

بررسی اثر نسبت مدول کشسانی مصالح طاق به مصالح پُرکننده در مقاوم‌سازی آنها به روش تسلیح خارجی

محمد قاسم سحاب (استادیار)

روح‌الله تقی‌زاده* (کارشناس ارشد)

مسعود محمدی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تفرس

مهندسی عمران تفرس، زمستان ۱۳۹۵ (۲-۳۲، شماره ۱/۴، ص. ۲۳-۲۹)

پل‌های طاقی سنگی از جمله پل‌های مهم موجود در شبکه‌ی راه‌آهن ایران هستند. حفظ پل‌های مذکور، نه فقط از نظر نقش حیاتی در شبکه‌ی راه‌آهن کشور اهمیت دارند، بلکه به‌عنوان میراث فرهنگی ارزش زیادی دارند. در این نوشتار، ضمن معرفی روش تسلیح خارجی برای مقاوم‌سازی پل‌های طاقی سنگی در خطوط راه‌آهن، به بررسی کارآمدی روش ذکرشده در پل کیلومتر ۴۲۷ راه‌آهن تهران - تبریز موسوم به پل قافلان‌کوه پرداخته شده است. مدل ۳ بُعدی اجزاء محدود پل قافلان‌کوه به کمک نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰-v14 ساخته شده و با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، نحوه‌ی مناسب مقاوم‌سازی پل قافلان‌کوه با استفاده از روش تسلیح خارجی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مدول کشسانی مصالح طاق به مصالح پُرکننده، تنش‌ها در سطح خارجی طاق افزایش یافته‌اند و با مصالح و هزینه‌ی کمتری می‌توان سازه‌ی پل را مقاوم‌سازی کرد.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی، تسلیح خارجی، راه‌آهن، پل طاقی سنگی، مدول کشسانی.

sahab@aut.ac.ir
taghizade@gmail.com
m.mohammadi11@gmail.com

۱. مقدمه

تسلیح خارجی است که با توجه به تداخل کم در سیستم بهره‌برداری و همچنین عدم تخریب ظاهر سازه، که غالباً در پل‌های مذکور اهمیت زیادی دارد، در پل‌های راه‌آهن کاربرد وسیعی پیدا کرده است.

در این نوشتار، به بررسی آسیب‌پذیری پل طاقی سنگی قافلان‌کوه واقع در کیلومتر ۴۲۷ راه‌آهن تهران - تبریز پرداخته شده است، که طول آن ۲۰۸/۵ متر است، و به ترتیب از سمت زنجان به طرف مراغه ۶ دهانه‌ی ۱۰ متری، ۲ دهانه‌ی ۴۰ متری، و ۳ دهانه‌ی ۱۰ متری دارد و مانند بیشتر پل‌های راه‌آهن ایران از سیستم سازه‌ی قوسی بهره می‌برد. مصالح به کاررفته در قوس‌های حمال اصلی پل مذکور، سنگ‌های تراشیده‌ی مالون است، که در ۲ سمت قوس به دیوارهای حجیم و سپس پایه‌های کناری و میانی منتهی می‌شود. در این پژوهش، دو دهانه‌ی ۴۰ متری پل قافلان‌کوه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند.

با توجه به اینکه مقاوم‌سازی به روش تسلیح خارجی بر روی سطح سازه اعمال می‌شود، محل قراردادن عناصر مسلح‌کننده برای جذب تنش‌های کششی در مقرون به صرفه بودن روش ذکرشده، امری بسیار مهم و مؤثر است. از سوی دیگر، سختی مصالح پُرکننده‌ی مصرفی، در حد فاصل زیر خط تا بدنه‌ی پل، یا به عبارت دیگر، مدول کشسانی مصالح پُرکننده‌ی مصرفی در نحوه انتقال بارها به بدنه‌ی پل و میزان تنش‌های کششی ایجادشده در قسمت‌های مختلف آن تأثیر بسیار زیادی

افزایش بار محوری، سرعت و همچنین حجم ترافیک در خطوط راه‌آهن، لزوم بهسازی و مقاوم‌سازی ابنیه‌ی فنی به ویژه پل‌های موجود در این خطوط را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در راه‌آهن ایران، حدود ۲۷۰۰۰ دستگاه پل وجود دارد، که بیش از ۱۵٪ آن‌ها از نوع طاقی سنگی و بیشتر آنها جزء پل‌های بسیار مهم در شبکه‌ی راه‌آهن هستند، به‌علاوه عمر آن‌ها نیز غالباً به بیش از ۵۰ سال بالغ می‌شود و برخی از آن‌ها جزء میراث فرهنگی کشور محسوب می‌شوند. از این رو برای حفظ ایمنی خطوط راه‌آهن و جلوگیری از تخریب پل‌های مذکور لازم است به بررسی آسیب‌پذیری آن‌ها پرداخته و در صورت لزوم نسبت به مرمت، بهسازی و مقاوم‌سازی آنها اقدام شود.

انجام عملیات عمرانی در پل‌های طاقی سنگی در سیستم حمل و نقل ریلی، محدودیت‌های خاصی دارد؛ که از مهم‌ترین آن‌ها، عدم امکان مسدودکردن خط بیش از چند ساعت است. از طرف دیگر، هزینه‌ی تعویض پل‌های مذکور بسیار بالاست، لذا باید روش‌هایی را برای تعمیر و مقاوم‌سازی هزینه‌ی آن‌ها انتخاب کرد، که با توجه به محدودیت‌های مذکور قابل اجرا باشد. یکی از روش‌های ذکرشده، روش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۳/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۲۱، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۱.

دارد. در این پژوهش، تأثیر نسبت مدل کشسانی مصالح طاق به مدل کشسانی مصالح پُرکننده در نحوه‌ی شکل‌گیری، مقدار، و محل قرارگیری تنش‌ها در بدنه‌ی پل‌های طاقی سنگی (پل قافلان‌کوه)، با استفاده از روش المان محدود و مدل‌سازی در نرم‌افزار SAP2000، مورد مطالعه قرار گرفته است. با تغییر مدل کشسانی مصالح پُرکننده ۱۲ مدل ۳ بُعدی از سازه‌ی مقاوم‌سازی‌نشده و ۱۲ مدل از سازه‌ی مقاوم‌سازی‌شده تهیه و نسبت‌های متفاوتی از مدل کشسانی طاق به مدل کشسانی مصالح پُرکننده از ۱/۱ تا ۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفته و نسبت بهینه تعیین شده است.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

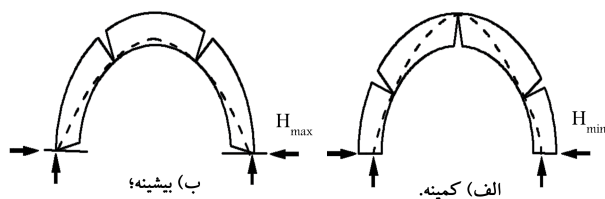
در پژوهشی در سال ۱۹۶۶،^[۱] روابط تعیین نیروهای داخلی در قوس‌های ساخته‌شده از مصالح بنایی براساس تئوری کشسانی ارائه شده و تحلیل‌ها براساس این ۳ فرض اساسی استوار بوده است:

- تنش کششی مصالح بنایی صفر است.
- استحکام فشاری مواد نامحدود است.
- لغزش بین بلوک‌های سنگی وجود ندارد.

همچنین یک حد ایمن بالا و پایین برای تاب تحمل بار وارده بر روی قوس تعیین شده است. در حد پایین اگر بتوان یک خط فشار در داخل قوس پیدا کرد که در تعادل با بارگذاری‌ها (شامل بار ثقلی) باشد و در داخل جسم قوس قرار گیرد، قوس ایمن خواهد بود. نکته‌ی مهم در این فرضیه آن است که خط فشار مذکور می‌تواند فرضی باشد. درخصوص حد بالا نیز فرضیه‌ی عنوان‌شده صادق است. حد بالا و پایین در این تئوری در شکل ۱ نشان داده شده است.

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۰،^[۲] مطالعات آزمایشگاهی در زمینه‌ی مقاوم‌سازی پل‌های ساخته‌شده با مصالح بنایی و تحلیل عددی آنها به کمک نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام شده است. در نمونه‌ی مورد مطالعه از پُرکننده‌ی بتونی استفاده و تقویت‌کننده‌ها با استفاده از المان‌های ۲ بُعدی و سایر اجزا با استفاده از المان‌های ۲ بُعدی ۴ گره‌یی کرنش مسطح مدل شده‌اند. همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۴^[۳] مطالعاتی درخصوص مقاوم‌سازی به روش تسلیح داخلی بر روی پل پاپ باتل^۲ انجام شده است. در مطالعاتی در سال ۲۰۰۷، نیز سازه‌ی تئاتر اسپندوس مورد بررسی قرار گرفته و از المان‌های حجمی موسوم به solid و نرم‌افزار SAP2000 جهت مطالعات مذکور استفاده شده است.^[۴]

به‌طور کلی با توجه به اینکه روش تسلیح خارجی با استفاده از مصالح فلزی روشی نسبتاً جدید است، مطالعات کمی در مورد آن صورت گرفته و در ایران نیز کمتر بررسی شده است.



شکل ۱. قوس مدور تحت وزن خودش خط فشار.^[۱]

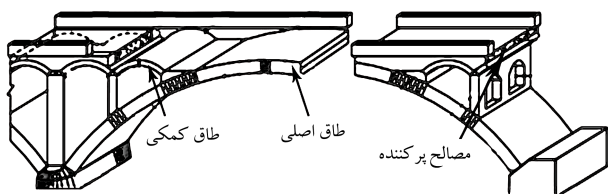
۳. شناخت پل‌های طاقی سنگی و رفتار سازه‌ی آنها

شکل ۲، اجزاء اصلی سازه‌ی یک پل طاقی سنگی را نشان می‌دهد. این اجزا عبارت‌اند از: قوس یا طاق سنگی، خاکریز یا مصالح پُرکننده روی قوس، فونداسیون، پایه‌های میانی، دیوارهای کناری، دیوارهای حائل و اسپندل.^[۵]

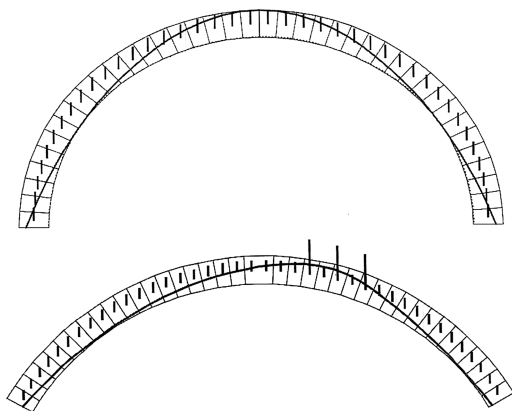
روش خط فشار، روش مناسبی جهت تحلیل تعادل و پایداری سازه‌های با مصالح بنایی و مکانیزم خرابی آنهاست. در روش خط فشار (شکل ۳)، یک طاق با مصالح بنایی متشکل از تعدادی بلوک در کنار هم فرض می‌شود. در این مدل پایداری طاق به تعادل نیروها در بین بلوک‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن بستگی خواهد داشت. فرض کنیم که سطح بلوک‌ها به منظور مقابله با لغزش به اندازه‌ی کافی زبر است. بر این اساس قوس تا زمانی پایدار باقی می‌ماند که نیروی فشاری بین قطعات سقف وجود داشته باشد. بار زنده‌ی متمرکز، نظیر بار ناشی از محورهای قطار، خط فشار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر نسبت وزن قوس به بار زنده خیلی پایین باشد، بار باید توسط دو نیروی انتقال داده‌شده به دیواره‌ها و پایه‌ها تحمل شود. ترک‌ها در نقاطی که خط فشار انحراف زیادی نسبت به مرکز قوس دارد، ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر، در نقاطی که خط فشار با سطح طاق برخورد کند، ترک‌خوردگی شروع می‌شود. در صورت پایین بودن کرنش، استحکام کششی طاق مانع از ترک‌خوردگی می‌شود. در صورت عدم کفایت استحکام کششی باید نسبت به کاهش تنش‌ها روی سطح طاق و یا مقاوم‌سازی آن اقدام کرد.^[۴]

۴. جزئیات مدل‌سازی

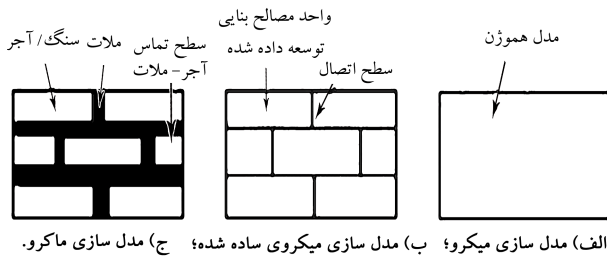
روش اجزاء محدود روش عمومی برای تحلیل و تعیین تغییرات یک کمیت با الگوی تغییرات نامعلوم در یک محیط پیوسته به کمک تعدادی جزء محدود است که تغییرات آن کمیت در روی آن‌ها، الگوی معین و مفروضی دارد. این روش در شاخه‌های



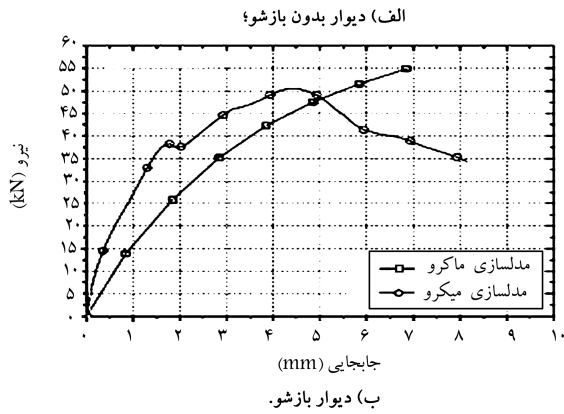
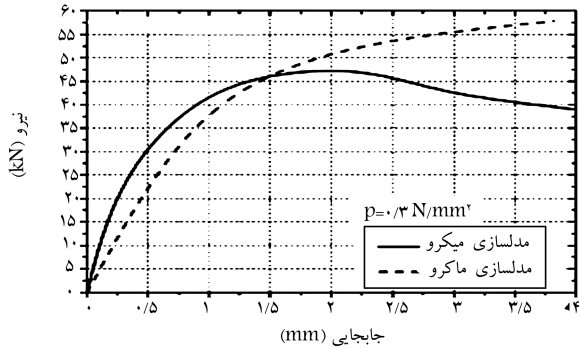
شکل ۲. اجزاء پل‌های با مصالح بنایی دارای وایداک.^[۶]



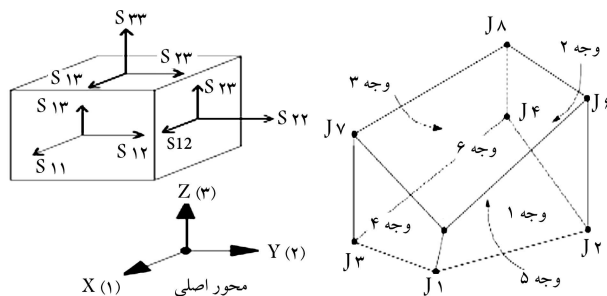
شکل ۳. خط فشار و اثر بار متمرکز در تغییر وضعیت آن.^[۵]



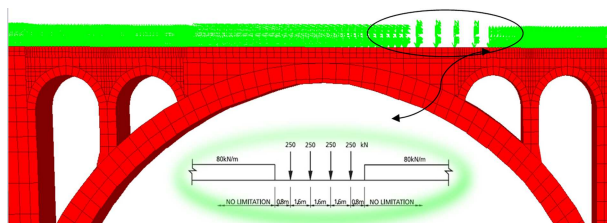
شکل ۴. مدل سازی مصالح بنایی. [۱۰]



شکل ۵. مقایسه‌ی مدل سازی میکرو و ماکرو. [۱۰]



شکل ۶. نام‌گذاری تنش‌ها و قسمت‌های مختلف در المان solid. [۱۰]



شکل ۷. مدل ایجادشده در SAP و بارگذاری در ۱/۴ دهانه.

مختلف علوم مهندسی و از جمله مهندسی عمران و سازه گسترش یافته و به طور وسیعی استفاده شده است. از نرم‌افزارهایی که از این روش استفاده می‌کنند می‌توان به نرم‌افزارهای ANSYS، ABAQUS، DIANA و SAP اشاره کرد. [۷]

به‌طور کلی مدل‌سازی اجزاء محدود، پل‌های با مصالح بنایی براساس فرضیه‌های ماکرو، میکرو، و یا میکروی ساده‌شده صورت می‌پذیرد (شکل ۴). در مدل ماکرو، محیط مصالح بنایی به صورت یک پارچه در نظر گرفته می‌شود، به این معنی که آجرها و ملات به صورت یک ماده‌ی همگن معادل با خواص فیزیکی مربوط به رفتار توأم آنها فرض می‌شوند. به عبارتی سنگ‌ها، ملات و سطح رابط با استفاده از المان‌های پیوسته‌ی همگن مدل می‌شوند. خواص فیزیکی این محیط با انجام آزمایش‌ها و یا متوسط‌گیری بین خواص فیزیکی مصالح به کاررفته تعیین می‌شود. در مدل میکرو، ملات و سنگ هر کدام به صورت ماده‌ی جداگانه مدل و اتصال بین آنها با استفاده از المان‌های تماسی تعریف می‌شود. ضخامت المان‌های مذکور صفر است. این مدل امکان توصیف رفتار هر ماده‌ی مرکب با خواص جداگانه را به ما می‌دهد. به عبارت ساده‌تر، واحدهای مصالح و ملات با استفاده از المان‌های پیوسته‌ی جداگانه و المان‌های ناپیوسته، نقش رابط بین ملات و مصالح را دارند. [۸]

انتخاب مدل ماکرو یا میکرو براساس نیازهای مسئله است. به عبارت دیگر کاربرد مدل‌های میکرو و ماکرو متفاوت است. زمانی که نیاز به بررسی تنش‌ها و رفتار موضعی سازه‌های مصالح بنایی است، از مدل میکرو استفاده می‌شود. در مقابل، مدل ماکرو برای بررسی رفتار سازه در حالت کلی مناسب است. در هر حالت می‌توان مصالح را ایزوتروپ یا همسان‌گرد یا غیر همسان‌گرد در نظر گرفت. [۹]

بدون تردید مدل همسان‌گرد، ساده‌تر است و البته در سطوح تنش‌ی پایین، مدل همسان‌گرد پیش‌بینی خوبی از رفتار سازه به دست می‌دهد. [۱۰]

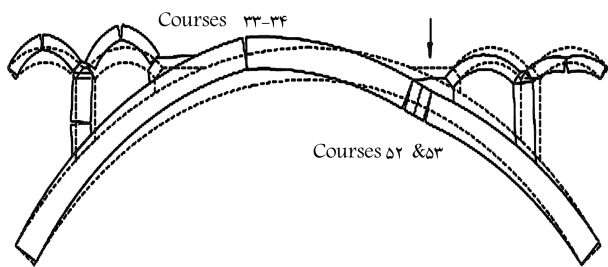
لورنکو^۲ (۱۹۹۷) یک دیوار ساخته‌شده از مصالح بنایی را با استفاده از هر دو مدل میکرو و ماکرو مدل‌سازی و تحلیل کرده است. [۱۰] در شکل ۵، نتایج تحلیل این دیوار با هر دو مدل نشان شده است.

در این پژوهش با توجه به اینکه رفتار مدل به صورت خطی فرض و بارگذاری استاتیکی بر روی سازه اعمال شده است، از مدل سازی ماکرو به صورت ۳ بعدی استفاده شده است. سازه‌ی اصلی پل با استفاده از اجزاء محدود ۸ وجهی solid مدل شده است (شکل ۶).

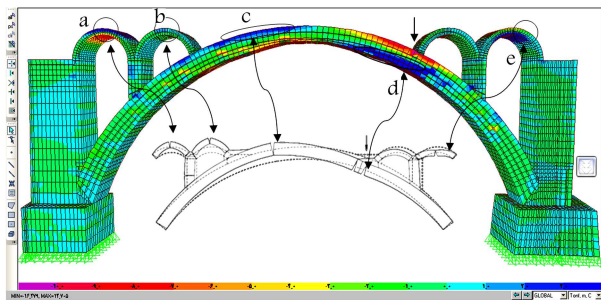
برای مدل‌سازی عناصر تقویتی نیز از اجزاء محدود موسوم به frame استفاده شده است. مدل با استفاده از نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ براساس ابعاد واقعی سازه ایجاد شده و بارگذاری شامل: بار مرده‌ی روسازی، وزن مرده‌ی سازه‌ی پل، و بار زنده براساس آئین‌نامه‌های UIC ۷۱۷۶-R و UIC ۷۰۲ شامل ۴ محور ۲۵ تنی به فواصل ۱/۶ متر و بارگسترده‌ی ۸ تن بر متر طول به فاصله‌ی ۰/۸ متر از محورهای ابتدایی و انتهایی و به طول بی‌نهایت در نظر گرفته شده است (شکل ۷). [۱۱ و ۱۲]

مدل مذکور از ۶۵۹۱ جزء محدود solid و ۹۲۱۴ گره تشکیل شده است. در تحلیل انجام‌شده، ابتدا مدل مقاوم‌سازی‌نشده با استفاده از نسبت‌های متفاوت مدول کشسانی مصالح طاق به مدول کشسانی مصالح پُرکننده (این نسبت با پارامتری به نام m معرفی شده است) تحلیل و نتایج تجزیه و تحلیل شده است. سپس مدل مقاوم‌سازی‌شده با استفاده از نتایج مذکور، تهیه و میزان کارایی آن برای چند نسبت از مدول‌های کشسانی بررسی شده است.

۱۰ نقطه جهت بررسی و تحلیل انتخاب شده‌اند، که در شکل ۸ موقعیت و کدگذاری آنها نشان داده شده است. در کلیه‌ی تحلیل‌ها، میزان جابه‌جایی‌ها در ۳ جهت، و تنش‌های Smax، S۲۳، S۱۳، S۱۲، S۳۳، S۲۲، S۱۱، Smin مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نقاط بحرانی و تحت بررسی پس از بارگذاری با استفاده از



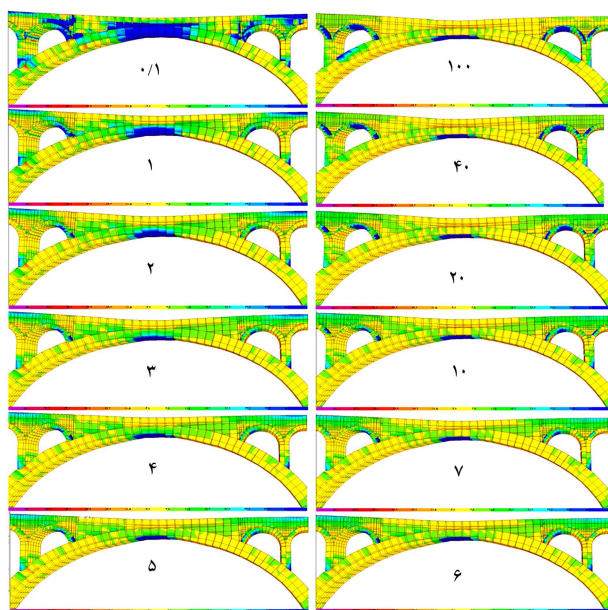
شکل ۹. مکانیزم تخریب پل با مصالح بنایی دارای واداکت.



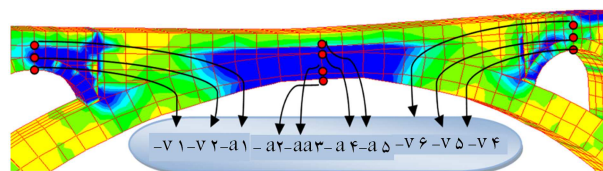
شکل ۱۰. مقایسه‌ی مکانیزم تخریب مدل ایجادشده در SAP2000 و مدل نشان داده شده در شکل ۸.

جدول ۱. مقادیر تنش در محل ایجاد ترک‌ها.

مفاصل	تنش بیشینه (Tonf/m ²)		محل مفصل
	فشاری	کششی	
۲	-۸,۵۹	۶,۷۷	A
۵	-۰,۷۹	۰,۷۴	B
۴	-۱۳,۰۶	۴,۹۰	C
۱	-۱۰,۷۴	۱۴,۷۰	D
۳	-۴,۳۹	۵,۷۷	E



شکل ۱۱. کانتور تنش‌های بیشینه به ازاء مقادیر مختلف نسبت‌های مدول کشسانی.



شکل ۸. محل ایجاد تنش‌های کشش و ترک‌خوردگی در سازه (مفاصل).

مدل NTP (مواد بدون تنش کششی با استحکام فشاری محدود با رویکرد اجزاء محدود) در شکل ۸ مشخص شده است.

۵. صحت‌سنجی نرم‌افزار و مدل مورد مطالعه

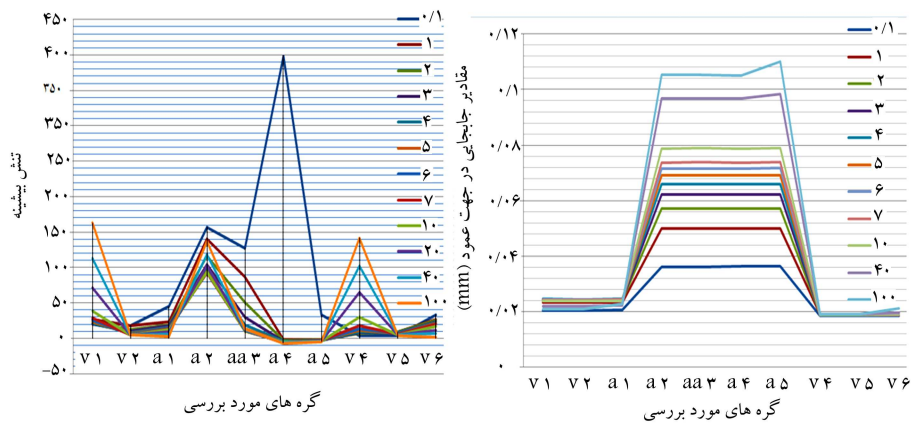
طبق بررسی‌های انجام‌شده، مکانیزم خرابی و تشکیل مفاصل خمیری در پل‌های طاقی باز، که ۲ واداکت در طرفین طاق دارند، مطابق شکل ۹ است. [۱۳] در مدل ذکرشده، بارگذاری به صورت متمرکز و در ۱/۴ میانی دهانه است. به منظور بررسی صحت نتایج، مدل ۳ بُعدی اجزاء محدود تحت بارگذاری در ۱/۴ دهانه به صورت متمرکز، محل تشکیل ترک‌ها و در نهایت ایجاد مفاصل مورد بررسی قرار گرفته است. بارورده ۱۰ تن بوده است، که به صورت بارهای ۲ تنی تفکیک و به گره‌ها اعمال شده است. در شکل ۱۰، نقاطی از پل، که بیشینه‌ی تنش کششی و فشاری در آن‌ها رخ داده است و می‌تواند در آنجا ترک ظاهر و مفصل خمیری تشکیل شود، براساس آنچه از مدل‌سازی اجزاء محدود حاصل شده و مقایسه‌ی آن با محل‌های پیش‌بینی شده برای تشکیل مفاصل خمیری ملاحظه می‌شود. جدول ۱، نیز مقادیر تنش‌های موجود در محل تنش‌های بیشینه و ترتیب تشکیل مفاصل خمیری را نشان می‌دهد. براساس جدول ۱، اولین مفصل در زیر بار متمرکز ایجاد شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود انطباق قابل قبولی بین رفتار مدل و پیش‌بینی‌های موجود برقرار است.

۶. تأثیر نسبت مدول کشسانی مصالح طاق به مدول کشسانی مصالح پُرکننده در نحوه‌ی شکل‌گیری تنش‌ها

در بدنه‌ی پل

در شکل ۱۱، اثر تغییر نسبت مدول کشسانی در کانتور تنش‌های بیشینه از لحاظ میزان و محل قرارگیری تنش‌ها در طاق سمت راست و وادوک‌های داخلی نشان داده شده است. نسبت مدول کشسانی مصالح طاق به مدول کشسانی مصالح پُرکننده در شکل مذکور با پارامتر m مشخص شده است. با مقایسه‌ی کانتور تنش‌ها می‌توان دریافت با افزایش نسبت مدول کشسانی مصالح طاق به پُرکننده از گستردگی و پراکندگی تنش‌های کششی در ضخامت طاق و همچنین مصالح پُرکننده کم شده و تنش‌های مذکور در سطح خارجی طاق متمرکز شده‌اند، که با در نظر گرفتن این نکته که در روش تسلیح خارجی تأثیر بیشتری در تنش‌های سطح خارجی است، با افزایش نسبت مدول کشسانی به حالت بهینه نزدیک می‌شویم. این نکته قابل توجه است که با افزایش نسبت مدول کشسانی، انعطاف‌پذیری طاق بیشتر می‌شود و لذا میزان جابه‌جایی در سطح طاق افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲، این رفتار نشان داده شده است.

از شکل ۱۲ می‌توان دریافت که بیشینه‌ی جابه‌جایی به ازاء $m = ۱۰۰$ و کمینه‌ی آن به ازاء $m = ۰/۱$ رخ می‌دهد. به علاوه ملاحظه می‌شود که مقادیر



شکل ۱۲. مقادیر تنش و جابه‌جایی در نقاط مورد بررسی در mهای متفاوت.



شکل ۱۳. مقادیر تنش و جابه‌جایی در داخلی و خارجی ترین نقاط در mهای متفاوت.

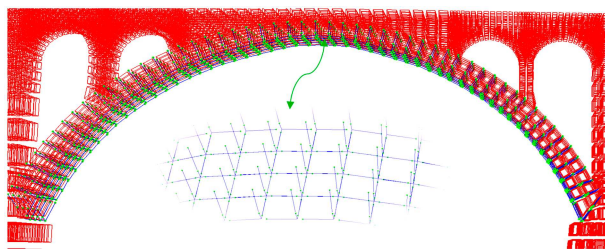
کششی در مصالح پُرکننده (خطوط آبی‌رنگ) روند کاهشی و در سطح خارجی (خطوط قرمز رنگ) طاق روند افزایشی دارد.

۷. مقاوم‌سازی سازه با استفاده از اجرای تسلیح خارجی قوس

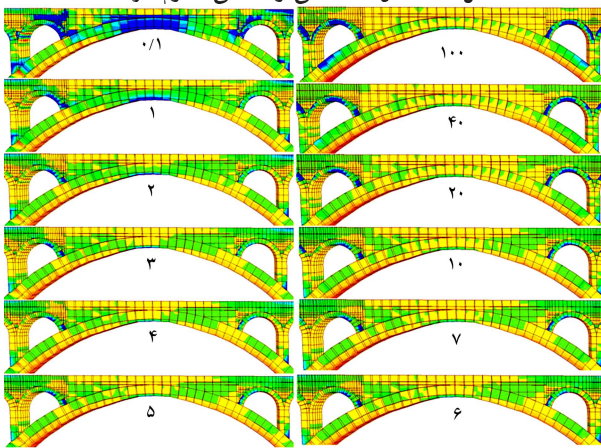
در این روش یک سری سوراخ عمودی و همچنین شیارهای افقی در سطح سازه در مناطقی که تحت تنش کششی هستند، ایجاد می‌شود و سپس میله‌های از جنس فولاد ضد زنگ، هیلبر،^۴ و یا GFRP درون آن قرار می‌گیرند و در نهایت، شیارها با استفاده از گروت پر می‌شوند (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

بیشینه‌ی تنش مربوط به مقدار $m = 100$ است و در نقاط روی سطح خارجی (v1, a2, v4) قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر، تنش‌های کششی در نقاط داخلی طاق و به‌خصوص در نقاط داخل مصالح پُرکننده یا کاملاً حذف شده و یا اینکه به میزان کمینه‌ی ممکن رسیده‌اند. به عنوان مثال، در نقطه‌ی a4، که در داخل مصالح پُرکننده قرار دارد، تنش کششی از ۳۹۸ تن بر مترمربع (در حالت $m = 0.1$) به تنش فشاری به مقدار ۷ تن بر مترمربع (در حالت $m = 100$) رسیده است، که جهت مقاوم‌سازی با روش تسلیح خارجی حالت بسیار بهینه‌ی است.

در شکل ۱۳، مقایسه‌ی روند افزایش و یا کاهش تنش بیشینه در داخلی و خارجی‌ترین نقاط مورد بررسی قوس‌های فرعی و طاق اصلی نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای مذکور پیداست با افزایش نسبت m، تنش‌های



شکل ۱۶. المان‌های عمقی و سطحی مقاوم‌سازی.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی سازه‌ی مقاوم‌سازی شده در ۱۲ مدل تهیه شده.

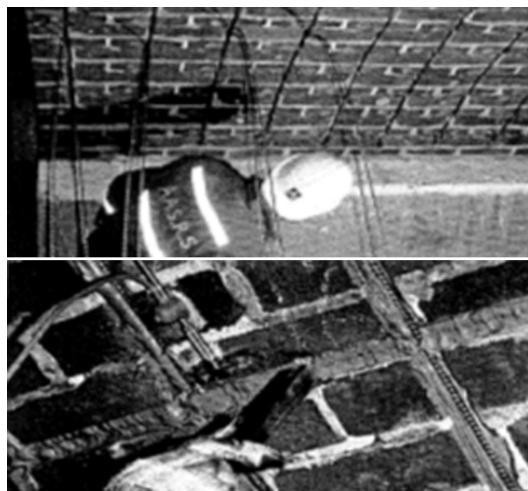
پس از بارگذاری، نقاط ضعف مجدداً اصلاح، و در نهایت طرح اصلی تقویت انتخاب شده است. در ادامه، با استفاده از بارگذاری ۱/۴ دهانه در هر دو طرف، مجدداً نقاط ضعف در طاق‌های کمکی مشخص و طرح تقویت آنها ارائه شده است. طرح تقویت نهایی در شکل ۱۶ و نتایج تحلیل تنش‌ها در سازه‌ی تقویت‌شده در شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود.

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش اثر تغییر پارامتر نسبت مدول کشسانی مصالح طاق به پرکننده در تسلیح خارجی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج ذکر شده، با افزایش این پارامتر از سطح تنش‌های کششی در داخل طاق و مصالح پرکننده کاسته و تنش‌های مذکور در سطح خارجی متمرکز می‌شوند، که البته با افزایش این نسبت بر میزان جابه‌جایی نیز افزوده می‌شود، که در مقادیر بالا منجر به انتقال تنش‌ها به سایر نقاط سازه می‌شود. لذا باید حالت بهینه تعیین شود، که در مدل مورد مطالعه این نسبت بین ۷ تا ۱۰ تعیین شده است. جهت مطالعات آتی می‌توان به بررسی و تعیین اثر المان‌های سطحی و شعاعی مورد استفاده در روش تسلیح خارجی و همچنین عمق بهینه‌ی المان‌های شعاعی پرداخت.



شکل ۱۴. هیلبر و GFRP.



شکل ۱۵. نمایی از روش تسلیح خارجی.

در صورت انتخاب مواد فلزی معمولی سعی می‌شود از میله‌های با کمینه ضخامت استفاده شود تا با توجه به سطح کمتر در صورت تخریب و خوردگی کمترین آسیب را به سطح سازه وارد کنند و همچنین گروت انتخاب‌شده به نحوی باشد که تطابق کامل با مصالح طاق و میله‌ها داشته باشد. میله‌هایی که به صورت عمودی نصب می‌شوند، منجر به بهبود توزیع عرضی بارها و همچنین مقاومت خمشی عرضی قوس می‌شوند.^[۱۴] باید توجه داشت در صورتی که سازه جزء بناهای تاریخی باشد، باید تغییر ظاهری ایجادشده در سازه مد نظر قرار گیرد. همچنین در صورت طراحی نامناسب، نفوذ آب از بالا می‌تواند باعث جداسدن لایه‌ی مصالح تسلیح از سازه شود.^[۱۵]

در این مرحله از پژوهش، سازه با استفاده از مش فلزی ساخته شده از هیلبر (سیستم هلیفیکس^۵) به صورت سطحی و عمقی مقاوم‌سازی شده و به منظور بررسی اثر روش تسلیح خارجی، طرحی جهت تسلیح انتخاب و با استفاده از المان‌های سطحی و عمقی در قسمت داخلی قوس اصلی مقاوم‌سازی سازه انجام شده است. طرح تهیه شده به صورت ثابت روی ۱۲ مدل اعمال شده است. المان‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی در روش تسلیح خارجی، المان frame است، که ۲ گره‌ی بی‌است و در حالت ۳ بعدی ۶ درجه آزادی دارد. تنظیمات نرم‌افزار به گونه‌ی صورت گرفته است که المان‌های frame فقط قادر به تحمل نیروهای محوری باشند. ابتدا طاق اصلی که طاق بحرانی نیز است (در حالتی که بار متمرکز در وسط دهانه است)، با یک فرض اولیه با استفاده از المان‌های frame با تعداد و مقطع معین تقویت و

پانوشتها

1. Abaquse
2. Pop Bottle

3. Lourenço
4. Hilber
5. Heliflex

منابع (References)

1. Heyman, J., *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*, 2th Edition, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 5-10 (1995).
2. Zheng, Y., Taylor, S. and Robinson, D. "Nonlinear finite element analysis of masonry arch bridges reinforced with FRP", *6th Int. Conf. on Arch Bridges*, **1**, Fuzhou University, Fuzhou, China, pp. 838-845 (2010).
3. Brooks, C.L. and Mullett, P.J. "Service load testing, numerical simulation and strengthening of masonry arch bridges", *4th Int. Conf. on Arch Bridges, CIMNE*, Barcelona, pp. 489-499 (2004).
4. Boz, B. "Structural analysis of historic aspendos theatre", The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkish, 151 p. (2006), Sustainable Bridges, Masonry Arch Bridges Background, Document D4.7 (2007).
5. *Recommendation for the inspection, Assessment and Maintenance of Masonry Arch Bridges*, Union International of Railways (UIC), UIC Code 778-3 (April 2011).
6. Sustainable Bridges, *Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges*, Global Change & Ecosystems Integrated Project (2007).
7. Kucukdogan, B. "An investigation of historical masonry constructions by steel skeleton", Turkish, The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, 114 p. (August 2007).
8. Maruccio, C., *Numerical Analysis of FRP Strengthened Masonry Structures*, Sapienza, University of Rome School of Engineering, 272 p. (December 2010).
9. Sustainable Bridges, *Structural Assessment of Masonry Arch Bridges*, Background document D4.7.1 (2007).
10. SAP2000, *SAP2000 Graphic User Interface Manual*, Berkeley, California: Computers and Structures Inc. (1998).
11. *Loads to be Considered in Railway Bridge Design*, Union International of Railways (UIC), UIC Code 776-1R (2006).
12. UIC Code 772, "Static loading diagrams to be taken into consideration for the design of rail carrying structures on lines used by international services", Union International of Railways (UIC), 16 p. (2003).
13. Beuerman T.E., *Inventory of Repairing and Strengthening Techniques for Masonry Arch Bridges*, Technical University of Catalonia, Spain, 119 p. (2009).
14. Apreutesei, V., *Strengthening of Stone Masonry Arch Bridges Three Leaf Masonry Walls-State of the Art*, University of Minho Escola de Engenharia Guimaraes, Portugal, 94 p. (2005).
15. European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research Working Group 6, *COST 345 WG 6 Report, on Remedial Measures for Highway Structures Procedures Required for Assessing Highway Structures*, TRL Limited, Crowthorne, UK, Crossing Database, Department of Track and Infrastructures, I.R. Iran Railway (2004) .