

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

Original Article

ایوب دهقانی* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

علی اکبر حیات داودی (کارشناس ارشد)

دانشگاه ملی مالزی

فریبرز ناطقی الهی (استاد)

بزهنگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

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

برای مقاومت تسلیم یا نهایی دیگر اجزاء سازه‌ی باشد. در پژوهشی در سال ۱۸۸۶، علت و چگونگی مقاومت پس‌کمانشی جان شاه‌تیرهای با سخت‌کننده تحت نیروی برشی تشریح و با استفاده از یک الگوی کاغذی با جان بسیار نازک و انعطاف‌پذیر نشان داده شد که وقتی سخت‌کننده‌ها به‌صورت مناسبی در جان شاه‌تیر قرار گرفته باشند، جان پس از کمانش در برابر نیروهای فشاری مقاومتی ندارد و فقط در کشش عمل می‌کند و سخت‌کننده‌ها وظیفه‌ی تحمل نیروهای فشاری را بر عهده می‌گیرند.^[۱] پس از آن در پژوهش دیگری در سال ۱۹۳۱، کشش قطری جان شرح داده شده است.^[۲] سپس در مطالعه‌ی دیگری برای اولین بار (۱۹۶۱)، روش بار نهایی برای پیش‌بینی نیروی گسیختگی شاه‌تیر فلزی با فرض آنکه بال‌ها انعطاف‌پذیر باشد و نتوانند در برابر نیروی اعمال‌شده از سوی میدان کششی مورب جان مقاومت کنند، ارائه شد.^[۳] مطالعه‌ی رفتار پس‌کمانشی جان شاه‌تیر در برش با برخی مطالعات و روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی گسترده‌ی ادامه یافت و پس از آن اصلاحاتی در روش‌های مذکور صورت پذیرفت تا همبستگی بیشتری میان مطالعات نگره و آزمایشگاهی به وجود آید.^[۴-۹] در ادامه، کاربرد نگره‌ی مقاومت برشی شاه‌تیرهای فلزی با انجام مطالعات آزمایشگاهی (۱۹۶۴) ارزیابی شده است.^[۱۰] نسخه‌ی

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

نشان می‌دهد که مقاومت برشی این‌گونه اعضا با اتصالات برشی کافی، به‌طور قابل توجهی بیشتر از فقط شاه‌تیر فولادی است. همچنین رفتار شاه‌تیرهای مرکب با اتصالات برشی کم و زیاد، که به ترتیب منجر به عملکرد مرکب محدود و کامل می‌شود، تحت بارگذاری متمرکز و یکنواخت در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ با انجام تحلیل‌های اجزاء محدود غیرخطی مطالعه شده است.^[۲۳] به تازگی برخی پژوهشگران (۲۰۱۲) با انجام یک مطالعه‌ی نگره روی شاه‌تیرهای مرکب با تکیه‌گاه ساده تحت برش خالص و با در نظر گرفتن رفتار مرکب، یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت برشی نهایی این‌گونه اعضا ارائه کرده‌اند.^[۲۴] در این مطالعه، عملکرد میدان کششی در جان شاه‌تیر و گسیختگی برشی تاوه‌ی بتنی در نظر گرفته شده و روش پیشنهادی بر مبنای الگوی کاردیف (۱۹۷۵)،^[۱۳] رابطه‌سازی شده است. مطالعات نویسندگان این نوشتار نشان داده است که رابطه‌هایی برای برآورد ظرفیت برشی شاه‌تیر مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری ارائه نشده است. بنابراین تلاش شده است تا معادلات حاکم بر رفتار برشی شاه‌تیرهای مرکب، که با سخت‌کننده‌های قطری مقاوم شده‌اند، از مرحله‌ی کشسان تا مرحله‌ی گسیختگی توسعه داده شود. برای این منظور، رابطه‌سازی مقاومت برشی قسمت فولادی و بتنی با در نظر گرفتن تأثیر سخت‌کننده‌های قطری بر مبنای روش کار مجازی به صورت مجزا تشریح شده است. سپس با استفاده از تحلیل‌های سه بعدی اجزاء محدود غیرخطی، دقت رابطه‌های ارائه‌شده سنجیده شده است. الگوسازی‌های اجزاء محدود بر مبنای شاه‌تیرهای مرکب صورت گرفته است، که رفتار آنها توسط پژوهشگران دیگری به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شده است. همچنین در پایان، تأثیر چیدمان سخت‌کننده‌های قطری در مقدار ظرفیت برشی مطالعه شده است.

۲. مطالعه‌ی تحلیلی و پیشنهاد روشی برای محاسبه‌ی

ظرفیت برشی

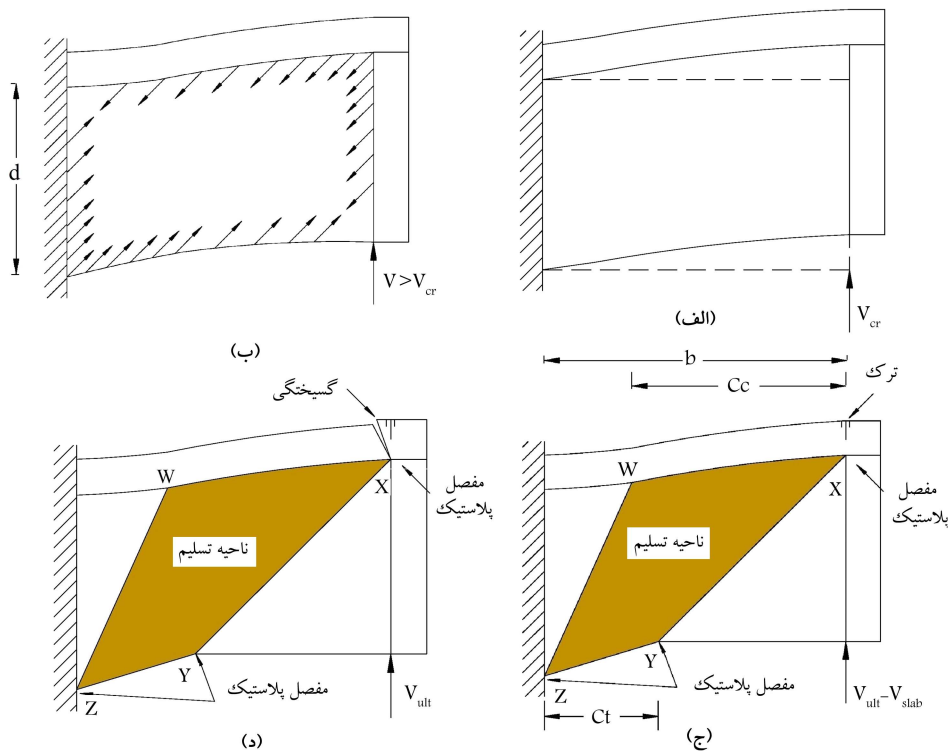
۱.۲. رفتار شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی قطری تحت بار برشی
بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی و مطالعات اجزاء محدود،^[۲۳] رفتار شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی عرضی تحت بار برشی را می‌توان مطابق شکل ۱ به صورت ۴ سازوکار باربری تقسیم‌بندی کرد. در دو مرحله‌ی اول تنش‌های اصلی کششی و فشاری در ورق جان توسعه می‌یابند و یک سازوکار جدید باربری در شاه‌تیر به وجود می‌آید، به طوری که بار برشی اضافه‌ی توسط یک میدان تنش غشایی کششی تحمل می‌شود. بعد از رسیدن جان به مقاومت تسلیم، گسیختگی نهایی با تشکیل مفاصل مومسان در بال‌ها و گسترش ترک‌خوردگی شدید در تاوه‌ی بتنی به وجود می‌آید. این وضعیت در شکل ۱ ج و د نشان داده شده است. در شاه‌تیرهای مذکور به دلیل عملکرد مرکب، بخشی از میدان کششی قطری توسط تاوه‌ی بتنی مهار شده و بنابراین بار فشاری عملکرد قوی‌تری نسبت به بال کششی خواهد داشت. چنین عملکردی سبب می‌شود که در حالت گسیختگی فاصله‌ی 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 تاوه‌ی بتنی، ظرفیت باربری شاه‌تیرهای مرکب را نسبت به فقط شاه‌تیر فلزی افزایش می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت که رفتار شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌های قطری تقریباً مشابه با شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌های عرضی است.^[۱۶] بنابراین در مطالعه حاضر مقاومت برشی نهایی (V_{ult}) شاه‌تیر مرکب با سخت‌کننده‌های قطری مانند آنچه برای شاه‌تیر مرکب با سخت‌کننده‌های عرضی

جدیدتر سازوکار خرابی باسلر،^[۳] با در نظر گرفتن تغییرات تنش غشایی در سرتاسر جان شاه‌تیر 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 شاه‌تیر فولادی تحت بار برشی را می‌توان با یک عملکرد دو بخشی بیان کرد.^[۱۱] در مطالعه‌ی مذکور فرض شده است که یک میدان غشایی کششی بتواند در امتداد کشش قطری توسعه یابد و برای محاسبه‌ی 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 تنش‌های خمشی در تنش‌های کم‌انرژی برشی جان صرف‌نظر شود و تغییرات σ_t^y در پانل‌های جان قابل چشم‌پوشی باشد و اتصال لبه‌های پانل با تکیه‌گاه ساده الگوسازی شود، یک رابطه‌ی مهم برای محاسبه‌ی ظرفیت برشی نهایی شاه‌تیر فولادی ارائه کردند.^[۱۳]

رفتار شاه‌تیرهای با جان سخت‌شده با سخت‌کننده‌های عرضی در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۹،^[۱۴] تحت بارگذاری برشی خالص مطالعه شده است. ارزیابی روش‌های مختلف تعیین مقاومت برشی شاه‌تیرهای فلزی با سخت‌کننده‌ی عرضی نیز در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۸) انجام پذیرفت و نشان داده شد که روش بار نهایی باسلر،^[۳] بهترین روشی است که دو پارامتر سادگی و دقت را به صورت هم‌زمان شامل می‌شود.^[۱۵] ظرفیت برشی و رفتار شاه‌تیرهای فولادی با سخت‌کننده‌ی عمودی، که جان بین آنها با سخت‌کننده‌های قطری مقاوم شده بود، نیز در مطالعه‌ی دیگری در سال ۱۹۷۸ ارزیابی شد و نتیجه‌ی بررسی‌های نگره و آزمایشگاهی آنها بیانگر عملکرد مناسب سخت‌کننده‌های قطری در مقاوم‌کردن جان بوده و نشان داده شد که این‌گونه سخت‌کننده‌ها، اجازه‌ی توسعه‌ی میدان کششی را می‌دهند، با وجود آنکه جان شاه‌تیر با سخت‌کننده‌های زیادی تقویت شده است.^[۱۶] این زمینه‌ی مطالعاتی در سال‌های اخیر نیز ادامه یافته است. مثلاً در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ تلاش شده است تا با تحلیل‌های عددی شاه‌تیرهای فولادی علت، چگونگی، و زمان تشکیل مفاصل مومسان شرح داده شود.^[۱۷] در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۹، ظرفیت برشی و طراحی شاه‌تیرهای فولادی با ورق موج‌دار در جان به منظور دستیابی به طرحی اقتصادی ارائه شده است.^[۱۸]

با وجود بررسی‌های گسترده‌ی نگره و آزمایشگاهی روی شاه‌تیرهای فولادی، فقط تعداد محدودی مطالعه بر روی شاه‌تیرهای مرکب فولادی - بتنی صورت گرفته است. در این‌گونه اعضا که از یک تاوه‌ی بتنی و یک شاه‌تیر فولادی تشکیل شده‌اند، برای دستیابی به عملکرد مرکب از اتصالات برشی استفاده می‌شود که به بال فوقانی شاه‌تیر جوش می‌شوند. چنین رفتار مرکبی، سبب تغییرات قابل ملاحظه‌ی در عملکرد میدان کششی غشایی در جان شاه‌تیر می‌شود، به طوری که در بار نهایی فاصله‌ی میان مفاصل مومسان در بال فوقانی متصل به تاوه‌ی بتنی از فاصله‌ی مفاصل مومسان در بال دیگر بیشتر می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که رفتار شاه‌تیر مرکب از وضعیت کشسان تا حالت نهایی نسبت به شاه‌تیر فلزی تغییر می‌کند و عملکرد مرکب سبب افزایش قابل توجهی در مقاومت و سختی شاه‌تیر می‌شود، که میزان آن وابسته به اتصالات برشی است. نتایج مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته است، برای درک رفتار کشسان و غیرکشسان این‌گونه شاه‌تیرها کافی نیست. برخی پژوهشگران نیز با مطالعه‌ی آزمایشگاهی (۱۹۸۷) رفتار شاه‌تیرهای مرکب با تکیه‌گاه ساده تحت بار برشی، رابطه‌ی برای پیش‌بینی ظرفیت برشی عمودی، شامل مقاومت تاوه‌ی بتنی و مقاومت شاه‌تیر فولادی ارائه کرده‌اند.^[۱۹] همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۹۱، بدون در نظر گرفتن تأثیر مرکب بودن شاه‌تیر، مقاومت برشی این اعضا رابطه‌سازی شده و رابطه‌هایی برای طراحی پیشنهاد شده است.^[۲۰] آزمایش‌های شاه‌تیرهای مرکب دهانه‌کوتاه که در پژوهش‌هایی در سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۳ انجام شده است،^[۲۱]



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

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.

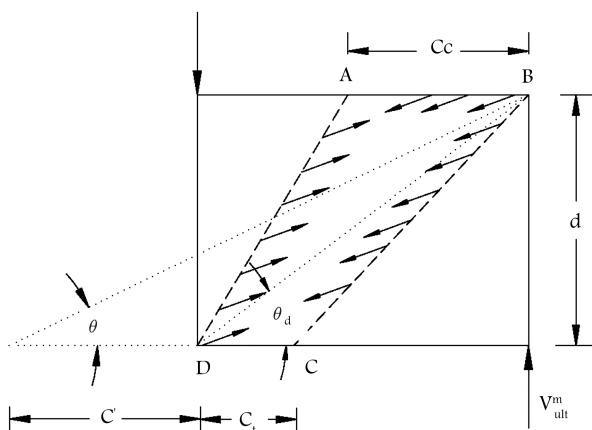
۲.۲. مقاومت برشی قسمت فولادی شاه تیر (V_s)

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]

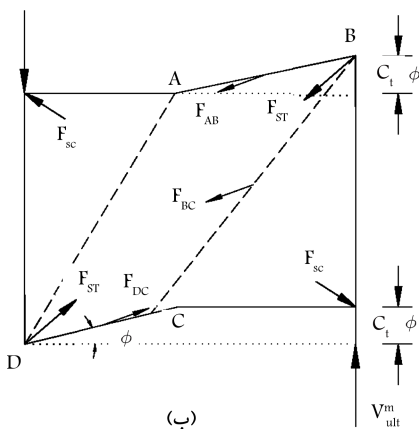
$$V_s' = (C_c + C_t) \sigma_t^y t \sin^2 \theta + \sigma_t^y t d (\cot \theta - \cot \theta_d) \sin^2 \theta + \tau_{cr} t d \quad (1)$$

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



(الف)



(ب)

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

باید تسلیم شود، تا سازوکار مومسان تشکیل شود. مانند آنچه در شکل ۲ ب نشان داده شده است، بار نهایی را می توان با وارد کردن یک تغییر مکان مجازی به شاه تیر در حالت گسیختگی به دست آورد. همچنین مطابق شکل ۲ الف به جای در نظر گرفتن منطقه ی تسلیم ABCD در جان شاه تیر، نیروهای عکس العمل در مجاورت بال و جان جایگزین تنش غشایی کششی می شود. اکنون اگر فرض شود چرخشی به مقدار ϕ در مفصل مومسان D رخ دهد، تغییر مکانی برابر با $C_t \phi$ در نقاط B و C به وجود می آید. چرخش متناظر در مفصل A برابر با $C_t \phi / C_c$ خواهد بود. بنابراین نشان داده می شود که تنش های غشایی وجوه BC، AB، CD و همچنین نیروهای F_{sc} و F_{st} حاصل از سخت کننده های قطری در نقاط B و E با اعمال تغییر مکان مجازی کار انجام می دهند و تنش های اعمالی به وجه ساکن AD در تغییر مکان مجازی دخالتی ندارد. همان طور که در شکل ۲ ب نشان داده شده است، نیروهای حاصل از تنش غشایی عبارت اند از: F_{AB} ، F_{BC} ، F_{DC} که می توان آنها را به صورت رابطه ی 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 سخت کننده های قطری باشند، نیروهای F_{sc} و F_{st} به عنوان نیروهای موجود در سخت کننده های قطری به صورت روابط ۶ و ۷ نوشته می شوند:

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

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

که در آن ها، A_s سطح مقطع سخت کننده های کششی یا فشاری فرض شده است. همچنین تنش کششی قطری σ_{st} و تنش فشاری قطری σ_{sc} بر مبنای نگره ی پایداری ارتجاعی^[۱۵] می توانند 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 کمانشی سخت کننده های قطری است و مقدار آن مطابق مطالعات یونزاوا و همکاران^[۱۶] از روابط ۱۰ الی ۱۲ به دست می آید:

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

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

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

به طوری که در آن ها، λ و K_s از روابط ۱۳ و ۱۴ به دست می آیند:

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

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

و از تأثیر تنش های خمشی در صورت وجود، صرف نظر می شود. زمانی که یک شاه تیر با جان کاملاً مسطح تحت بار برشی قرار می گیرد، تنش برشی یکنواختی قبل از کمانش در سرتاسر پانل به وجود می آید. بنابراین تا این مرحله تنش های کششی و فشاری اصلی با بزرگی τ به ترتیب در زاویه های ۴۵ و ۱۳۵ درجه نسبت به بال به وجود می آید. این سیستم تنش تا رسیدن تنش برشی τ به مقدار بحرانی τ_{cr} ، که در آن پانل دچار کمانش می شود، وجود دارد. مقدار این تنش برشی بحرانی کسسان τ_{cr} با استفاده از نگره ی پایداری کلاسیک سازه ها^[۱۵] قابل محاسبه است. با این فرض محافظه کارانه که اتصال لبه های پانل برشی به سخت کننده ها به صورت تکیه گاه ساده باشد، تنش برشی بحرانی کسسان τ_{cr} به صورت رابطه ی ۲ به دست می آید:

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

که در آن، E مدول کسسانی، ν ضریب پواسون، σ_{yw} تنش تسلیم جان، τ_y تنش تسلیم برشی، و K ضریب کمانش کسسان شاه تیر با سخت کننده ی قطری تحت تنش برشی است. بنابراین نیروی برشی که سبب کمانش ورق جان می شود، به صورت $V_{cr} = \tau_{cr} dt$ تعیین می شود.

با توجه به مطالعات یونزاوا و همکاران^[۱۶] ضریب کمانشی کسسان که تابعی از نسبت ابعاد پانل جان است، برای سخت کننده های فشاری و X شکل به صورت رابطه ی ۳ الف:

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

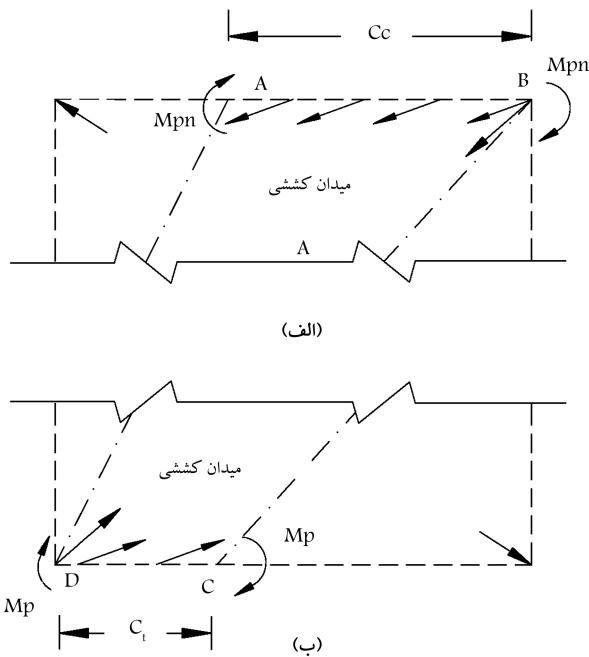
و برای سخت کننده ی کششی به صورت رابطه ی ۳ ب:

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

تعریف می شود. 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 کمانش می کند و پانل ظرفیتی برای تحمل افزایش تنش فشاری نخواهد داشت. کمانش جان سبب تغییر سازوکار تحمل بار می شود. بارهای اضافه شده پس از بار کمانشی توسط یک میدان کششی غشایی که مطابق شکل ۲ از بال بالا تا بال پایین و از دو طرف تا سخت کننده های عرضی توسعه می یابد، تحمل می شود. این مرحله، عملکرد برشی میدان کششی نامیده می شود. مقدار این تنش غشایی کششی σ_t و زاویه ی آن باید تعیین شود، تا بتوان در این مرحله حالت کلی تنش در جان تیر را براساس تنش غشایی پس کمانشی و تنش های رخ داده ی ناشی از τ_{cr} به دست آورد. با افزایش بارگذاری، تنش غشایی افزایش می یابد تا آنکه همراه با تنش کمانشی τ_{cr} ، سبب تسلیم جان شوند. این مقدار تنش غشایی با σ_t^y نشان داده می شود و از رابطه ی ۴ به دست می آید^[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 توسعه ی میدان تسلیم در جان و شکل گیری مفاصل مومسان در بال ها، سازوکار مومسان تشکیل و سبب گسیختگی پانل جان می شود. میدان کششی در جان، که از بال فشاری تا بال کششی ادامه دارد، به علت اتصال بال فشاری با تاوه ی بتنی ظرفیت باربری بیشتری را به وجود می آورد. با توجه به آنکه تنش برشی یکنواختی در ورق جان وجود دارد، می توان گفت تنش غشایی σ_t^y ، که سبب تسلیم جان شده است، مقدار ثابتی در سرتاسر ناحیه ی تسلیم دارد. این تذکر لازم است که اگرچه تسلیم می تواند به خارج از ناحیه ی ABCD نیز گسترش یابد، اما دست کم 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:

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

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

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

که فرم ساده‌شده‌ی آن به صورت رابطه‌ی ۲۱ نوشته می‌شود:

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

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

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

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

M_p نیز لنگر مومسان بال کششی است، که از رابطه‌ی $M_p = \sigma_{yf} . b . t_f^2 / 4$ به دست می‌آید. 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:

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

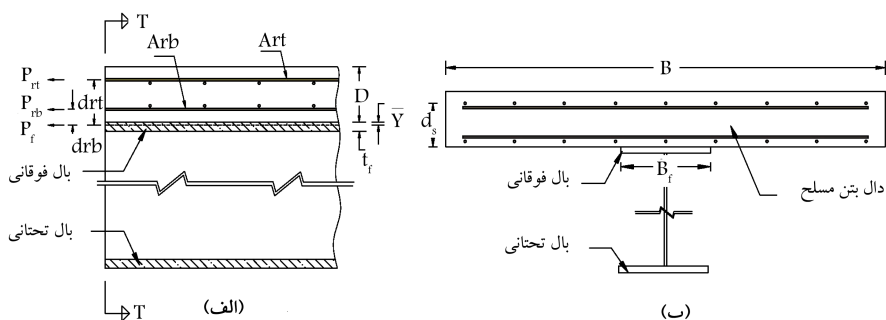
که در آن، M_p لنگر مومسان در بال کششی و M_{pn} لنگر مومسان در بال فشاری است. با قراردادن F_{BC} ، F_{AB} ، F_{DC} از معادله‌ی ۵، F_{st} و F_{sc} به ترتیب از معادله‌ی ۶ و ۷ و همچنین تقسیم‌کردن دو طرف معادله‌ی ۱۶ بر $C_t \phi$ ، بار برشی نهایی حمل‌شده توسط میدان غشایی از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

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

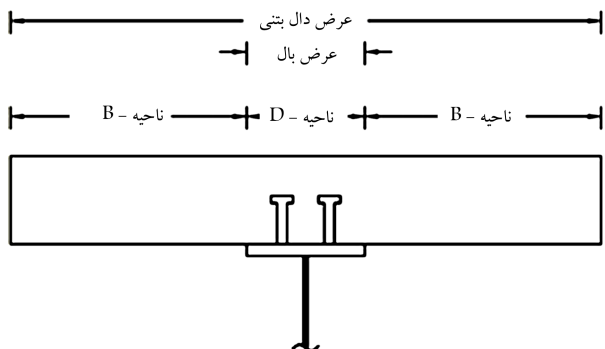
برای استفاده از معادله‌ی ۱۷ در محاسبه‌ی بار نهایی باید مقادیر C_c و C_t که نشان‌دهنده‌ی موقعیت مفاصل مومسان در بال‌ها هستند، مشخص شود. مطابق شکل ۳، این پارامترها براساس تعادل بال‌ها و دیاگرام آزاد بخش‌های AB و CD به صورتی که در ادامه شرح داده شده است، تعیین می‌شود. یادآوری می‌شود که مفاصل مومسان داخلی 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:

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

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]



شکل ۵. ناحیه‌ی B و D در امتداد عرض تاوهی بتنی. [۱۷]

گل میخ متوالی تشکیل می‌شود، [۲۸] که مقاومت حاصل از آن مطابق رابطه‌های ۲۸ و ۲۹ محاسبه می‌شود:

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

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

که در آن، $\beta_s = 1$ برای دستک فشاری با مقطع یکنواخت، $\beta_s = 0.75$ برای دستک فشاری بطری‌شکل با میلگرد عرضی کافی، $\beta_s = 0.6$ برای دستک فشاری بطری‌شکل بدون میلگرد عرضی کافی، f_{cu} مقاومت فشاری استوانه‌یی بتن و A_{st} سطح مقطع کوچک‌تر عمود بر محور دستک فشاری در یک انتهایست و از رابطه‌های ۳۰ و ۳۱ به‌دست می‌آید:

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

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

که در آن‌ها، D_s قطرگل‌میخ، d_{st} عرض دستک فشاری، a ارتفاع اتصال‌های برشی و l طول مؤثر سخت‌کننده‌ی فطری است. مقاومت برشی در ناحیه‌ی B براساس آیین‌نامه‌ی ۳۱۸M-۰۵ [۲۸] از رابطه‌ی ۳۲ به‌دست می‌آید:

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

که در آن، B عرض تاوهی بتنی و d_s ضخامت مؤثر تاوه برای برش است. بنابراین ظرفیت برشی کلی تاوهی بتنی برابر با مجموع مقاومت برشی ناحیه‌ی B و D است و به‌صورت رابطه‌ی ۳۳ نوشته می‌شود:

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

به‌صورت یک بال فشاری مرکب عمل خواهد کرد. مطابق شکل ۴ و براساس مطالعات گذشته، [۲۳] M_{pn} را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۲۴ نوشت:

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

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

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

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

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

بنابراین در پایان مقاومت برشی پیش‌بینی قسمت فولادی شاه‌تیر از جمع‌کردن نیروی تحمل شده توسط میدان غشایی V_{ult}^m با نیروی برشی لازم برای به‌کمانش رساندن جان $(V_{cr} = \tau_{cr} t d)$ به‌صورت رابطه‌ی ۲۶ به‌دست می‌آید:

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

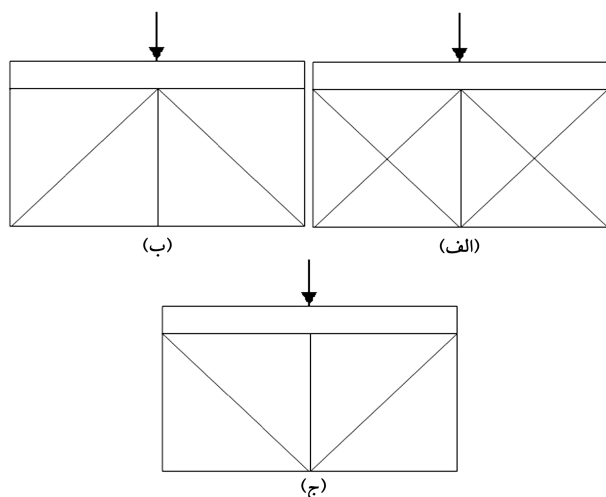
۳.۲. مقاومت برشی تاوهی بتنی V_c و مقاومت برشی نهایی شاه‌تیر کامپوزیتی

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

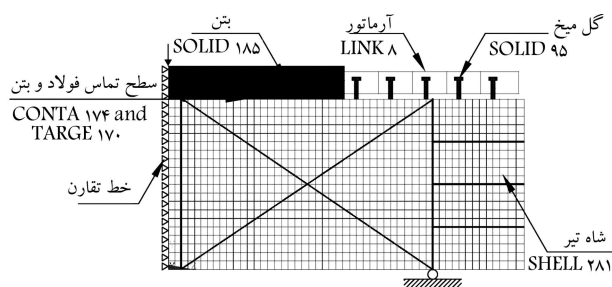
ظرفیت برشی ناحیه‌ی D را می‌توان براساس آیین‌نامه‌ی ۳۱۸M-۰۵ [۲۸] از رابطه‌ی ۲۷ به‌دست آورد:

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

که در آن، N_{st} تعداد گل‌میخ در هر ردیف است. گل‌میخ‌ها به عنوان اتصالات برشی بر بال فوقانی شاه‌تیر جوش و در تاوهی بتنی مهار می‌شوند. در چنین شرایطی نشان داده شده است که مطابق شکل ۵، یک دستک فشاری در فاصله‌ی میان دو



شکل ۶. چیدمان‌های مختلف سخت‌کننده‌های قطری در شاه‌تیر مرکب.



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

به‌کارگرفته 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 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 ۶ الف	CPG ۱
۱٫۰۹	۱٫۰۸	۴۳۴	۴۷۰	۳۶۹	۱۱	-	۱۰۱	شکل ۶ ب	
۱٫۰۸	۱٫۰۸	۴۳۲	۴۶۵	۳۶۴	-	۳۷	۱۰۱	شکل ۶ ج	
۱٫۳۷	۰٫۹۹	۷۸۲	۷۷۳	۶۷۵	۲۳	۲۶	۹۸	شکل ۶ الف	CPG ۲
۱٫۲۷	۱٫۰۵	۷۱۴	۷۴۷	۶۴۹	۲۳	-	۹۸	شکل ۶ ب	
۱٫۲۴	۱٫۰۷	۶۵۴	۷۰۱	۶۰۳	-	۳۵	۹۸	شکل ۶ ج	
۱٫۰۸	۱٫۰۴	۵۶۶	۵۸۸	۴۰۵	۱۱	۳۵	۱۸۳	شکل ۶ الف	CPG ۳
۱٫۰۲	۱٫۰۶	۵۲۱	۵۵۲	۳۶۹	۱۱	-	۱۸۳	شکل ۶ ب	
۱٫۰۱	۱٫۰۷	۵۰۹	۵۴۷	۳۶۴	-	۳۷	۱۸۳	شکل ۶ ج	
۱٫۲۶	۰٫۹۹	۸۶۱	۸۵۱	۶۷۵	۲۳	۲۶	۱۷۶	شکل ۶ الف	CPG ۴
۱٫۲۲	۱٫۰۳	۸۰۲	۸۲۵	۶۴۹	۲۳	-	۱۷۶	شکل ۶ ب	
۱٫۱۵	۱٫۰۶	۷۳۵	۷۷۹	۶۰۳	-	۳۵	۱۷۶	شکل ۶ ج	

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 CPG ۴ 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 CPG ۱ با سخت‌کننده‌ی قطری X شکل، ۱۷٪ و برای شاه‌تیر CPG ۲ با سخت‌کننده‌ی مشابه که ضخامت جان بیشتری دارد، ۳۷٪ است. افزایش مقاومت در شاه‌تیرهای CPG ۳ و CPG ۴ 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 ۶ ج، کمتر از شاه‌تیرهای مرکب با سخت‌کننده‌ی فشاری، مطابق شکل ۶ ب 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

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 کماتش برشی؛
 ν : ضریب پواسون؛
 σ_{crs} : تنش کماتشی 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).

سخت‌کننده‌های قطری، سخت‌کننده‌ی قطری فشاری کارآمدترین نوع سخت‌کننده به دلیل مؤثر بودن در قبل و بعد از کماتش 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 استوانه‌ی بتنی؛
 l : طول مؤثر سخت‌کننده‌ی قطری؛
 M_p : لنگر مومسان مقاوم بال فولادی در کشش؛
 M_{pn} : لنگر مومسان مقاوم بال مرکب؛

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).