب با تنش 1377 Mpa و کابل‌های یکسرگی با تنش 938 Mpa کشیده می‌شوند و آفت‌های کوتاه‌مدت، با توجه به ضرایب آیین‌نامه در پیش‌تندگی‌های ذکر شده در نظر گرفته شده است.

۲.۵. شرایط مرزی و بارگذاری

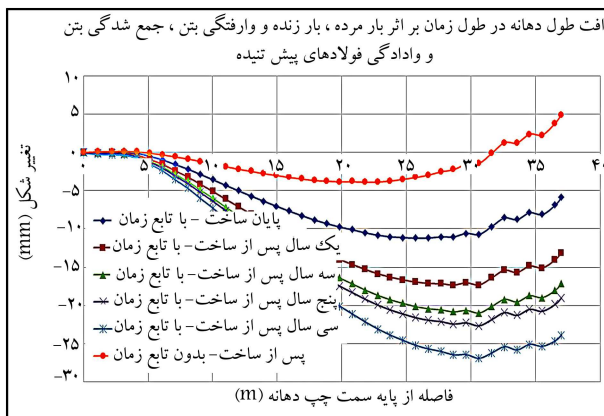
با توجه به آنکه پل به روش طرهبی متعادل اجرا شده و از آنجا که پل در دو طرف ستون‌ها و همچنین دو طرف مقطع وسط دهانه، متقارن است لذا با استفاده از

هر مدل، نشست وسط دهانه و همچنین سهم هر یک از عوامل تابع زمان، شامل: خزش بتن، جمع‌شدگی بتن و وادادگی فولادهای پیش‌تنیدگی مشخص و مقایسه شده است.

علاوه بر موارد ذکر شده، در مدل با بتن LC۶۰، دو حالت برای وادادگی فولادهای پیش‌تنیدگی شامل: وادادگی نرمال و وادادگی کم در نظر گرفته شده و میزان افت و سهم هر یک از عوامل در نشست وسط دهانه مقایسه شده است. به‌عنوان نمونه، میزان نشست طول دهانه‌ی پل مدل شده با بتن LC ۶۰ و وادادگی نرمال تحت عوامل مختلف در شکل‌های ۹ الی ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۹، افت طول دهانه‌ی پل را در طول زمان، در اثر بارهای مرده، بارهای زنده، و تأثیر تمامی عوامل تابع زمان، شامل: خزش بتن، جمع‌شدگی بتن، و وادادگی نرمال فولاد پیش‌تنیدگی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰، افت طول دهانه‌ی پل در طول زمان و در اثر بارهای مرده و زنده و تأثیر خزش بتن مشاهده می‌شود. شکل ۱۱، افت طول دهانه‌ی پل را در طول زمان در اثر بارهای مرده و زنده و تأثیر جمع‌شدگی بتن را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲، افت طول دهانه‌ی پل در طول زمان، در اثر بارهای مرده و زنده و تأثیر وادادگی نرمال فولادهای پیش‌تنیدگی مشاهده می‌شود.



شکل ۸. نمونه‌ی از روند اضافه‌شدن مقاطع در طول آنالیز و نتایج تغییرشکل دهانه.



شکل ۹. تغییرشکل‌های طول دهانه پل در طول زمان با در نظر گرفتن خزش بتن، جمع‌شدگی بتن و وادادگی نرمال کابل‌های پیش‌تنیدگی.

برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد که هر ۳ بتن، وزن مخصوص 1931 kg/m^3 داشتند.

با استفاده از پارامترهای ذکر شده و روابط بخش ۲، پارامترهای تابع زمان مصالح، از جمله مدول کشسانی تابع زمان برای هر یک از بتن‌های ذکر شده قابل محاسبه است. در هر سه مدل با بتن‌های متفاوت، فولاد مورد استفاده برای کابل‌های پیش‌تنیدگی مدول کشسانی برابر $E = 190000 \text{ Mpa}$ داشتند.

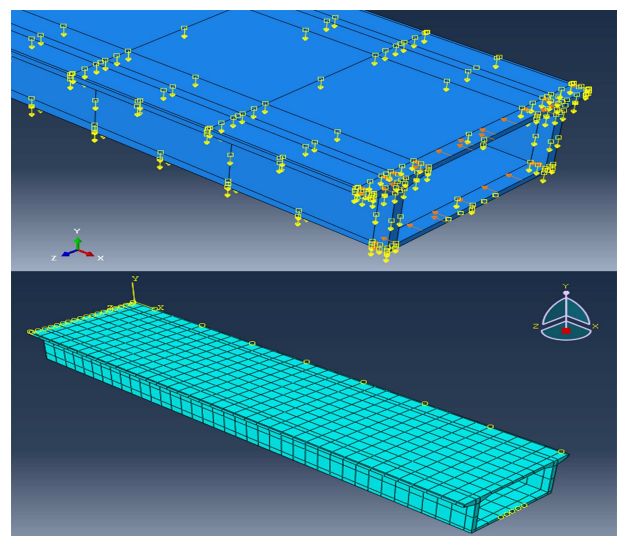
از آنجا که آنالیز در محدوده‌ی سرویس است، مشخصات خمیری مصالح اهمیتی ندارند و در مدل وارد نمی‌شوند. نتایج تنش‌های وارد بر المان‌ها در طول آنالیز نیز عدم ورود مصالح به محدوده‌ی خمیری را تأیید می‌کنند. با توجه به تنش فشاری قابل توجهی که ناشی از کابل‌های پیش‌تنیدگی در مقاطع به وجود می‌آید، امکان وجود تنش‌های قابل توجه کششی وجود نخواهد داشت که تنش‌های حاصل از آنالیز نیز نکته‌ی مذکور را تصدیق می‌کنند، لذا از مدل‌سازی و در نظر گرفتن ترک خوردگی در بتن صرف‌نظر شده است.

۵.۵. مدل‌سازی و نتایج تحلیل اجزاء محدود

همان‌گونه که بیان شد، به علت تقارن، در مدل‌سازی نیمی از دهانه مدل و در وسط دهانه مفصل برشی تعریف شد. در شکل ۷، تصاویری از شرایط تکیه‌گاهی مدل و مش‌بندی مدل مشاهده می‌شود. همان‌گونه که بیان شد، برای بررسی عوامل تابع زمان مصالح بر روی تغییرشکل‌های پل، باید روند اجرای طره‌ی متعادل پل به‌طور واقعی مدل شود از این رو باید مقاطع در طول زمان به آنالیز اضافه شوند. در شکل ۸، روند اضافه شدن چند قطعه به‌عنوان نمونه و همچنین شکل کلی تغییرشکل پل نشان داده شده است.

پس از آنالیز، برای بررسی بهتر تأثیر عوامل تابع زمان مصالح بر افت دهانه‌ی پل، تغییرشکل‌های طول دهانه‌ی پل در ۴ زمان مختلف بررسی شده است که چهار زمان مذکور شامل: زمان اتمام ساخت پل، ۱ سال پس از پایان ساخت، ۳ سال پس از پایان ساخت، ۵ سال پس از پایان ساخت و ۳۰ سال یا ۱۰۰۰۰ روز پس از پایان ساخت پل است.

برای بررسی میزان تأثیرگذاری عوامل تابع زمان مصالح در رفتار پل‌های بتن سبک طره‌ی، ۳ مدل با سه نوع بتن LC۶۰، LC۴۰ و LC۲۵ مدل‌سازی و در



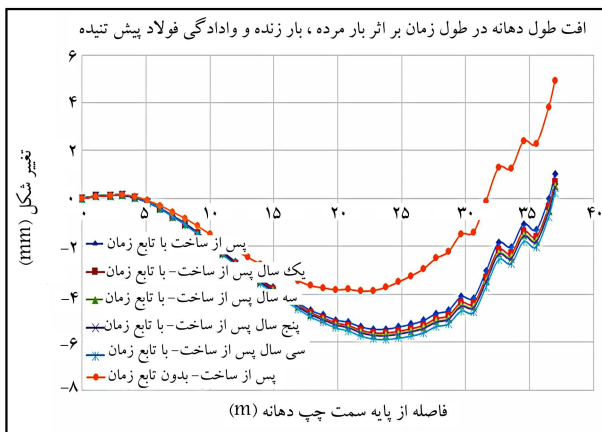
شکل ۷. تصاویری از مدل اجزاء محدود پل مورد مطالعه.

جدول ۵. مقایسه‌ی نتایج پل LC۶۰ با وادادگی نرمال فولاد و وادادگی کم فولاد.

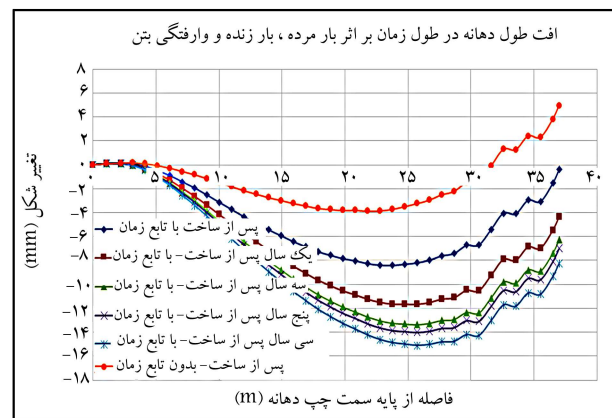
| بتن LC۶۰ و فولاد با وادادگی | | |
|-----------------------------|-------|--|
| نرمال | کم | |
| -۲۳٫۸ | -۱۷٫۹ | افت وسط دهانه (mm) |
| %۵۰ | %۵۹٫۶ | سهم خزش بتن در افت وسط دهانه (درصد) |
| %۳۲٫۲ | %۳۸٫۴ | سهم جمع‌شدگی بتن در افت وسط دهانه (درصد) |
| %۱۷٫۸ | %۲ | سهم وادادگی فولاد پیش‌تنیدگی در افت وسط دهانه (درصد) |

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج پل LC۶۰، LC۴۰ و LC۲۵ با در نظر گرفتن وادادگی نرمال فولاد پیش‌تنیدگی.

| بتن LC۶۰ | بتن LC۴۰ | بتن LC۲۵ | |
|----------|----------|----------|--|
| -۲۳٫۸ | -۳۰٫۸ | -۴۴٫۲ | افت وسط دهانه (mm) |
| %۵۰ | %۵۳٫۷ | %۵۷٫۸ | سهم خزش بتن در افت وسط دهانه (درصد) |
| %۳۲٫۲ | %۲۸٫۵ | %۲۷٫۷ | سهم جمع‌شدگی بتن در افت وسط دهانه (درصد) |
| %۱۷٫۸ | %۱۷٫۸ | %۱۴٫۵ | سهم وادادگی فولاد پیش‌تنیدگی در افت وسط دهانه (درصد) |



شکل ۱۲. تغییر شکل‌های طول دهانه پل در طول زمان با در نظر گرفتن وادادگی نرمال فولاد پیش‌تنیدگی.



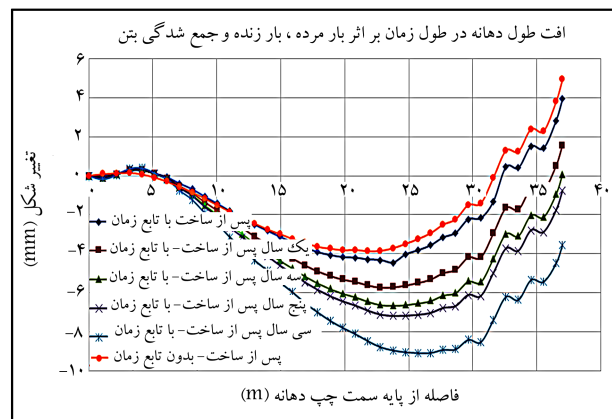
شکل ۱۰. تغییر شکل‌های طول دهانه پل در طول زمان با در نظر گرفتن خزش بتن.

زمان در افت وسط دهانه‌ی پل‌های مدل‌شده با بتن LC۶۰، LC۴۰ و LC۲۵ که همگی با فرض وادادگی نرمال کابل پیش‌تنیدگی مدل شده‌اند، در جدول ۶ ارائه شده است.

۶. نتیجه‌گیری

رفتار تابع زمان مصالح، موضوعی است که کمتر به آن پرداخته شده و در طراحی سازه‌ها کمتر به آن توجه شده است. با توجه به آنکه خواص مذکور، آثار نامطلوب قابل توجهی در سازه‌های خاصی همچون پل‌های اجراشده به روش طریقه‌ی متعادل دارند، بررسی رفتار کوتاه‌مدت و درازمدت پل‌های اجراشده به روش طریقه‌ی متعادل، با بتن سبک که کمتر به آن پرداخته شده است، ضروری به نظر می‌رسد. نتایج بررسی انجام‌شده در آثار عوامل تابع زمان در رفتار پل‌های بتن سبک طریقه‌ی متعادل به این شرح است:

۱. تغییر شکل‌های تابع زمان پل‌های بتن سبک طریقه‌ی متعادل، قابل توجه است و لذا صرف‌نظر از عوامل ذکر شده، طراحی را با مشکلاتی مواجه خواهد کرد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تغییر شکل‌های تابع زمان بتن سبک از این



شکل ۱۱. تغییر شکل‌های طول دهانه پل در طول زمان با در نظر گرفتن جمع‌شدگی بتن.

نتایج افت وسط دهانه‌ی پل با بتن LC۶۰ با وادادگی نرمال کابل پیش‌تنیدگی و پل با بتن LC۶۰ با وادادگی کم کابل پیش‌تنیدگی و همچنین سهم هر یک از عوامل تابع زمان بر افت وسط دهانه‌ی هر یک از پل‌های نامبرده، در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج افت وسط دهانه و همچنین سهم هر یک از عوامل تابع

در طول ۳۰ سال بهره‌برداری، در همان ۳ سال اول بهره‌برداری رخ می‌دهد. لذا بررسی و اندازه‌گیری تغییرشکل‌های پل‌ها در همان سال‌های ابتدایی بهره‌برداری پل می‌تواند نحوه‌ی رفتار و سرویس‌دهی پل و همچنین میزان اقتصادی بودن طرح پل را مشخص کند. علاوه بر آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که پس از اتمام ساخت پل و ۳۰ سال پس از آن، افت وسط دهانه ناشی از وادادگی فولاد پیش‌تندگی، بسیار ناچیز است و لذا می‌توان از آثار وادادگی فولاد پیش‌تندگی در افت بلندمدت وسط دهانه، پس از ساخت پل صرف‌نظر کرد.

۴. با توجه به جدول ۶، افزایش ۵۰ درصدی مقاومت بتن سبک، باعث کاهش افت دهانه در حدود ۳۲٪ می‌شود. همچنین نقش افزایش مقاومت بتن در کاهش افت دهانه، با افزایش مقاومت بتن کاهش می‌یابد. در واقع، در مقاومت‌های پایین بتن، تأثیر افزایش مقاومت در کاهش افت دهانه، بیشتر مشهود است.

۵. با توجه به جدول ۶، با افزایش مقاومت بتن سبک، سهم خزش در افت دهانه، کاهش و سهم جمع‌شدگی بتن و وادادگی فولاد در افت دهانه افزایش می‌یابد.

معمولی بیست‌تراست، میزان تغییرشکل‌های تابع زمان پل‌های بتن سبک بیشتر از تغییرشکل‌های تابع زمان پل‌های بتن معمولی خواهد بود و در نظر گرفتن عوامل مذکور در طرح پل‌های بتن سبک، اهمیت بالاتری دارد.

۲. پژوهشگران مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تغییرشکل‌های تابع زمان را خزش بتن، جمع‌شدگی بتن، و همچنین وادادگی فولادهای پیش‌تندگی می‌دانند. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ۸۵٪ تغییرشکل‌های تابع زمان پل، که در اثر سه عامل مذکور به وجود می‌آیند، به علت رفتار تابع زمان بتن شامل خزش و جمع‌شدگی است. از این رو فقط با در نظر گرفتن رفتار تابع زمان بتن در طراحی، می‌توان در حدود ۸۵٪ تغییرشکل‌های تابع زمان پل را پیش‌بینی و طرحی اقتصادی‌تر ارائه کرد.

۳. همان‌طور که در شکل‌های ۹ الی ۱۲ مشهود است، تأثیر عوامل تابع زمان در تغییرشکل‌های پل، در طول زمان به شدت کاهش می‌یابد. در نمودارهای ارائه‌شده مشاهده می‌شود که سهم بسیار زیادی از تغییرشکل‌های تابع زمان پل

پانویس‌ها

1. Koror-Babeldaob bridge
2. Virginia
3. Aashto LRFD
4. Vltava
5. Benicia-Martinez
6. effective modulus
7. Stolma

منابع (References)

1. Doan, T. and Reid, S. "Long term behavior of concrete bridges", Doctoral Thesis, University of Cidney, Australia (2000).
2. Takacs, P.F. "Deformations in concrete cantilever bridges: Observations and theoretical modelling", Doctoral Thesis, The Norwegian University of Science and Tecnology (2002).
3. Takacs, P.F. and Kanstad, T. "Short-time and long-time deformations of record span concrete cantilever bridges", *6th Int. Conf. on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials*, Elsevier, 2, M.I.T, Cambridge USA, pp. 355-360 (2001).
4. Lopez, M. "Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: A multi-scale investigation", Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology (2005).
5. Malm, R. and Sundquist, H. "Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges",

Int. J. Engineering 1038-1045 (Apr., 2010). Structure, 32(4), pp.

6. Bazant, Z.P., Yu, Q. and Li, G. "Excessive long-time deflection of prestressed box girder", Structural Engineering, Report, No. 09-12/ITI, Northwestern University (2010).
7. Bazant, Z.P., Yu, Q., Li, G. and et al. "Excessive deflections of record-span prestressed box girder", *Int. J. ACI concrete*, **32(6)**, pp. 44-52 (2010).
8. Cross, B.T. "Structural performance of high strength lightweight concrete pretentioned bridge girders", Doctoral Thesis, The Virginia Polytechnic University (2012).
9. Jaroslav, N. and Zich, M. "Long-term deflections of cantilever segmental bridges", *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **8(3)**, p. 190 (2013).
10. Wang, S. and Fu, C.C. "Simplification of creep and shrinkage analysis of segmental bridges", *Journal of Bridge Engineering*, **20(8)**, pp. (Apr., 2014).
11. Chai, Y.H. "Service performance of long-span lightweight aggregate concrete box-girder bridges", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **30(1)**, (Feb., 2016).
12. Fib Special Activity Group 5, "Fib (CEB/FIP)-model code 2010 final draft federation international du beton", International Federation for Structural Concrete (2011).
13. Ingebrigtsen, T. "The stolma bridge, norway", *Structural engineering international (May, 1999)*.
14. FIB: Bulletin 8. "Lightweight aggregate concrete, part 3: Case studies", Stolma Bridge, P. 346.