

رفتار گسیختگی و برآورد ظرفیت برشی شاه‌تیرهای مرکب بتنی - فولادی با سخت‌کننده‌ی قطری

ایوب دهقانی* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

علی‌اکبر حیات داودی (کارشناس ارشد)

دانشگاه ملی مالزی

فریبرز ناطقی‌الهی (استاد)

بزهنگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۵ (ص. ۳۷-۲۶)
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۳۷-۲۶

در این مطالعه، یک روش تحلیلی جدید برای تخمین ظرفیت برشی در شاه‌تیرهای مرکب بتنی - فولادی که سخت‌کننده‌ی قطری دارند، ارائه شده است. این روش بر مبنای عملکرد میدان کششی در جان شاه‌تیر فولادی و سازوکار خرابی تاوهی بتنی رابطه‌سازی شده است. دقت روش پیشنهادی با استفاده از تحلیل‌های اجزاء محدود شاه‌تیرهای مرکب، که چیدمان‌های مختلفی از سخت‌کننده‌های قطری دارند، سنجیده شده است. در الگوسازی‌های اجزاء محدود، که به‌صورت سه بُعدی انجام شده است، رفتار غیرخطی بتن و فولاد با استفاده از الگوهای رفتاری موجود تعریف شده است. نتیجه‌های به‌دست‌آمده از روش تحلیلی و الگوهای اجزاء محدود بیان‌گر آن است که روش تحلیلی پیشنهادی می‌تواند با دقت قابل قبولی ظرفیت برشی نهایی شاه‌تیرهای مرکب را برآورد کند. همچنین نشان داده شده است که سخت‌کننده‌های قطری از یک سو اثرهای کمانشی پانل برشی شاه‌تیر را کاهش می‌دهند و از سوی دیگر می‌توانند باعث افزایش استحکام کمانش برشی کشسان و افزایش ظرفیت برشی نهایی شاه‌تیر شوند.

واژگان کلیدی: شاه‌تیر مرکب، سخت‌کننده‌ی قطری، ظرفیت برشی، تحلیل اجزاء محدود غیرخطی.

۱. مقدمه

برآورد ظرفیت برشی شاه‌تیرهای فولادی و توسعه‌ی روش‌های محاسبه‌ی نیروی گسیختگی این عضوها موضوع بسیاری از پژوهش‌ها در دهه‌های گذشته بوده است. تا اوایل سال ۱۹۶۰، طراحی جان شاه‌تیرهای فولادی بر مبنای کمانش پایه‌ریزی شده بود. زیرا فرمول‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی این پدیده ساده‌تر و برای جامعه‌های مهندسی کاملاً شناخته شده بودند، در حالی که تحلیل مقاومت پس‌کمانشی موضوع جدیدی به شمار می‌رفت. به هر حال با گذشت زمان، اغلب دستورالعمل‌ها با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان کوچک‌تری برای کمانش جان نسبت به تسلیم یا گسیختگی دیگر اجزاء شاه‌تیر، مقاومت پس‌کمانشی را به‌عنوان بخشی از مقاومت شاه‌تیر پذیرفتند. به طور کلی دو روش برای طراحی جان شاه‌تیر به کار برده می‌شود: ۱. طراحی براساس کمانش به‌عنوان یک شرط محدودکننده با یک ضریب اطمینان نسبتاً پایین که اجازه‌ی مقاومت پس‌کمانشی را بدهد؛ ۲. طراحی براساس مقاومت تسلیم یا نهایی به‌عنوان یک شرط محدودکننده با ضریب اطمینانی که برابر با ضریب اطمینان منظور شده

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۵/۱۸، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۴.

a.dehghani@pgu.ac.ir
farzad_hdavoodi@yahoo.com
nat.eghi@iiees.ac.ir

جدیدتر سازوکار خرابی باسلر،^[۲] با در نظر گرفتن تغییرات تنش غشایی در سرتاسر جان شاه تیر ارائه و مشخص شد که مقدار تنش غشایی (σ_t) با شیب نوار تسلیم تغییر خواهد کرد.^[۱۱] همچنین مطالعاتی در سال ۱۹۷۲ نشان داده است که گسیختگی شاه تیر فولادی تحت بار برشی را می توان با یک عملکرد دو بخشی بیان کرد.^[۱۲] در مطالعه مذکور فرض شده است که یک میدان غشایی کششی بتواند در امتداد کشش قطری توسعه یابد و برای محاسبه ی تنش کششی قطری تسلیم جان (σ_t^y) از معیار فون میسز استفاده شود. برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود (۱۹۷۵) با فرض آنکه از اثر تنش های خمشی در تنش های کم انشی برشی جان صرف نظر شود و تغییرات σ_t^y در پانل های جان قابل چشم پوشی باشد و اتصال لبه های پانل با تکیه گاه ساده الگوسازی شود، یک رابطه ی مهم برای محاسبه ی ظرفیت برشی نهایی شاه تیر فولادی ارائه کردند.^[۱۳]

رفتار شاه تیرهای با جان سخت شده با سخت کننده های عرضی در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۹،^[۱۴] تحت بارگذاری برشی خالص مطالعه شده است. ارزیابی روش های مختلف تعیین مقاومت برشی شاه تیرهای فلزی با سخت کننده ی عرضی نیز در مطالعه ی دیگری (۲۰۰۸) انجام پذیرفت و نشان داده شد که روش بار نهایی باسلر،^[۲] بهترین روشی است که دو پارامتر سادگی و دقت را به صورت هم زمان شامل می شود.^[۱۵] ظرفیت برشی و رفتار شاه تیرهای فولادی با سخت کننده ی عمودی، که جان بین آنها با سخت کننده های قطری مقاوم شده بود، نیز در مطالعه ی دیگری در سال ۱۹۷۸ ارزیابی شد و نتیجه ی بررسی های نگره و آزمایشگاهی آنها بیانگر عملکرد مناسب سخت کننده های قطری در مقاوم کردن جان بوده و نشان داده شد که این گونه سخت کننده ها، اجازه ی توسعه ی میدان کششی را می دهند، با وجود آنکه جان شاه تیر با سخت کننده های زیادی تقویت شده است.^[۱۶] این زمینه ی مطالعاتی در سال های اخیر نیز ادامه یافته است. مثلاً در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ تلاش شده است تا با تحلیل های عددی شاه تیرهای فولادی علت، چگونگی، و زمان تشکیل مفاصل مومسان شرح داده شود.^[۱۷] در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۹، ظرفیت برشی و طراحی شاه تیرهای فولادی با ورق موج دار در جان به منظور دستیابی به طراحی اقتصادی ارائه شده است.^[۱۸]

با وجود بررسی های گسترده ی نگره و آزمایشگاهی روی شاه تیرهای فولادی، فقط تعداد محدودی مطالعه بر روی شاه تیرهای مرکب فولادی - بتنی صورت گرفته است. در این گونه عضوها که از یک تابه ی بتنی و یک شاه تیر فولادی تشکیل شده اند، برای دستیابی به عملکرد مرکب از اتصالات برشی استفاده می شود که به بال فوقانی شاه تیر جوش می شوند. چنین رفتار مرکبی، سبب تغییرات قابل ملاحظه ی در عملکرد میدان کششی غشایی در جان شاه تیر می شود، به طوری که در بار نهایی فاصله ی میان مفاصل مومسان در بال فوقانی متصل به تابه ی بتنی از فاصله ی مفاصل مومسان در بال دیگر بیشتر می شود. به طور کلی می توان گفت که رفتار شاه تیر مرکب از وضعیت کشسان تا حالت نهایی نسبت به شاه تیر فلزی تغییر می کند و عملکرد مرکب سبب افزایش قابل توجهی در مقاومت و سختی شاه تیرها می شود، که میزان آن وابسته به اتصالات برشی است. نتایج مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته است، برای درک رفتار کشسان و غیرکشسان این گونه شاه تیرها کافی نیست. برخی پژوهشگران نیز با مطالعه ی آزمایشگاهی (۱۹۸۷) رفتار شاه تیرهای مرکب با تکیه گاه ساده تحت بار برشی، رابطه یی برای پیش بینی ظرفیت برشی عمودی، شامل مقاومت تابه ی بتنی و مقاومت شاه تیر فولادی ارائه کرده اند.^[۱۹] همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۹۱، بدون در نظر گرفتن تأثیر مرکب بودن شاه تیر، مقاومت برشی این عضوها رابطه سازی شده و رابطه هایی برای طراحی پیشنهاد شده است.^[۲۰] آزمایش های شاه تیرهای مرکب دهانه کوتاه که در پژوهش هایی در سال های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۳ انجام شده است،^[۲۱]

نشان می دهد که مقاومت برشی این گونه عضوها با اتصالات برشی کافی، به طور قابل توجهی بیشتر از فقط شاه تیر فولادی است. همچنین رفتار شاه تیرهای مرکب با اتصالات برشی کم و زیاد، که به ترتیب منجر به عملکرد مرکب محدود و کامل می شود، تحت بارگذاری متمرکز و یکنواخت در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ با انجام تحلیل های اجزاء محدود غیرخطی مطالعه شده است.^[۲۲] به تازگی برخی پژوهشگران (۲۰۱۲) با انجام یک مطالعه ی نگره روی شاه تیرهای مرکب با تکیه گاه ساده تحت برش خالص و با در نظر گرفتن رفتار مرکب، یک روش تحلیلی برای پیش بینی ظرفیت برشی نهایی این گونه عضوها ارائه کرده اند.^[۲۳] در این مطالعه، عملکرد میدان کششی در جان شاه تیر و گسیختگی برشی تابه ی بتنی در نظر گرفته شده و روش پیشنهادی بر مبنای الگوی کاردیف (۱۹۷۵)،^[۱۳] رابطه سازی شده است. مطالعات نویسندگان این نوشتار نشان داده است که رابطه هایی برای برآورد ظرفیت برشی شاه تیر مرکب با سخت کننده ی قطری ارائه نشده است. بنابراین تلاش شده است تا معادلات حاکم بر رفتار برشی شاه تیرهای مرکب، که با سخت کننده های قطری مقاوم شده اند، از مرحله ی کشسان تا مرحله ی گسیختگی توسعه داده شود. برای این منظور، رابطه سازی مقاومت برشی قسمت فولادی و بتنی با در نظر گرفتن تأثیر سخت کننده های قطری بر مبنای روش کار مجازی به صورت مجزا تشریح شده است. سپس با استفاده از تحلیل های سه بعدی اجزاء محدود غیرخطی، دقت رابطه های ارائه شده سنجیده شده است. الگوسازی های اجزاء محدود بر مبنای شاه تیرهای مرکب صورت گرفته است، که رفتار آنها توسط پژوهشگران دیگری به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شده است. همچنین در پایان، تأثیر چیدمان سخت کننده های قطری در مقدار ظرفیت برشی مطالعه شده است.

۲. مطالعه ی تحلیلی و پیشنهاد روشی برای محاسبه ی

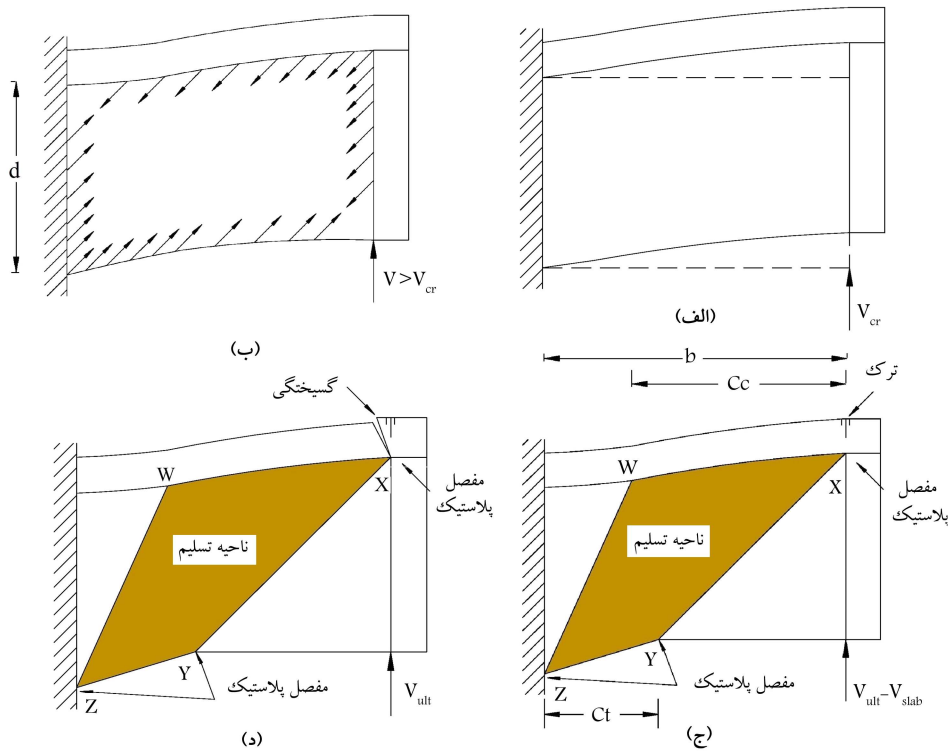
ظرفیت برشی

۱.۲. رفتار شاه تیرهای مرکب با سخت کننده ی قطری تحت بار برشی

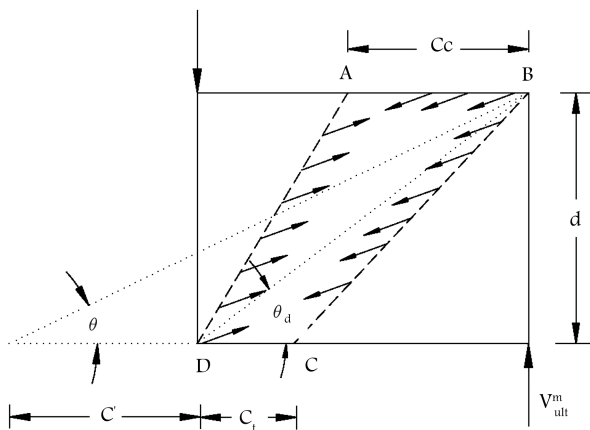
بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی و مطالعات اجزاء محدود،^[۲۴] رفتار شاه تیرهای مرکب با سخت کننده ی عرضی تحت بار برشی را می توان مطابق شکل ۱ به صورت ۴ سازوکار باربری تقسیم بندی کرد. در دو مرحله ی اول تنش های اصلی کششی و فشاری در ورق جان توسعه می یابند و یک سازوکار جدید باربری در شاه تیر به وجود می آید، به طوری که بار برشی اضافه یی توسط یک میدان تنش غشایی کششی تحمل می شود. بعد از رسیدن جان به مقاومت تسلیم، گسیختگی نهایی با تشکیل مفاصل مومسان در بال ها و گسترش ترک خوردگی شدید در تابه ی بتنی به وجود می آید. این وضعیت در شکل ۱ ج و د نشان داده شده است. در شاه تیرهای مذکور به دلیل عملکرد مرکب، بخشی از میدان کششی قطری توسط تابه ی بتنی مهار شده و بنابراین بار فشاری عملکرد قوی تری نسبت به بال کششی خواهد داشت. چنین عملکردی سبب می شود که در حالت گسیختگی فاصله ی بین مفاصل مومسان در بال فشاری (C_c) بیشتر از این فواصل در بال کششی (C_t) باشد.

این عملکرد مرکب میان بخش فلزی و تابه ی بتنی، ظرفیت باربری شاه تیرهای مرکب را نسبت به فقط شاه تیر فلزی افزایش می دهد. به طور کلی می توان گفت که رفتار شاه تیرهای مرکب با سخت کننده های قطری تقریباً مشابه با شاه تیرهای مرکب با سخت کننده های عرضی است.^[۱۶]

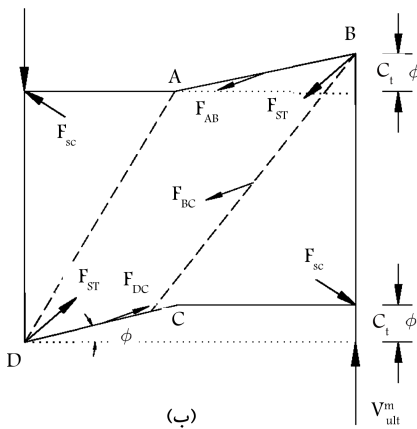
بنابراین در مطالعه حاضر مقاومت برشی نهایی (V_{ult}) شاه تیر مرکب با سخت کننده های قطری مانند آنچه برای شاه تیر مرکب با سخت کننده های عرضی



شکل ۱. چهار بخش سازوکار باربری شاه تیرهای مرکب. [۲۴]



(الف)



(ب)

شکل ۲. حالت گسیختگی برای برش خالص در قسمت فولادی شاه تیر.

توسط پژوهشگران دیگر ارائه شده است، براساس مجموع مقاومت برشی قسمت فولادی شاه تیر (V_s) و مقاومت برشی تاوهی بتنی (V_c) در نظر گرفته شده است.

۲.۲. مقاومت برشی قسمت فولادی شاه تیر (V_s)

همان طور که در بخش مقدمه عنوان شده است، مقاومت برشی قسمت فولادی شاه تیر با در نظر گرفتن عملکرد مرکب در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، به صورت رابطه ۱ ارائه شده است: [۲۴]

$$V_s' = (C_c + C_t) \sigma_t^y t \sin^2 \theta + \sigma_t^y t d (\cot \theta - \cot \theta_d) \sin^2 \theta + \tau_{cr} t d \quad (1)$$

که در آن، مطابق شکل ۲ پارامترهای C_c و C_t به ترتیب فاصله‌ی طولی مفاصل مومسان در بال فشاری و کششی، σ_t^y تنش غشایی تسلیم در نوار کششی، t ضخامت جان شاه تیر، d عمق جان شاه تیر، τ_{cr} تنش برشی بحرانی کشسان در جان، θ_d زاویه‌ی قطر پانل برشی با افق، و θ زاویه‌ی تنش غشایی کششی با افق است که مقدار آن برای دست یابی به بیشینه‌ی مقاومت برشی از طریق سعی و خطا به دست می‌آید.

اگر در جان شاه تیرهای مرکب از سخت کننده‌های قطری استفاده شود، بدیهی است که رابطه‌ی ۱ برای محاسبه‌ی مقاومت برشی قسمت فولادی معتبر نخواهد بود. بنابراین در این بخش با در نظر گرفتن تأثیر سخت کننده‌های قطری رابطه‌ی جدیدی توسعه داده می‌شود. مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، اتصال جان در مسیر سخت کننده‌های عرضی، طولی، و قطری با تکیه‌گاه ساده الگوسازی می‌شود. چنین فرضی بر مبنای مطالعات پرترو و همکاران [۱۳] است. اما بدیهی است که شرایط مرزی واقعی به ضخامت نسبی بال‌ها و ورق جان و همچنین سختی سخت کننده‌ها بستگی دارد. همچنین فرض می‌شود که پانل‌های جان بیشتر تحت برش قرار می‌گیرند

باید تسلیم شود، تا سازوکار مومسان تشکیل شود. مانند آنچه در شکل ۲ ب نشان داده شده است، بار نهایی را می‌توان با وارد کردن یک تغییرمکان مجازی به شاه تیر در حالت گسیختگی به دست آورد. همچنین مطابق شکل ۲ الف به جای در نظر گرفتن منطقه‌ی تسلیم ABCD در جان شاه تیر، نیروهای عکس‌العمل در مجاورت بال و جان جایگزین تنش غشایی کششی می‌شود. اکنون اگر فرض شود چرخشی به مقدار ϕ در مفصل مومسان D رخ دهد، تغییرمکانی برابر با $C_t \phi$ در نقاط B و C به وجود می‌آید. چرخش متناظر در مفصل A برابر با $C_t \phi / C_c$ خواهد بود. بنابراین نشان داده می‌شود که تنش‌های غشایی وجوه BC، AB و CD و همچنین نیروهای F_{sc} و F_{st} حاصل از سخت‌کننده‌های قطری در نقاط B و E با اعمال تغییرمکان مجازی کار انجام می‌دهند و تنش‌های اعمالی به وجه ساکن AD در تغییرمکان مجازی دخالتی ندارد. همان‌طور که در شکل ۲ ب نشان داده شده است، نیروهای حاصل از تنش غشایی عبارت‌اند از: F_{AB} ، F_{BC} و F_{DC} که می‌توان آنها را به صورت رابطه‌ی ۵ نوشت:

$$F_{AB} = \sigma_t^y . t . C_c . \sin \theta \quad (الف)$$

$$F_{DC} = \sigma_t^y . t . C_t . \sin \theta \quad (ب)$$

$$F_{BC} = \sigma_t^y . t . d(\cot \theta - \cot \theta_d) + C_t \sin \theta \quad (ج)$$

با فرض آنکه σ_{sc} و σ_{st} به ترتیب تنش کششی و فشاری محوری در سخت‌کننده‌های قطری باشند، نیروهای F_{sc} و F_{st} به عنوان نیروهای موجود در سخت‌کننده‌های قطری به صورت روابط ۶ و ۷ نوشته می‌شوند:

$$F_{st} = A_s . \sigma_{st} \quad (۶)$$

$$F_{sc} = A_s . \sigma_{sc} \quad (۷)$$

که در آن‌ها، A_s سطح مقطع سخت‌کننده‌های کششی یا فشاری فرض شده است. همچنین تنش کششی قطری σ_{st} و تنش فشاری قطری σ_{sc} بر مبنای نگره‌ی پایداری ارتجاعی^[۱۵] می‌توانند به صورت روابط ۸ و ۹ نوشته شوند:

$$\sigma_{st} = \sigma_t [1 - (1 + \nu) \sin^2(\theta_d - \theta)] + [(1 + \nu) \tau_{cr} \sin 2\theta_d] \leq \sigma_{yw} \quad (۸)$$

$$\sigma_{sc} = -\sigma_t [1 - (1 + \nu) \sin^2(\theta_d - \theta)] + [(1 + \nu) \tau_{cr} \sin 2\theta_d] \leq \sigma_{crs} \quad (۹)$$

که در آن، σ_{crs} تنش کماتشی سخت‌کننده‌های قطری است و مقدار آن مطابق مطالعات یونزاوا و همکاران^[۱۶] از روابط ۱۰ الی ۱۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_{crs} = \frac{\sigma_{yw}}{\lambda^2} \quad \text{for } \lambda \geq \sqrt{2} \quad (۱۰)$$

$$\sigma_{crs} = \sigma_{yw} \left(1 - 0.53(\lambda - 0.45)^{1.26} \right) \quad \text{for } 0.45 \leq \lambda < \sqrt{2} \quad (۱۱)$$

$$\sigma_{crs} = \sigma_{yw} \quad \text{for } \lambda < 0.45 \quad (۱۲)$$

به طوری که در آن‌ها، λ و K_s از روابط ۱۳ و ۱۴ به دست می‌آیند:

$$\lambda = \left(\frac{b_s}{t_s} \right) \sqrt{12(1 - \nu^2) \left(\frac{\sigma_{yw}}{E} \right) (\pi^2 . K_s)} \quad (۱۳)$$

$$K_s = \left(\frac{b_s}{t} \right)^2 + 0.452 \quad (۱۴)$$

و از تأثیر تنش‌های خمشی در صورت وجود، صرف‌نظر می‌شود. زمانی که یک شاه تیر با جان کاملاً مسطح تحت بار برشی قرار می‌گیرد، تنش برشی یکنواختی قبل از کماتش در سرتاسر پانل به وجود می‌آید. بنابراین تا این مرحله تنش‌های کششی و فشاری اصلی با بزرگی τ به ترتیب در زاویه‌های ۴۵ و ۱۳۵ درجه نسبت به بال به وجود می‌آیند. این سیستم تنش تا رسیدن تنش برشی τ به مقدار بحرانی τ_{cr} ، که در آن پانل دچار کماتش می‌شود، وجود دارد. مقدار این تنش برشی بحرانی کشسان τ_{cr} با استفاده از نگره‌ی پایداری کلاسیک سازه‌ها^[۱۵] قابل محاسبه است. با این فرض محافظه‌کارانه که اتصال لبه‌های پانل برشی به سخت‌کننده‌ها به صورت تکیه‌گاه ساده باشد، تنش برشی بحرانی کشسان τ_{cr} به صورت رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\tau_{cr} = k \left[\frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{d} \right)^2 \right] \leq \tau_y = \frac{\sigma_{yw}}{\sqrt{3}} \quad (۲)$$

که در آن، E مدول کشسانی، ν ضریب پواسون، σ_{yw} تنش تسلیم جان، τ_y تنش تسلیم برشی، و K ضریب کماتش کشسان شاه تیر با سخت‌کننده‌ی قطری تحت تنش برشی است. بنابراین نیروی برشی که سبب کماتش ورق جان می‌شود، به صورت $V_{cr} = \tau_{cr} dt$ تعیین می‌شود.

با توجه به مطالعات یونزاوا و همکاران^[۱۶] ضریب کماتشی کشسان که تابعی از نسبت ابعاد پانل جان است، برای سخت‌کننده‌های فشاری و X شکل به صورت رابطه‌ی ۳ الف:

$$K = 11.9 + 10.1/\phi + 10.9/\phi^2 \quad (الف)$$

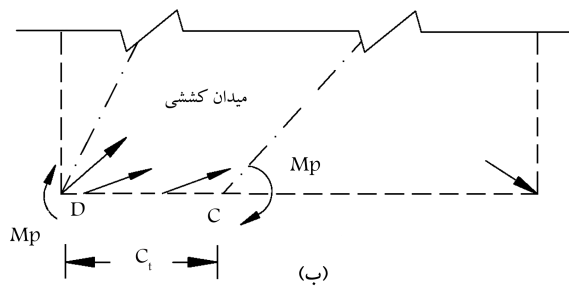
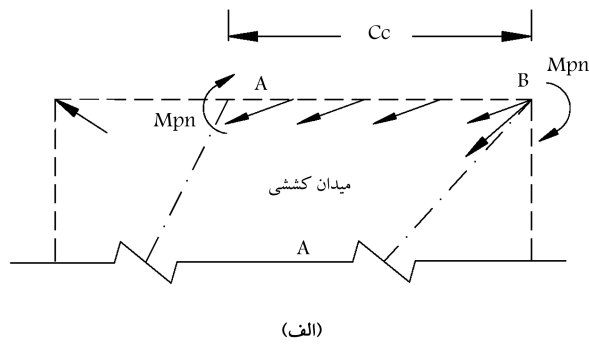
و برای سخت‌کننده‌ی کششی به صورت رابطه‌ی ۳ ب:

$$K = 17.2 - 22.5/\phi + 16.7/\phi^2 \quad (ب)$$

تعریف می‌شود. مقدار K به نسبت ابعاد پانل جان $\phi = d/b$ بستگی دارد، که در آن b مطابق شکل ۱، عرض پانل برشی جان است. اگر تنش برشی در پانل به مقدار بحرانی خود τ_{cr} برسد، جان کماتش می‌کند و پانل ظرفیتی برای تحمل افزایش تنش فشاری نخواهد داشت. کماتش جان سبب تغییر سازوکار تحمل بار می‌شود. بارهای اضافه شده پس از بار کماتشی توسط یک میدان کششی غشایی که مطابق شکل ۲ از بال بالا تا بال پایین و از دو طرف تا سخت‌کننده‌های عرضی توسعه می‌یابد، تحمل می‌شود. این مرحله، عملکرد برشی میدان کششی نامیده می‌شود. مقدار این تنش غشایی کششی σ_t و زاویه‌ی آن باید تعیین شود، تا بتوان در این مرحله حالت کلی تنش در جان تیر را براساس تنش غشایی پس‌کوماتشی و تنش‌های رخ داده‌ی ناشی از τ_{cr} به دست آورد. با افزایش بارگذاری، تنش غشایی افزایش می‌یابد تا آنکه همراه با تنش کماتشی τ_{cr} ، سبب تسلیم جان شوند. این مقدار تنش غشایی با σ_t^y نشان داده می‌شود و از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید^[۱۲]:

$$\sigma_t^y = -\frac{3}{4} \tau_{cr} \sin 2\theta + \sqrt{\sigma_{yw}^2 + \tau_{cr}^2 \left[\left(\frac{3}{4} \sin 2\theta \right)^2 - 3 \right]} \quad (۴)$$

با توسعه‌ی میدان تسلیم در جان و شکل‌گیری مفاصل مومسان در بال‌ها، سازوکار مومسان تشکیل و سبب گسیختگی پانل جان می‌شود. میدان کششی در جان، که از بال فشاری تا بال کششی ادامه دارد، به علت اتصال بال فشاری با تاوه‌ی بتنی ظرفیت باربری بیشتری را به وجود می‌آورد. با توجه به آنکه تنش برشی یکنواختی در ورق جان وجود دارد، می‌توان گفت تنش غشایی σ_t^y ، که سبب تسلیم جان شده است، مقدار ثابتی در سرتاسر ناحیه‌ی تسلیم دارد. این تذکر لازم است که اگرچه تسلیم می‌تواند به خارج از ناحیه‌ی ABCD نیز گسترش یابد، اما دست‌کم این ناحیه



شکل ۳. نمودار آزاد قسمت‌های AB و DC در بال‌های فشاری و کششی.

کرد. با در نظر گرفتن دیاگرام آزاد مقطع AB مطابق شکل ۳، مقدار M_{pn} موجود در بال فشاری را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۹ به دست آورد:

$$2M_{pn} = \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta \cdot C_c^2 \quad (19)$$

با قراردادن M_p و M_{pn} از معادلات ۱۸ و ۱۹ در معادله‌ی ۱۷، رابطه‌ی ۲۰ حاصل می‌شود:

$$V_{ult}^m = \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta \cdot C_t + \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta \cdot C_c + \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta \cdot C_t + \sigma_t^y \cdot t \cdot d (\cot \theta - \cot \theta_d) \sin^2 \theta + \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t (C_c \cdot \sin \theta) \sin \theta - \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t (C_t \cdot \sin \theta) \sin \theta + A_s \cdot \sigma_{st} \sin \theta_d + A_s \cdot \sigma_{sc} \sin \theta_d \quad (20)$$

که فرم ساده‌شده‌ی آن به صورت رابطه‌ی ۲۱ نوشته می‌شود:

$$V_{ult}^m = (C_t + C_c) \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta + \sigma_t^y \cdot t \cdot d (\cot \theta - \cot \theta_d) \sin^2 \theta + A_s \cdot \sin \theta_d (\sigma_{st} + \sigma_{sc}) \quad (21)$$

که در آن، C_t و C_c به ترتیب از رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ به صورت روابط ۲۲ و ۲۳ تعیین می‌شوند:

$$C_c = \frac{2}{\sin \theta} \sqrt{\frac{M_{pn}}{\sigma_t^y \cdot t}} \leq b \quad (22)$$

$$C_t = \frac{2}{\sin \theta} \sqrt{\frac{M_p}{\sigma_t^y \cdot t}} \leq b \quad (23)$$

M_p نیز لنگر مومسان بال کششی است، که از رابطه‌ی $M_p = \sigma_{yf} \cdot b_f \cdot t_f^2 / 4$ به دست می‌آید. M_{pn} لنگر مومسان بال فوقانی شاه تیر است، که همراه با بتن

که در آن‌ها، b_s ، t_s و l به ترتیب عرض، ضخامت، و طول مؤثر سخت‌کننده‌های قطری است. همچنین برای جلوگیری از کماتش موضعی سخت‌کننده‌ها پیشنهاد شده است که نسبت عرض به ضخامت (b_s/t_s) در سخت‌کننده‌های قطری مانند سخت‌کننده‌های عرضی در نظر گرفته شود،^[۲۶] و این نسبت با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ محاسبه شود:

$$\frac{b_s}{t_s} = 0.56 \sqrt{\frac{E}{\sigma_{yw}}} \quad (15)$$

این تذکر لازم است که رابطه‌سازی ارائه‌شده برای σ_{sc} و σ_{st} در مورد دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده‌های قطری نیز استفاده شده است.^[۲۷]

همان‌طور که پیشتر عنوان شده است، قرارگیری بال فوقانی در بتن و عملکرد مرکب سبب می‌شود که فاصله‌ی C_c بین مفاصل A و B نسبت به فاصله‌ی C_t بین مفاصل C و D در بال کششی متفاوت باشد. اکنون با جمع‌کردن کار داخلی انجام‌شده توسط خمش مومسان در ۴ مفصل نشان داده‌شده در شکل ۲ ب و کار خارجی انجام‌شده توسط نیروهای غشایی و نیروی V_{ult}^m ، رابطه‌ی ۱۶ حاصل می‌شود:

$$V_{ult}^m (C_t \phi) = 2M_p (\phi) + 2M_{pn} \left(\frac{C_t}{C_c} \phi\right) + F_{BC} \sin \theta (C_t \phi) + F_{AB} \sin \theta \left(\frac{C_t}{C_c} \phi\right) - F_{DC} \sin \theta \left(\frac{C_t}{C_c} \phi\right) + F_{st} \sin \theta_d (C_t \phi) + F_{sc} \sin \theta_d (C_t \phi) \quad (16)$$

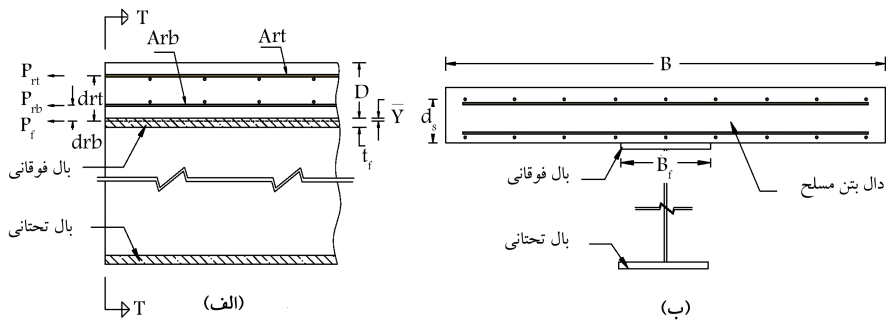
که در آن، M_p لنگر مومسان در بال کششی و M_{pn} لنگر مومسان در بال فشاری است. با قراردادن F_{BC} ، F_{AB} ، F_{DC} و F_{st} از معادله‌ی ۵، F_{sc} و F_{st} به ترتیب از معادله‌ی ۶ و ۷ و همچنین تقسیم‌کردن دو طرف معادله‌ی ۱۶ بر $C_t \phi$ ، بار برشی نهایی حمل‌شده توسط میدان غشایی از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

$$V_{ult}^m = \frac{2M_p}{C_t} + \frac{2M_{pn}}{C_c} + \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta \cdot C_t + \sigma_t^y \cdot t \cdot d (\cot \theta - \cot \theta_d) \sin^2 \theta + \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t (C_c \cdot \sin \theta) \sin \theta - \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t (C_t \cdot \sin \theta) \sin \theta + A_s \cdot \sigma_{st} \sin \theta_d + A_s \cdot \sigma_{sc} \sin \theta_d \quad (17)$$

برای استفاده از معادله‌ی ۱۷ در محاسبه‌ی بار نهایی باید مقادیر C_c و C_t که نشان‌دهنده‌ی موقعیت مفاصل مومسان در بال‌ها هستند، مشخص شود. مطابق شکل ۳، این پارامترها براساس تعادل بال‌ها و دیاگرام آزاد بخش‌های AB و CD به صورتی که در ادامه شرح داده شده است، تعیین می‌شود. یادآوری می‌شود که مفاصل مومسان داخلی در نقاط خمش بیشینه، که در آن نقاط برش در بال صفر است، تشکیل می‌شود. با نوشتن رابطه‌ی تعادل لنگر حول محور D و جایگزینی نیروی F_{DC} با معادله‌ی ۵، رابطه‌ی ۱۸ حاصل می‌شود:

$$2M_p = \frac{1}{3} \sigma_t^y \cdot t \sin^2 \theta \cdot C_t^2 \quad (18)$$

همان‌طور که پیشتر بیان شده است، بال فوقانی شاه تیر در بتن قرار گرفته است و بنابراین بال فوقانی و بتن عملکرد مرکب خواهند داشت. بنابراین لنگر مومسان (M_{pn}) در این مقطع، با لنگر موجود در نقاط C و D متفاوت خواهد بود. در نقطه‌ی B ، مقطع خمش منفی دارد و بال فولادی همراه با میلگرد تاوه متحمل این خمش می‌شوند. با افزوده‌شدن بار، مقطع مرکب در نقطه‌ی A ، لنگری معادل با M_{pn} ایجاد خواهد



شکل ۴. جزئیات در بال مرکب. [۱۷]

به صورت یک بال فشاری مرکب عمل خواهد کرد. مطابق شکل ۴ و براساس مطالعات گذشته، [۲۳] M_{pn} را می توان به صورت رابطه ی ۲۴ نوشت:

$$M_{pn} = \frac{p_f}{2.t_f} [\bar{Y}^2 + (t_f - \bar{Y})^2] + (p_{rt}.d_{rt} + p_{rb}.d_{rb}) \quad (24)$$

که در آن، \bar{Y} ، p_f ، p_{rb} و p_{rt} از روابط ۲۵ به دست می آیند:

$$\bar{Y} = \left(\frac{t_f}{2}\right) \left(1 - \frac{p_{rb} + p_{rt}}{p_f}\right) \quad (25)$$

$$p_{rt} = \sigma_{yr}.A_{rt}, \quad p_{rb} = \sigma_{yr}.A_{rb}, \quad p_f = \sigma_{yf}.b_f.t_f$$

که در آن ها، t_f ضخامت بال فولادی، A_{rt} و A_{rb} به ترتیب سطح مقطع میلگردهای فوقانی و تحتانی در تاوه ی بتنی، σ_{yr} و σ_{yf} به ترتیب مقاومت تسلیم میلگردها و بال، d_{rt} و d_{rb} به ترتیب فاصله ی میلگرد فوقانی و تحتانی در تاوه ی بتنی تا تار خشی هستند.

بنابراین در پایان مقاومت برشی پیشینه ی قسمت فولادی شاهتیر از جمع کردن نیروی تحمل شده توسط میدان غشایی V_{ult}^m با نیروی برشی لازم برای به کماتر رساندن جان $(V_{cr} = \tau_{cr}t_d)$ به صورت رابطه ی ۲۶ به دست می آید:

$$V_s = (C_c + C_t)\sigma_c^y t \sin^2 \theta + \sigma_c^y t d (\cot \theta - \cot \theta_d) \sin^2 \theta + A_s \cdot \sin \theta_d (\sigma_{st} + \sigma_{sc}) + \tau_{cr} t d \quad (26)$$

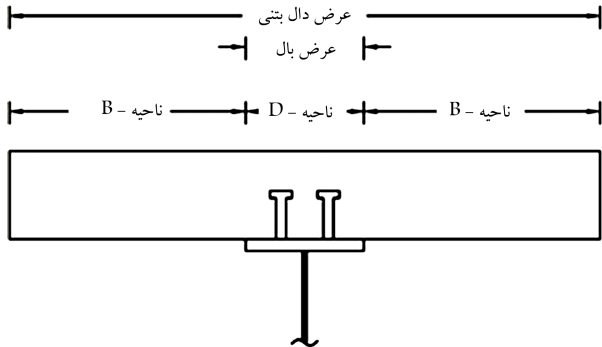
۳.۲. مقاومت برشی تاوه ی بتنی V_c و مقاومت برشی نهایی شاهتیر کامپوزیتی

در مطالعاتی در سال ۲۰۱۲، [۲۴] نشان داده شده است که عملکرد مرکب میان شاهتیر فولادی و تاوه ی بتنی فقط در قسمتی از شاهتیر وجود دارد. بنابراین مطابق شکل ۵ می توان عرض تاوه ی بتنی را به دو قسمت «ناحیه ی B» و «ناحیه ی D» تقسیم بندی کرد، که در آن فقط ناحیه ی D عملکرد مرکب دارد.

ظرفیت برشی ناحیه ی D را می توان براساس آیین نامه ی ۰۵-ACI ۳۱۸M، [۲۸] از رابطه ی ۲۷ به دست آورد:

$$V_{C-D} = F_{st} \cdot \sin \omega \cdot N_{st} \quad (27)$$

که در آن، N_{st} تعداد گل میخ در هر ردیف است. گل میخ ها به عنوان اتصالات برشی بر بال فوقانی شاهتیر جوش و در تاوه ی بتنی مهار می شوند. در چنین شرایطی نشان داده شده است که مطابق شکل ۵، یک دستک فشاری در فاصله ی میان دو



شکل ۵. ناحیه ی B و D در امتداد عرض تاوه ی بتنی. [۱۷]

گل میخ متوالی تشکیل می شود، [۲۸] که مقاومت حاصل از آن مطابق رابطه های ۲۸ و ۲۹ محاسبه می شود:

$$F_{st} = f_{ce} A_{st} \quad (28)$$

$$f_{ce} = 0.785 \beta_s f_{cu} \quad (29)$$

که در آن، $\beta_s = 1$ برای دستک فشاری با مقطع یکنواخت، $\beta_s = 0.75$ برای دستک فشاری بطری شکل با میلگرد عرضی کافی، $\beta_s = 0.6$ برای دستک فشاری بطری شکل بدون میلگرد عرضی کافی، f_{cu} مقاومت فشاری استوانه یی بتن و A_{st} سطح مقطع کوچک تر عمود بر محور دستک فشاری در یک انتهاست و از رابطه های ۳۰ و ۳۱ به دست می آید:

$$A_{st} = d_{st} D_s \quad (30)$$

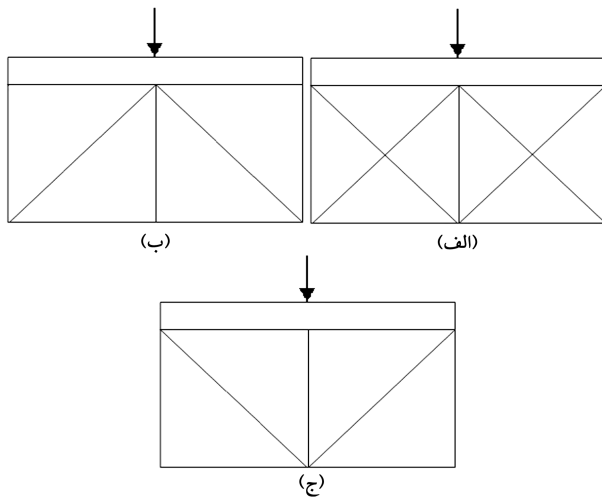
$$d_{st} = D_s \cdot \sin \omega, \quad \omega = \tan^{-1} \left(\frac{a}{l}\right) \quad (31)$$

که در آن ها، D_s قطر گل میخ، d_{st} عرض دستک فشاری، a ارتفاع اتصال های برشی و l طول مؤثر سخت کننده ی قطری است. مقاومت برشی در ناحیه ی B براساس آیین نامه ی ۰۵-ACI ۳۱۸M، [۲۸] از رابطه ی ۳۲ به دست می آید:

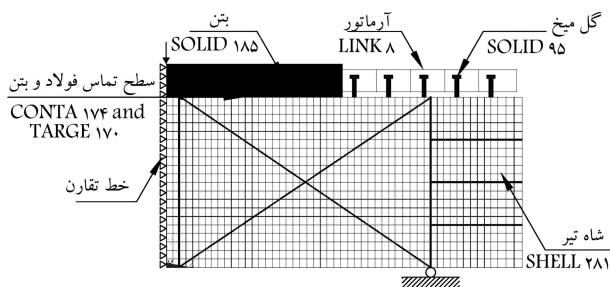
$$V_{C-B} = 0.17 \sqrt{f_{cu}} (B - b_f) d_s \quad (32)$$

که در آن، B عرض تاوه ی بتنی و d_s ضخامت مؤثر تاوه برای برش است. بنابراین ظرفیت برشی کلی تاوه ی بتنی برابر با مجموع مقاومت برشی ناحیه ی B و D است و به صورت رابطه ی ۳۳ نوشته می شود:

$$V_C = V_{C-D} + V_{C-B} \quad (33)$$



شکل ۶. چیدمان‌های مختلف سخت‌کننده‌های قطری در شاه‌تیر مرکب.



شکل ۷. نمونه‌یی از الگو اجزاء محدود شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری.

به‌کار گرفته شده است. اولین مود از تحلیل کماتشی به‌عنوان تغییرشکل اولیه به منظور شبیه‌سازی پاسخ کماتشی ممکن به جان شاه‌تیر اعمال شده است. این روش برای تحلیل اولیه به کار برده می‌شود. در مرحله‌ی دوم، آنالیز غیرخطی اجزاء محدود با وجود تغییرشکل اولیه در جان انجام می‌شود. بنابراین کماتش موضعی و اثرها بعد از کماتش اجزاء فولادی در نتایج آنالیز در نظر گرفته می‌شوند. این روش معمولاً نیازمند سعی و خطای زیادی است و بعد از تحلیل مرحله‌ی اول انجام می‌شود.

۲.۳. نتایج و بحث تحلیل‌های اجزاء محدود

با استفاده از روش تحلیلی پیشنهادی، مقاومت برشی بخش فولادی شاه‌تیر V_s ، مقاومت برشی تاوه‌ی بتنی V_c ، نیروی درونی سخت‌کننده‌ها و در نهایت مقاومت برشی نهایی شاه‌تیر مرکب V_{ult} ، محاسبه و در جدول ۱ فهرست شده‌اند. همچنین در جدول مذکور، V_{ANSYS} مقاومت برشی نهایی شاه‌تیرها را نشان می‌دهد که از الگوسازی اجزاء محدود به دست آمده است. دو ستون انتهایی جدول شامل V_{ult}/V_{ANSYS} و V_{ult}/V_{exp} است، که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نسبت مقاومت برشی نهایی پیش‌بینی شده با روش تحلیلی (V_{ult}) به مقادیر متناظر به‌دست‌آمده از الگوسازی اجزاء محدود (V_{ANSYS}) و آزمایش (V_{exp}) هستند. این تذکر لازم است که مقادیر V_{exp} استفاده شده در جدول مذکور برابر با $1/2$ بارگسیختگی شاه‌تیر در مرجع [۲۲] است. زیرا روش تحلیلی پیشنهادی و الگوسازی اجزاء محدود، مقاومت برشی یک پانل شاه‌تیر را برآورد می‌کنند. همچنین یادآوری می‌شود که V_{exp} مربوط به شاه‌تیرهای بدون سخت‌کننده‌ی قطری است.

مقادیر V_{ult}/V_{ANSYS} نشان می‌دهد که خطای روش تحلیلی پیشنهادی

با رسیدن بتن به ظرفیت برشی خود، شاه‌تیر مرکب دیگر تحمل بار بیشتر را ندارد و بنابراین مقاومت برشی نهایی شاه‌تیر مرکب از مجموع مقاومت برشی قسمت فولادی شاه‌تیر (V_s) و تاوه‌ی بتنی (V_c) به دست می‌آید (رابطه‌ی ۳۴):

$$V_{ult} = V_s + V_c \quad (34)$$

۳. ارزیابی روش پیشنهادی

در ادامه، ارزیابی دقت روش تحلیلی ارائه شده در پیش‌بینی ظرفیت برشی شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌های قطری، با مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روش و الگوهای اجزاء محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده است. برای انجام تحلیل‌های اجزاء محدود غیرخطی از نرم‌افزار ANSYS کمک گرفته شده است. همچنین تأثیر سخت‌کننده‌های قطری در ظرفیت برشی در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از شاه‌تیرهای مرکب بدون سخت‌کننده تشریح شده است. برای این منظور شاه‌تیرهای مرکب بدون سخت‌کننده‌ی قطری که در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ آزمایش شده‌اند، [۲۲] مبنای کار قرار گرفته است. از میان نمونه‌های آزمایش شده، شاه‌تیر مرکب ۱ CPG با جان نازک‌تر نسبت به شاه‌تیر ۲ CPG و شاه‌تیرهای ۳ CPG و ۴ CPG، که میلگرد برشی اضافی در تاوه‌ی بتنی دارند، انتخاب شده‌اند. پس در این مطالعه هر کدام از این شاه‌تیرها مطابق شکل ۶ با سه چیدمان متفاوت توسط سخت‌کننده‌های قطری به ابعاد 10×70 میلی‌متر در دو طرف جان مقاوم شده‌اند. این تذکر لازم است که در مطالعه‌ی حاضر، جزئیات اجرایی، ابعاد و خصوصیات مصالح شاه‌تیرها مطابق آنچه در مرجع [۲۲] است، در نظر گرفته شده و الگوسازی و تحلیل‌های اجزاء محدود غیرخطی براساس آن انجام شده است.

۳.۱. تحلیل اجزاء محدود غیرخطی

برای انجام تحلیل‌های اجزاء محدود غیرخطی شاه‌تیرهای مرکب بتنی - فولادی مطابق شکل ۷، یک الگوی سه بُعدی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، که در دانشگاه ملی مالزی در دسترس بوده است، توسعه داده شده است. بال شاه‌تیر، جان و ورق‌های تقویتی قسمت فولادی با اجزاء پوسته‌یی ۸ گره‌یی SHELL 281 و تاوه‌ی بتنی با اجزاء SOLID 185 الگوسازی شده است. میلگردها و اتصالات برشی نیز به ترتیب با اجزاء رابط LINK 8 و اجزاء ۲۰ گره‌یی SOLID 95 الگوسازی شده است. در لنگر مثبت، زمانی که تاوه‌ی بتنی تحت فشار است، تاوه به طرف بال فولادی یا اتصالات برشی حرکت می‌کند و بنابراین نیروی فشاری بین آنها توسعه داده خواهد شد. تحت لنگر منفی، یعنی زمانی که تاوه در جهت مخالف حرکت می‌کند، فاصله‌یی میان بال و تاوه در امتداد اتصالات برشی به وجود می‌آید. برای الگو کردن این رفتار، اجزاء اتصال سطح به سطح، CONTA 174 و TARGE 170، بر روی سطوح اجزاء SOLID و اجزاء پوسته‌یی قرار داده شده است. با تعریف ضریب مالش، هر کدام از این زوج اتصالات قادر هستند لغزش بین دو سطح را الگوسازی کنند. در این پژوهش ضریب مالش ۰/۴۵ فرض شده است.

رفتار فولاد با الگو کشسان - مومسان کامل الگوسازی و مصالح کشسان به صورت همسان‌گرد فرض شده‌اند. اگر بارگذاری بر روی سازه به صورت درون‌صفحه فرض شود، از نظر نگره کماتشی رخ نخواهد داد، مگر آنکه یک تغییرمکان برون‌صفحه‌یی به‌عنوان نقص و یا تغییرشکل اولیه به سازه وارد شود. برای این منظور از دو مرحله‌ی تحلیلی مجزا برای مطالعه‌ی عددی شاه‌تیرهای مرکب استفاده شده است. مرحله‌ی اول، تحلیل کماتشی مقادیر ویژه و سازه است که برای پیش‌بینی مودهای کماتشی

جدول ۱. ظرفیت برشی شاه تیرهای مرکب برآورد شده با روش تحلیلی و مقایسه‌ی آن با روش الگوسازی اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی.

$\frac{V_{ult}}{V_{exp}}$	$\frac{V_{ult}}{V_{ANSYS}}$	V_{ANSYS}	V_{ult} (Kn)	V_s (Kn)	F_{sc} (Kn)	F_{st} (Kn)	V_c (Kn)	چیدمان سخت‌کننده‌ها	نام شاه تیر
۱٫۱۷	۱٫۰۵	۴۸۰	۵۰۶	۴۰۵	۱۱	۳۵	۱۰۱	شکل ۶الف	CPG۱
۱٫۰۹	۱٫۰۸	۴۳۴	۴۷۰	۳۶۹	۱۱	-	۱۰۱	شکل ۶ب	
۱٫۰۸	۱٫۰۸	۴۳۲	۴۶۵	۳۶۴	-	۳۷	۱۰۱	شکل ۶ج	
۱٫۳۷	۰٫۹۹	۷۸۲	۷۷۳	۶۷۵	۲۳	۲۶	۹۸	شکل ۶الف	CPG۲
۱٫۲۷	۱٫۰۵	۷۱۴	۷۴۷	۶۴۹	۲۳	-	۹۸	شکل ۶ب	
۱٫۲۴	۱٫۰۷	۶۵۴	۷۰۱	۶۰۳	-	۳۵	۹۸	شکل ۶ج	
۱٫۰۸	۱٫۰۴	۵۶۶	۵۸۸	۴۰۵	۱۱	۳۵	۱۸۳	شکل ۶الف	CPG۳
۱٫۰۲	۱٫۰۶	۵۲۱	۵۵۲	۳۶۹	۱۱	-	۱۸۳	شکل ۶ب	
۱٫۰۱	۱٫۰۷	۵۰۹	۵۴۷	۳۶۴	-	۳۷	۱۸۳	شکل ۶ج	
۱٫۲۶	۰٫۹۹	۸۶۱	۸۵۱	۶۷۵	۲۳	۲۶	۱۷۶	شکل ۶الف	CPG۴
۱٫۲۲	۱٫۰۳	۸۰۲	۸۲۵	۶۴۹	۲۳	-	۱۷۶	شکل ۶ب	
۱٫۱۵	۱٫۰۶	۷۳۵	۷۷۹	۶۰۳	-	۳۵	۱۷۶	شکل ۶ج	

فقط باعث افزایش تنش برشی بحرانی τ_{cr} می‌شود و در رفتار پس‌کمانشی چندان مؤثر نخواهد بود. اما سخت‌کننده‌ی فشاری نه فقط باعث افزایش تنش برشی بحرانی می‌شود، بلکه بعد از کمانش جان تنش‌های فشاری را تحمل خواهد کرد. برای مثال افزایش مقاومت برشی در شاه‌تیر CPG۴ با سخت‌کننده‌ی فشاری، کششی و X شکل به ترتیب ۲۲٪، ۱۵٪ و ۲۶٪ است. به دلیل اختلاف کم افزایش مقاومت در سخت‌کننده‌ی فشاری و X شکل و تفاوت نسبتاً زیاد با سخت‌کننده‌ی کششی به نظر می‌رسد اقتصادی‌ترین حالت، استفاده از سخت‌کننده‌ی فشاری باشد.

۴. نتیجه‌گیری

یک روش تحلیلی جدید برای تعیین رفتار گسیختگی و ظرفیت برشی نهایی شاه‌تیرهای مرکب بتنی - فولادی با سخت‌کننده‌ی قطری با چیدمان‌های متفاوت در این پژوهش ارائه شده است. در این روش مودهای گسیختگی ممکن که براساس مشاهدات آزمایشگاهی پژوهشگران دیگر و مطالعات اجزاء محدود است، در نظر گرفته شده است. این روش، ساده است و نیازمند محاسبات پیچیده‌ی ریاضی نیست. روش پیشنهادی بر روی تعدادی از شاه‌تیرهای آزمایش شده توسط پژوهشگران دیگر به کار گرفته شده و نتایج آن با مقادیر به‌دست‌آمده از روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار ANSYS برای ارزیابی تأثیر سخت‌کننده‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به اختلاف کم بین نتایج پیش‌بینی شده از روش پیشنهادی و روش اجزاء محدود (کمتر از ۱۰٪) می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، دقت کافی برای طراحی شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری دارد. از میان شکل‌های متفاوت

نسبت به الگوسازی اجزاء محدود کمتر از ۱۰٪ است، که یک خطای قابل قبول در روش‌های تحلیلی محسوب می‌شود. این خطا شامل تقریب‌های هر دو روش تحلیلی و الگوسازی اجزاء محدود است و بنابراین رسیدن به جواب کاملاً دقیق غیرممکن است و فقط می‌توان مقدار خطا را کاهش داد.

در جدول ۱، نسبت V_{ult}/V_{exp} نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت برشی شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری نسبت به شاه‌تیرهای بدون سخت‌کننده است. به نظر می‌رسد تفاوت نسبت افزایش مقاومت برشی در شاه‌تیرهای مختلف با سخت‌کننده‌ی قطری مشابه، ناشی از تفاوت در ضخامت جان شاه‌تیر و وجود میلگردهای برشی در ناوه‌ی بتنی است. برای مثال افزایش مقاومت در شاه‌تیر CPG۱ با سخت‌کننده‌ی قطری X شکل، ۱۷٪ و برای شاه‌تیر CPG۲ با سخت‌کننده‌ی مشابه که ضخامت جان بیشتری دارد، ۳۷٪ است. افزایش مقاومت در شاه‌تیرهای CPG۳ و CPG۴ که با میلگرد برشی در ناوه تقویت شده‌اند، به ترتیب ۸٪ و ۲۶٪ است. دلیل دیگر اختلاف V_{ult}/V_{exp} در شاه‌تیرها، چیدمان‌های متفاوت سخت‌کننده‌هاست. مطابق جدول ۱، مقاومت برشی نهایی تمام شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری کششی، مطابق شکل ۶ج، کمتر از شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی فشاری، مطابق شکل ۶ب است. همان‌گونه که پیشتر بحث شده است، بعد از کمانش جان، هیچ تنش فشاری نمی‌تواند توسط جان تحمل شود. اما با تشکیل میدان کششی و ایجاد رفتار پس‌کمانشی، جان می‌تواند تا لحظه‌ی گسیختگی تنش کششی را تحمل کند. بنابراین سخت‌کننده‌ی قطری فشاری که تقریباً در راستای عمود بر میدان کششی است، می‌تواند تنش فشاری را تحمل کند، اما سخت‌کننده‌ی قطری کششی، که تقریباً موازی با میدان کششی است، در تحمل تنش کششی تأثیر چندانی ندارد، چرا که خود جان به تنهایی قادر به انجام این کار خواهد بود. سخت‌کننده‌ی قطری کششی

سخت‌کننده‌های قطری، سخت‌کننده‌ی قطری فشاری کارآمدترین نوع سخت‌کننده به دلیل مؤثر بودن در قبل و بعد از کمانش جان شناخته شده است. به طوری که در شاه‌تیرهای مرکب مشابه با سخت‌کننده‌های قطری فشاری، کششی و X شکل افزایش مقاومت نسبت به شاه‌تیر بدون سخت‌کننده به ترتیب ۲۲٪، ۱۵٪ و ۲۶٪ برآورد شده است.

فهرست علائم

- A_{rb} : سطح مقطع میلگرد طولی در پایین تاوهی بتنی؛
 A_{rt} : سطح مقطع میلگرد طولی در بالای تاوهی بتنی؛
 A_s : سطح مقطع سخت‌کننده‌ی قطری؛
 a : ارتفاع اتصالات برشی؛
 B : عرض تاوهی بتنی؛
 b : عرض پانل جان؛
 b_f : عرض بال شاه‌تیر؛
 b_s : عرض سخت‌کننده‌ی قطری؛
 C_c : فاصله‌ی طولی مفاصل مومسان در بال فشاری؛
 C_t : فاصله‌ی طولی مفاصل مومسان در بال کششی؛
 D_s : قطر سرگل‌میخ یا همان اتصالات برشی؛
 d : عمق پانل جان؛
 d_{rb} : فاصله از تار خنثی مومسان تا میلگرد بالای تاوهی بتنی؛
 d_{rt} : فاصله از تار خنثی مومسان تا میلگرد پایین تاوهی بتنی؛
 d_s : عمق مؤثر تاوه در برش؛
 E : مدول کشسانی؛
 f_{ce} : مقاومت فشاری مؤثر عضو فشاری بتنی؛
 f_{cu} : مقاومت فشاری استوانه‌یی بتن؛
 l : طول مؤثر سخت‌کننده‌ی قطری؛
 M_p : لنگر مومسان مقاوم بال فولادی در کشش؛
 M_{pn} : لنگر مومسان مقاوم بال مرکب؛

- P_{rb} : نیروی مومسان در لایه‌ی پایین میلگردهای تاوهی بتنی؛
 P_{rt} : نیروی مومسان در لایه‌ی بالای میلگردهای تاوهی بتنی؛
 t : ضخامت جان؛
 t_c : عمق تاوهی بتنی؛
 t_f : ضخامت بال فولادی؛
 t_s : ضخامت سخت‌کننده‌ی قطری؛
 V_c : مقاومت برشی تاوهی بتنی؛
 V_s : مقاومت برشی شاه‌تیر فولادی با سخت‌کننده‌ی قطری؛
 V'_s : مقاومت برشی شاه‌تیر فولادی با سخت‌کننده‌ی عرضی؛
 V_{cr} : برش بحرانی؛
 V_{exp} : برش نهایی آزمایشگاهی؛
 V_{ult} : مقاومت برشی نهایی شاه‌تیر مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری؛
 θ : زاویه‌ی مورب تنش غشایی کششی؛
 θ_d : زاویه‌ی مورب قطری پانل برشی؛
 k : ضریب کمانش برشی؛
 ν : ضریب پواسون؛
 σ_{crs} : تنش کمانشی سخت‌کننده‌ی قطری؛
 σ_{st} : تنش محوری فشاری در سخت‌کننده‌ی قطری؛
 σ_t : تنش غشایی وارده بر میدان کششی؛
 σ_t^y : تنش غشایی تسلیم بر میدان کششی؛
 σ_{yt} : تنش تسلیم میلگردهای طولی؛
 σ_{yw} : تنش تسلیم جان؛
 τ : تنش برشی در جان؛
 τ_{cr} : تنش بحرانی کشسان در جان.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از زحمات ارزشمند آقای دکتر امیر راحمی در انجام برخی از مراحل پژوهش کمال تشکر را دارند. همچنین از همکاری مسئولان سایت کامپیوتری دانشگاه ملی مالزی که تحلیل‌های ANSYS در آنجا انجام شده است، سپاس فراوان دارند.

منابع (References)

- Wilson, J.M. "On specifications for strength of iron bridges", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **15**(1), pp. 389-414 (1886).
- Wagner, H. "Flat sheet metal, girder with very thin metal web", National Advisory Committee for Aeronautics (1931).
- Basler, K. "Strength of plate girders in shear", *Journal Structural Division*, **87**(10), pp. 151-180 (1961).
- Basler, K. "Strength of plate girders in shear", *Trans. ASCE*, **128**(2), p. 683 (1963a).
- Basler, K. "Strength of plate girders under combined bending and shear", *Trans. ASCE*, **128**(2), p. 720 (1963b).
- Basler, K. and Thürlimann, B. "Carrying capacity of plate girders", *IABSE 6th Congr., Prelim. Publ.*, **16**, pp.491-496 (1960a).
- Basler, K. and Thürlimann, B. "Buckling tests on plate girders", *IABSE 6th Congr., Prelim. Publ.*, **17**, pp.907-920 (1960b).
- Basler, K. and Thürlimann, B., *Strength of Plate Girders in Bending*, Fritz-Engineering Laboratory, Lehigh University, Rept. No. 251-19 (1960).

9. Basler, K., Yen, B.T., Mueller, J.A. and Thürlimann, B., *Web Buckling Tests on Welded Plate Girders*, Fritz Engineering Laboratory, Lehigh University, Rept. No. 251-11 (1960).
10. Cooper, P.B., Lew, H.S. and Yen, B.T. "Welded constructional alloy plate girders", *Journal Structural Division, ASCE*, **90**(2), pp. 1-36 (1964).
11. Chern, C. and Ostapenko, A., *Ultimate Strength of Plate Girders Under Shear*, Fritz Engineering Laboratory, Lehigh University, Rept. No. 328.7 (1969).
12. Rockey, K.C. and Skaloud, M. "The ultimate load behavior of plate girders loaded in shear", *The Structural Engineer*, **50**(1), pp. 29-48 (1972).
13. Porter, D.M., Rockey, K.C. and Evans, H.R. "The collapse behaviour of plate girders loaded in shear", *The Structural Engineer*, **53**(8), pp. 313-325 (1975).
14. Lee, S.C. and Yoo, C.H. "Experimental study on ultimate shear strength of web panels", *Journal of Structural Engineering*, **125**(8), pp. 838-846 (1999).
15. White, D.W. and Barker, M.G. "Shear resistance of transversely stiffened steel I-girders", *Journal of Structural Engineering*, **134**(9), pp. 1425-1436 (2008).
16. Yonezawa, H., Miakami, I., Dogaki, M. and Uno, H. "Shear strength of plate girders with diagonally stiffened webs", *Trans., Japan Society of Civil Engineers*, **10**, pp.17-28 (1978).
17. Alinia, M.M., Shakiba, M. and Habashi, H.R. "Shear failure characteristics of steel plate girders", *Thin-Walled Structures*, **47**(12), pp. 1498-1506 (2009).
18. Moon, J., Yi, J., Choi, B.H. and Lee, H.E. "Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(5), pp. 1198-1205 (2009).
19. Porter, D.M. and Cherif, Z.E.A. "Ultimate shear strength of thin webbed steel and concrete composite girders", Elsevier Applied Science Publishers, pp. 55-64 (1987).
20. Roberts, T.M. and Al-Amery, R.I.M. "Shear strength of composite plate girders with web cutouts", *Journal of Structural Engineering*, **117**(7), pp. 1897-1910 (1991).
21. Narayanan, R., Al-Amery, R.I.M. and Roberts, T.M. "Shear strength of composite plate girders with rectangular web cut-outs", *Journal of Constructional Steel Research*, **12**(2), pp. 151-166 (1989).
22. Baskar, K. and Shanmugam, N.E. "Steel-concrete composite plate girders subject to combined shear and bending", *Journal of Constructional Steel Research*, **59**(4), pp. 531-557 (2003).
23. Queiroz, F.D., Vellasco, P.C.G.S. and Nethercot, D.A. "Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection", *Journal of Constructional Steel Research*, **63**(4), pp. 505-521 (2007).
24. Darehshouri, S., Shanmugam, N.E. and Osman, S. "Collapse behavior of composite plate girders loaded in shear", *Journal of Structural Engineering*, **138**(3), pp. 318-326 (2012).
25. Timoshenko, S. and Gere, J.M., *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, U.S.A (1965).
26. AISI 360-05, *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, U.S.A. (2005).
27. Nateghi, F. and Alavi, E. "Non-linear behavior and shear strength of diagonally stiffened steel plate shear walls", *International Journal of Engineering, IJE*, **22**(4), pp.343-356 (2009).
28. American Concrete Institute (ACI), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318M-05, Detroit (2005).
29. ANSYS, *User's Manual*, Version 11, Ansys (2009).