

اثر فرضیات سخت‌شدگی چرخه‌یی فولاد در رفتار اتصالات فولادی

سجاد صادقی درکی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

شریف شاه‌بیک* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۳۵-۴۴

امروزه مهندسان به منظور بررسی رفتار چرخه‌یی سازه‌ها و اجزاء سازه‌یی فولادی از فرضیه‌های مختلف سخت‌شدگی خمیری در مدل رفتاری فولاد استفاده می‌کنند، که اغلب آن‌ها با ساده‌شدگی‌های قابل توجهی همراه است. از سوی دیگر، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که سخت‌شدگی فولاد ترکیبی غیرخطی و به نسبت پیچیده از دو نوع سخت‌شدگی پویا و همسان‌گرد است. از این رو در این نوشتار سعی شده است تا میزان اثرگذاری فرضیات مختلف سخت‌شدگی چرخه‌یی فولاد در برآوردهای تحلیل‌های عددی بررسی شود. براساس این هدف، یک اتصال فولادی خمشی انتخاب و پاسخ آن تحت دو نوع بارگذاری لرزه‌یی دور و نزدیک گسل برای ۶ نوع فرضیه‌ی سخت‌شدگی و ۶ نوع فولاد با ویژگی خمیری متفاوت استخراج شده است. نتایج حاصل برای کمیت‌های مقاومت، ظرفیت جذب انرژی و زمان شروع ترک مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

واژگان کلیدی: مدل خمیری، بارگذاری چرخه‌یی، سخت‌شدگی ترکیبی، سخت‌شدگی پویا، سخت‌شدگی همسان‌گرد.

sajad.sadeghi@modares.ac.ir
shahbeyk@modares.ac.ir

۱. مقدمه

وابسته‌اند و مهم‌تر آن که ترکیب این دو نیز ماهیت غیرخطی دارد. بنابراین برای در نظر گرفتن این اثرات در شبیه‌سازی‌های عددی باید یک مدل ساختاری^۵ مناسب و تا حد ممکن دقیق به کار رود.

تاکنون روش‌های متنوعی برای توصیف رفتار خمیری مواد در بارگذاری چرخه‌یی تدوین و ارائه شده است، که از آن میان می‌توان به مدل‌های کلاسیک سخت‌شدگی خمیری، چندسطحی^۶، دوسطحی^۷ و اندوکرونیک^۸ اشاره کرد. رویکرد کلی برای نیل به چنین معادلات رفتاری تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی به این شرح است:^[۱]

- مشاهده‌ی پاسخ ماده در حالت بارگذاری رفت و برگشتی تک‌محوری و رسم منحنی تنش - کرنش.

- فرمول‌بندی معادلات رفتاری، که در برگزیده‌ی اجزاء اساسی پاسخ تک‌محوری باشد.

- تعیین متغیرهای مدل (کالیبراسیون) از نتایج آزمایش‌های تک‌محوری.

- تعمیم مدل به حالت بارگذاری چندمحوری به کمک مفهوم تنش و کرنش مؤثر.

هر چند هر کدام از این رویکردها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند، مدل‌های کلاسیک سخت‌شدگی خمیری کاربرد بیشتری در مسائل کاربردی و مهندسی دارند و در اغلب نرم‌افزارهای اجزاء محدود عرضه شده‌اند. لذا در این پژوهش تمرکز اصلی بر روی این دسته از مدل‌های رفتاری است.

شناخت دقیق بارهای وارده به سازه‌ها و نحوه‌ی عملکرد مصالح به‌کار رفته تحت این بارها، گام‌های حیاتی در جهت نیل به طراحی ایمن و اقتصادی است. از انواع مهم بارهایی که سازه‌ها متحمل می‌شوند، می‌توان به بار زلزله، باد و ماشین‌آلات مکانیکی اشاره کرد، که ماهیت چرخه‌یی^۱ دارند. در عمل ملاحظات اقتصادی اجازه نمی‌دهد که سازه‌ها به گونه‌یی طراحی شوند که رفتار تمام بخش‌های آن‌ها تحت بارهای اعمالی در محدوده‌ی ارتجاعی باقی بماند. از این رو است که آیین‌نامه‌های طراحی این امکان را به سازه می‌دهند تا با انجام تغییرشکل‌های خمیری و برگشت‌ناپذیر، ظرفیت شکل‌پذیری موردنیاز را تأمین کنند. در نتیجه آگاهی از رفتار مصالح در محدوده‌ی غیرارتجاعی در پیش‌بینی عملکرد سازه‌ها دارای اهمیت ویژه است.

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که فولاد، به‌عنوان پرمصرف‌ترین فلز مورد استفاده در انواع سازه‌ها، رفتاری وابسته به چرخه‌ی بارگذاری دارد.^[۱] این وابستگی به صورت ترکیبی از سخت‌شدگی کرنشی^۲ پویا^۳ و همسان‌گرد^۴ است، یعنی با وارد شدن به ناحیه‌ی غیرارتجاعی و تجربه‌ی کرنش‌های خمیری، سطح تسلیم فولاد در فضای تنش‌های اصلی تغییر مکان و تغییر اندازه می‌دهد. نکته‌ی بسیار مهم آن است که هر کدام از این بخش‌های سخت‌شدگی خود به صورت غیرخطی به کرنش‌های خمیری

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۶/۱۲، پذیرش ۱۳۹۲/۶/۲۳.

مدل ترکیبی سخت‌شدگی همسان‌گرد و پویای چابوچی کاربرد بیشتری در نرم‌افزارهای تجاری دارند، که از این میان مدل ترکیبی چابوچی می‌تواند تمام ویژگی‌های فولاد در بارگذاری چرخه‌بی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. بنابراین نتایج این مدل در این پژوهش به‌عنوان مرجع مقایسه انتخاب شده است.

۱.۲. سخت‌شدگی همسان‌گرد

بیشتر فلزات به واسطه تغییرشکل خمیری سخت می‌شوند. به عبارت دیگر، با افزایش تغییرشکل خمیری، تنش قابل تحمل ماده افزایش می‌یابد. در اغلب موارد این افزایش، تابعی از کرنش خمیری تجمعی^{۱۴} (کرنش خمیری مؤثر) است، که به صورت رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_e^p = \int d\varepsilon_e^p \quad (1)$$

که در آن، $d\varepsilon_e^p$ از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:

$$d\varepsilon_e^p = \sqrt{\frac{2}{3}} (d\varepsilon^p : d\varepsilon^p) \quad (2)$$

ε^p تانسور کرنش خمیری در مدل سخت‌شدگی همسان‌گرد فرض می‌شود که پس از وقوع تسلیم با ادامه‌ی جریان خمیری، اگر تنش افزایش یابد، با توجه به برقراری شرط سازگاری، باید سطح تسلیم به‌صورت یکنواخت توسعه یابد، که مقدار این افزایش تابعی از کرنش خمیری تجمعی است. به بیان ریاضی سطح تسلیم به‌صورت رابطه‌ی ۳ خواهد بود:

$$F = f(\sigma) - \sigma_0(\varepsilon_e^p) = 0 \quad (3)$$

که در آن σ ، تانسور تنش و $\sigma_0(\varepsilon_e^p)$ معرف اندازه‌ی سطح تسلیم در هر لحظه است و به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:^[۱]

$$\sigma_0(\varepsilon_e^p) = \sigma_{y0} + r(\varepsilon_e^p) \quad (4)$$

که در آن، σ_{y0} بیانگر اندازه‌ی سطح تسلیم اولیه است. همچنین $r(\varepsilon_e^p)$ تابع سخت‌شدگی همسان‌گرد نام دارد. در عمل این تابع به دو صورت خطی و یا غیرخطی تعریف می‌شود. برخی پژوهشگران برای سخت‌شدگی همسان‌گرد غیرخطی رابطه‌ی ۵ را پیشنهاد کرده‌اند:^[۱۴]

$$d\sigma_0(\varepsilon_e^p) = b(Q_\infty - \sigma_0) d\varepsilon_e^p \quad (5)$$

که در آن، b و Q_∞ ثابت‌های ماده هستند که در حالت تک‌محوری، شکلی نمایی به منحنی تنش - کرنش می‌دهند. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۵، تابع سخت‌شدگی همسان‌گرد غیرخطی با شرط اولیه‌ی $\sigma_0(0) = \sigma_{y0}$ ، به‌صورت رابطه‌ی ۶ حاصل می‌شود:

$$\sigma_0(\varepsilon_e^p) = \sigma_{y0} + Q_\infty (1 - e^{-b\varepsilon_e^p}) \quad (6)$$

براساس رابطه‌ی ۶، متغیر سخت‌شدگی همسان‌گرد تابعی از کرنش خمیری مؤثر است و بعد از تعدادی چرخه‌ی بارگذاری مشخص به مقدار Q_∞ پایدار می‌شود. بنابراین Q_∞ معرف مقدار حدی رشد σ_0 است. به عبارت بهتر، بیشینه اندازه‌ی سطح تسلیم، که براساس این قانون پیش‌بینی می‌شود، برابر با $Q_\infty + \sigma_{y0}$ است.

علی‌رغم آنچه در مورد اهمیت لحاظ‌کردن اثر سخت‌شدگی چرخه‌بی فولاد در تعیین رفتار واقعی سازه‌های فولادی، که تحت بارهای رفت و برگشتی قرار می‌گیرند، بیان شده است؛ امروزه در بسیاری از تحلیل‌های عددی، از اثر سخت‌شدگی فولاد صرف‌نظر می‌شود (فرض ارتجاعی - خمیری کامل^۹ ماده) و یا فقط بخشی از آن در نظر گرفته می‌شود (فرض سخت‌شدگی همسان‌گرد و یا فرض سخت‌شدگی خطی پویا). برای مثال در مطالعاتی که بر روی رفتار چرخه‌بی قاب‌های مهاربندی و اتصالات آن‌ها انجام شده است، برخی پژوهشگران برای شبیه‌سازی رفتار خمیری فولاد از مدل سخت‌شدگی همسان‌گرد^[۲،۳] برخی دیگر از مدل سخت‌شدگی خطی پویا^[۵-۱۱] و پژوهشگر دیگری از مدل سخت‌شدگی غیرخطی پویا استفاده کرده‌اند.^[۱۱] همچنین در مطالعاتی که به ترتیب در مورد رفتار لرزه‌بی سازه‌های مرکب (بتن و فولاد نرمه) و اثر ورق‌های پیوستگی و مضاعف در اتصالات خمشی انجام شده است، از مدل سخت‌شدگی همسان‌گرد استفاده شده است.^[۱۲،۱۳] حال این سؤال مطرح است که چنین فرضیاتی به چه میزان در ایجاد خطا در پاسخ‌ها اثرگذار خواهد بود. این نوشتار تلاش دارد به این سؤال در چارچوب مراحل زیر پاسخ دهد:

- انتخاب یک مدل سخت‌شدگی ترکیبی غیرخطی که می‌تواند با دقت مناسب رفتار چرخه‌بی فولاد و پدیده‌های وابسته به آن را به زبان ریاضی بیان کند. همچنین این مدل باید پیچیدگی محدودی داشته باشد، تا امکان به‌کارگیری آن در مسائل رایج مهندسی وجود داشته باشد.
- انتخاب یک اتصال فولادی به‌عنوان زیرسازه‌ی مورد بررسی جهت ارزیابی اثرگذاری فرضیات سخت‌شدگی در پاسخ‌ها.
- شبیه‌سازی اجزاء محدود اتصال موردنظر، صحت‌سنجی مدل و معرفی معیارهای مقاومت، انرژی استهلاکی و آغاز ترک برای مقایسه‌ی نتایج مدل‌های سخت‌شدگی متفاوت.
- انتخاب ۶ نوع فولاد متفاوت از لحاظ خواص سخت‌شدگی خمیری، به‌کارگیری ۶ فرضیه‌ی متفاوت سخت‌شدگی شامل: سخت‌شدگی غیرخطی ترکیبی، سخت‌شدگی خطی پویا، سخت‌شدگی غیرخطی پویا، سخت‌شدگی خطی همسان‌گرد و سخت‌شدگی غیرخطی همسان‌گرد (در دو حالت مختلف) و در نهایت، بررسی نتایج تحلیل برای دو نوع بارگذاری چرخه‌بی دور و نزدیک گسل.

۲. انواع مدل‌های سخت‌شدگی کلاسیک

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که اغلب فلزات رفتاری وابسته به چرخه‌ی بارگذاری دارند. از معروف‌ترین پدیده‌هایی که در بارگذاری چرخه‌بی رخ می‌دهد، می‌توان به اثر بوشینگ^{۱۰}، سخت‌شدگی و نرم‌شدگی چرخه‌بی^{۱۱}، رچتینگ^{۱۲}، آسودگی^{۱۳} و انتقال آرام از ناحیه‌ی ارتجاعی به خمیری اشاره کرد. اثر بوشینگ عبارت است از کاهش تنش تسلیم در جهت باربرداری در قیاس با مقدار پیشین خود در وضعیت بارگذاری.^[۱] همچنین به افزایش و یا کاهش طول ناحیه‌ی ارتجاعی در طول چرخه‌های بارگذاری (افزایش و یا کاهش اندازه‌ی سطح تسلیم) سخت‌شدگی و یا نرم‌شدگی چرخه‌بی اطلاق می‌شود. رچتینگ عبارت است از ایجاد کرنش میانگین مخالف صفر تحت اثر بارگذاری تنش کنترل با تنش میانگین مخالف صفر.^[۱] همچنین به کاهش تنش میانگین و صفرشدن آن در بارگذاری کرنش کنترل نامتقارن آسودگی تنش گفته می‌شود.^[۱] تاکنون مدل‌های سخت‌شدگی کلاسیک متفاوتی برای توصیف رفتار چرخه‌بی فولاد به‌کار رفته است. در این بین مدل‌های سخت‌شدگی همسان‌گرد، پویا و

۲.۲. مدل‌های سخت‌شدگی پویا

فرض سخت‌شدگی همسان‌گرد برای فولاد، در اغلب موارد باعث پیش‌بینی نادرست از طول ناحیه‌ی ارتجاعی می‌شود. برای اصلاح این مشکل می‌توان فرض کرد که سطح تسلیم به جای رشد، فقط در فضای تنش‌های اصلی جابجا می‌شود. به این نوع سخت‌شدگی، که سطح تسلیم بدون تغییر در اندازه فقط جابجا می‌شود، سخت‌شدگی پویا می‌گویند.^[۱] در حالت سخت‌شدگی پویا، معادله‌ی سطح تسلیم به صورت رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود:

$$F = f(\sigma - \alpha) - \sigma_y = 0 \quad (7)$$

که در آن α ، تانسور تنش بازگشتی است و مختصات مرکز سطح تسلیم را مشخص می‌کند. قوانین سخت‌شدگی پویا می‌کوشند تا نحوه‌ی حرکت سطح تسلیم را در فضای تنش بیان کنند. در ادامه به چند قانون سخت‌شدگی پویا اشاره شده است.

۱.۲.۲. قانون خطی پراگر

ساده‌ترین فرض برای تعیین نحوه‌ی حرکت سطح تسلیم این است که نمو جابجایی سطح تسلیم، ضریبی از نمو کرنش خمیری در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، رابطه‌ی خطی بین $d\alpha$ و $d\varepsilon^p$ حاکم است. این رابطه به عنوان قانون پراگر^{۱۵} شناخته می‌شود و به صورت رابطه‌ی ۸ بیان می‌شود:^[۱]

$$d\alpha = C d\varepsilon^p \quad (8)$$

که در آن، C ضریب کار سختی است و با توجه به خواص ماده تعیین می‌شود. براساس این مدل، سطح تسلیم، شکل و اندازه‌ی اولیه‌ی خود را حفظ می‌کند و در جهت نمو کرنش خمیری و یا بردار قائم بر سطح تسلیم حرکت می‌کند.

۲.۲.۲. قانون سخت‌شدگی غیرخطی چابوچی

در این مدل با تعمیم مدل سخت‌شدگی خطی پراگر، به صورت مستقیم غیرخطی بودن منحنی تنش - کرنش شبیه‌سازی می‌شود. مدل سخت‌شدگی پویای غیرخطی در ابتدا توسط آرمسترانگ - فردریک^{۱۶} (۱۹۶۶) با استفاده از فقط یک عبارت سخت‌شدگی ارائه شده است. بعدها چابوچی و همکاران (۱۹۷۹ و ۱۹۸۶)، با برهم نهی چندین عبارت از مدل آرمسترانگ - فردریک مدل سخت‌شدگی پویای غیرخطی خود را به صورت رابطه‌ی ۹ ارائه کردند:^[۱]

$$\alpha' = \sum_{i=1}^M \alpha'_i, \quad d\alpha'_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon^p - \gamma_i \alpha'_i d\varepsilon^p \quad (9)$$

که در آن، α' بخش انحرافی تانسور تنش بازگشتی است و C_i و γ_i ثابت‌های ماده هستند که باید از نتایج آزمایشگاهی تعیین شوند. جمله‌ی کلیدی در رابطه‌ی ۹ عبارت $\gamma_i \alpha'_i d\varepsilon^p$ است، که در اصطلاح به آن بازبانده‌ی تاریخچه^{۱۷} می‌گویند. این عبارت مدل را قادر می‌سازد تا سخت‌شدگی غیرخطی و پدیده رچتینگ را شبیه‌سازی کند. تعداد عبارات مورد استفاده‌ی مدل در موارد کار بردی برابر ۳ است. عبارت سوم (γ_2) می‌تواند به صورت خطی فرض شود.^[۱۵]

به صورت مرسوم مدل‌های پدیدارشناختی با آزمایش‌های تک‌محوری کالیبره می‌شوند. روش‌های متنوعی برای کالیبراسیون مدل چابوچی ارائه شده است. در این پژوهش متغیرهای مدل براساس روش نیم‌چرخه، که در راهنمای نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است، تعیین شده‌اند.^[۱۴]

۳.۲. مدل سخت‌شدگی ترکیبی

به منظور شبیه‌سازی رفتار واقعی فولاد، مدل‌هایی ارائه شده‌اند که قادر هستند اثر سخت‌شدگی پویا و همسان‌گرد را به صورت هم‌زمان در نظر بگیرند. به این دسته از مدل‌ها، مدل سخت‌شدگی ترکیبی گویند و به صورت رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شوند:^[۱]

$$F = f(\sigma - \alpha) - \sigma_y = 0 \quad (10)$$

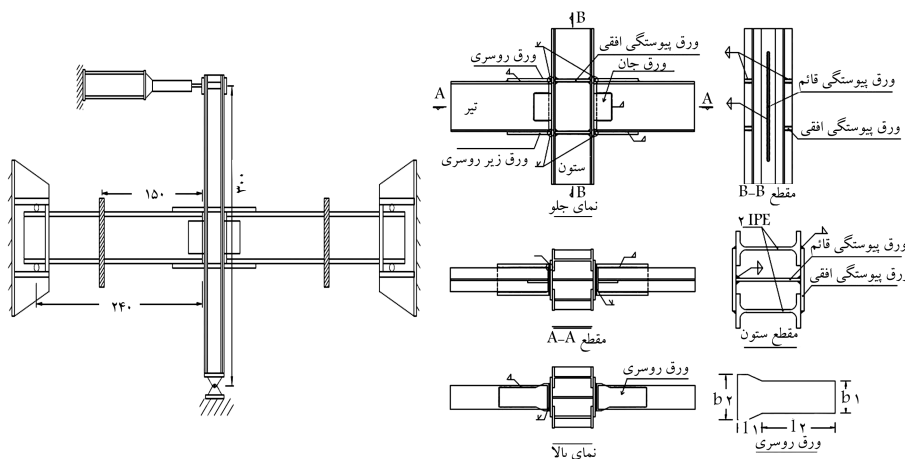
در این پژوهش، برای تعریف رفتار سخت‌شدگی ترکیبی از مدل سخت‌شدگی پویای چابوچی با ۳ عبارت غیرخطی و مدل سخت‌شدگی غیرخطی همسان‌گرد چابوچی (رابطه ۶) استفاده شده است.

۳. شبیه‌سازی عددی و صحت‌سنجی

۱.۳. ایجاد مدل اجزاء محدود

امروزه در برخی از کشورها مانند ایران، استفاده از مقاطع مرکب فولادی در ساخت اسکلت‌های سازه‌ی کاربرد فراوانی دارد. به همین جهت و به منظور بررسی اثر فرضیات مختلف سخت‌شدگی در رفتار چرخه‌ی اتصالات فولادی، اتصال نشان داده‌شده در شکل ۱ در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته است. این تذکر لازم است که پیش از این، رفتار آزمایشگاهی این اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ی دور از گسل مطابق رویه‌ی پیشنهادی ATC۲۴ در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ مورد ارزیابی قرار گرفته است. این اتصال شامل مقطع دابل IPE به همراه ورق پوششی به عنوان ستون و مقطع تک IPE به عنوان تیر بوده است، که در آن انتقال ممان میان تیر و ستون به کمک ورق روسری و زیرسری انجام می‌پذیرد. همچنین ورق‌ی در داخل چشمه‌ی اتصال به منظور افزایش باربری برشی منظور شده است.^[۱۶] جدول ۱، ابعاد تمامی اجزاء این اتصال را ارائه می‌کند.

شبیه‌سازی و تحلیل عددی این اتصال در نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفته است. با توجه به هندسه‌ی متقارن اتصال نسبت به صفحه‌ی گذرنده از جان تیر، عدم گزارش کماتش خارج از صفحه در آزمایش و در جهت کاهش حجم محاسبات، فقط نیمی از اتصال همانند شکل ۲ در مدل‌سازی لحاظ می‌شود. همچنین به منظور افزایش دقت در شبیه‌سازی و امکان در نظر گرفتن هندسه‌ی جوش، اجزاء اتصال از نوع سه‌بعدی شکل‌پذیر حجمی تعریف شده‌اند. در مدل تهیه‌شده‌ی اجزاء سازنده‌ی اتصال در نقاط اتصال (توسط جوش گوشه و یا جوش نفوذی کامل) یکپارچه تعریف شده‌اند. این کار موجب می‌شود تا نیازی به اعمال قیود اضافی نباشد و در نتیجه سرعت تحلیل‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یابد. این تذکر لازم است که در تحلیل‌های ابتدایی برای سطوح در تماس با یکدیگر (مانند تماس ورق روسری با بال تیر) قیود تماسی استفاده شده است، اما در تحلیل‌های نهایی با توجه به هزینه‌ی محاسباتی بالا و تأثیر ناچیز در پاسخ، این قیود حذف شده است. در المان‌بندی از دو نوع المان خطی مکعبی (D3C8)، و گوه‌ی (D3C6)، استفاده شده است. باید توجه کرد که اندازه‌ی المان‌بندی با توجه به شدت گرادبان کرنش در بخش‌های مختلف اتصال متفاوت است (شکل ۳). تحلیل نمونه‌ها به روش استاتیکی با فرض رفتار غیرخطی مواد و تغییرشکل‌های بزرگ صورت گرفته است.



شکل ۱. هندسه‌ی اتصال فولادی.

جدول ۱. مشخصات هندسی اجزاء اتصال خمشی.

ورق برشی جان تیر		ورق زیرسری بال		ورق روسری بال		ورق پوششی ستون	ورق پیوستگی قائم	مقطع تیر	مقطع ستون
جوش گوشه	ابعاد ورق	جوش گوشه	ابعاد ورق	جوش گوشه	جوش گوشه				
۰٫۸**	PL ۱۵ × ۱۰ × ۱	۱٫۲*	PL ۲۸ × ۲۰ × ۱٫۵	۱٫۲	۱۰ ۱۴ ۸ ۲۰	۲ PL ۲۴ × ۱٫۲	PL ۷۵ × ۲۴ × ۱٫۲	IPE۲۷۰	۲IPE۲۴۰

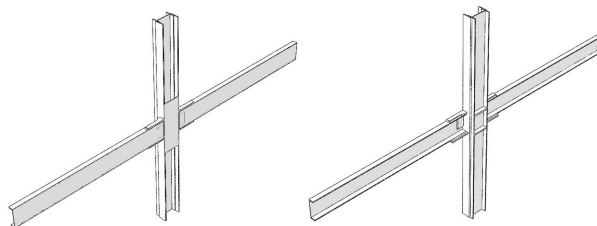
همه‌ی ابعاد برحسب سانتی‌متر است. ضخامت ورق‌های پیوستگی افقی برابر ضخامت ورق‌های روسری و زیرسری است.

* در شبیه‌سازی اتصال در نرم‌افزار ۱ سانتی‌متر فرض شده است.

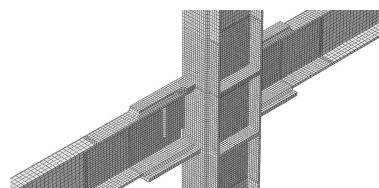
** در شبیه‌سازی اتصال در نرم‌افزار برابر ضخامت بال تیر فرض شده است.

۲.۳. شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط تکیه‌گاهی مناسب با توجه به شرایط آزمایش اتصال و اینکه فقط نیمی از اتصال شبیه‌سازی شده مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. دو الگوی بارگذاری چرخه‌یی دور از گسل و نزدیک گسل به ترتیب مطابق رویه‌های آیین‌نامه‌های ATC-۲۴^[۱۷]، SAC^[۱۸]، در محل بالایی ستون به صورت کنترل‌شونده‌ی جابجایی اعمال شده است. شکل ۵، این دو الگوی بارگذاری را به صورت منحنی‌های درصد جابجایی نسبی در برابر چرخه‌ی بارگذاری ارائه می‌کند. این تذکر لازم است که در رویه‌ی بارگذاری نزدیک گسل، به علت وجود نامتقارنی بارگذاری، رفتار رجیتینگ فولادها در پاسخ‌های تحلیل نقش بیشتری می‌یابند و از این لحاظ با بارگذاری متقارن دور از گسل تفاوت وجود دارد.



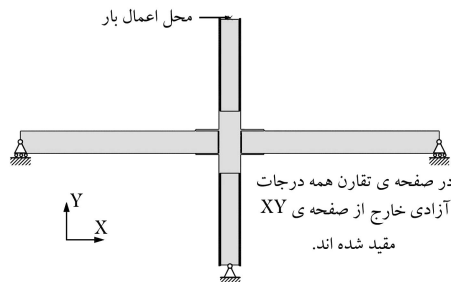
شکل ۲. هندسه‌ی اتصال فولادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار.



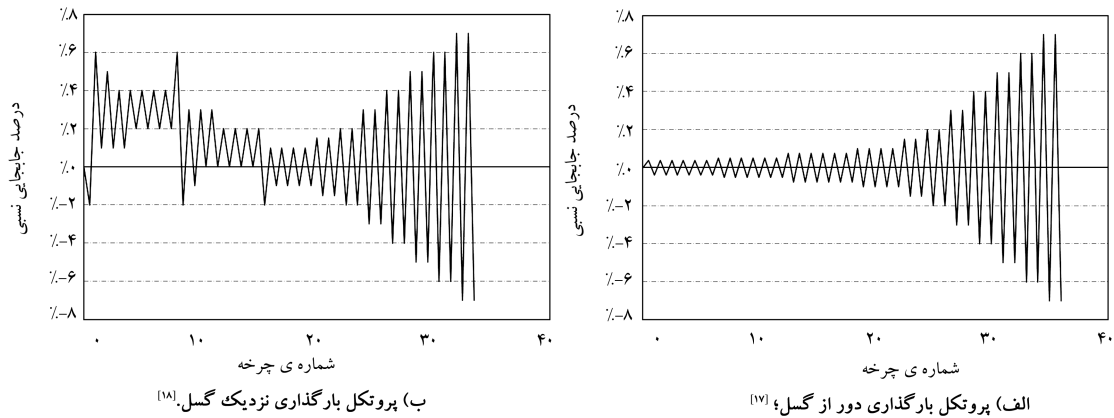
شکل ۳. المان‌بندی اتصال فولادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار.

۳.۳. مشخصات مصالح

به منظور بررسی جامع اثر فرضیات سخت‌شدگی مختلف در رفتار چرخه‌یی اتصال فولادی، ۶ نوع فولاد با مشخصات خمیری گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۲، نام و ویژگی‌های هر یک از فولادهای انتخابی به صورت مختصر شرح داده شده است. در این جدول، متغیرهای سخت‌شدگی همسان‌گرد مدل ترکیبی نیز ذکر شده است. همچنین در پیوست الف مقادیر تنش حقیقی - کرنش خمیری حقیقی (اصلاح شده برای اثر گلوئی) هر یک از فولادهای مورد مطالعه ارائه شده است. این تذکر لازم است که مشخصات خمیری فولاد ایران از مرجع^[۱۹] و مابقی فولادهای انتخابی از مرجع^[۲۰] استخراج شده است. با بررسی رفتار چرخه‌یی فولادهای منتخب در این مراجع می‌توان این موارد را در مورد تفاوت‌های موجود در رفتار سخت‌شدگی



شکل ۴. شرایط مرزی اتصال فولادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار.



شکل ۵. تاریخچه‌ی بارگذاری نمونه‌ها.

جدول ۲. مشخصات خمیری فولادهای مصرفی.

نام فولاد	نام تجاری	تنش تسلیم (MPa)	تنش گسیختگی (MPa)	کرنش خمیری گسیختگی	متغیرهای سخت‌شدگی		توضیحات تکمیلی
					همسان‌گرد مدل CH Q_{∞}	همسان‌گرد b	
IR-ST37	ST37	۲۸۰	۸۰۰	۱،۰۰	۷	۲۲۰	فولاد نرمه‌ی ساخت ایران، با ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد چرخه‌یی
AW5۰	A572 Grade5۰	۳۴۵	۳۴۴۷	۸،۵۶	۵	۱۱۷،۲	فولاد نرمه‌ی ساخت آمریکا، نمونه‌گیری شده از مقطع W، با ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد چرخه‌یی
AP5۰	A572 Grade5۰	۳۴۵	۸۲۷	۱،۳۳	۵	۱۱۷،۲	فولاد نرمه‌ی ساخت آمریکا، نمونه‌گیری شده از ورق نورد شده، با ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد چرخه‌یی
AP۱۱۰	A514 Grade۱۱۰	۳۴۵	۹۵۸	۲،۳۳	۵	-۳۴،۵	فولاد پر مقاومت ساخت آمریکا، نمونه‌گیری شده از ورق نورد شده، با نرم‌شدگی همسان‌گرد چرخه‌یی
JP5۰	JIS-SN۴۹۰B Grade5۰	۳۴۵	۹۲۴	۳،۳۳	۵	۱۷۲،۴	فولاد نرمه‌ی ساخت ژاپن، نمونه‌گیری شده از ورق نورد شده، با ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد چرخه‌یی
JW5۰	JIS-SN۴۹۰B Grade 5۰	۳۱۰	۹۱۰	۳،۳۳	۵	۲۴۱،۳	فولاد نرمه‌ی ساخت ژاپن، نمونه‌گیری شده از مقطع W، با ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد چرخه‌یی

خمیری آن‌ها بیان کرد:

- فولاد AP۱۱۰ دارای ویژگی نرم‌شدگی چرخه‌یی است، اما اثر نرم‌شدگی چرخه‌یی در پاسخ تنش - کرنش تک‌محوری بسیار ناچیز است.

- فولادهای AP5۰ و AW5۰ ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد را دارند، اما سهم سخت‌شدگی پویا در پاسخ تنش - کرنش خمیری تک‌محوری فولاد AW5۰ بسیار بیشتر است، به قسمی که در کرنش خمیری گسیختگی، سخت‌شدگی همسان‌گرد فقط در حدود ۰،۴٪ از پاسخ کل تک‌محوری فولاد AW5۰ را تشکیل می‌دهد و بقیه‌ی پاسخ مربوط به اثر سخت‌شدگی پویاست. این مقدار برای فولاد AP5۰ برابر ۰،۲۵٪ است.

- فولادهای JP5۰ و JW5۰، ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد را دارند، اما سهم سخت‌شدگی همسان‌گرد در پاسخ تنش - کرنش خمیری تک‌محوری فولاد JW5۰ بیشتر است. به قسمی که در کرنش خمیری گسیختگی، سهم سخت‌شدگی همسان‌گرد برای فولادهای JP5۰ و JW5۰ به ترتیب برابر ۰،۲۸ و ۰،۴۰ درصد است. همچنین در ابتدای منحنی تنش - کرنش خمیری این فولادها، سهم

سخت‌شدگی همسان‌گرد از سخت‌شدگی پویا بیشتر است.

- فولاد IR-ST37 نیز دارای ویژگی سخت‌شدگی همسان‌گرد است. همچنین سهم سخت‌شدگی همسان‌گرد و پویا در پاسخ تک‌محوری آن تقریباً یک اندازه است.

۴.۳. مدل‌های سخت‌شدگی مورد مطالعه

برای هر نوع از فولادهای جدول ۲، شش فرض متفاوت سخت‌شدگی مورد بررسی قرار گرفته است. ۴ حالت انتخاب‌شده براساس مشاهده‌ی کاربرد آن‌ها در میان مهندسان و پژوهشگران بوده و ۲ حالت دیگر فرض این پژوهش است (شکل ۶). نرم‌افزار آباکوس مدل‌های متنوعی را برای تعریف سخت‌شدگی خمیری فلزات در اختیار قرار می‌دهد. مدل سخت‌شدگی پویای موجود در نرم‌افزار همان مدل پراگر است، که در شبیه‌سازی برای تعریف سخت‌شدگی پویای خطی استفاده شده است. همچنین این نرم‌افزار گزینه‌ی سخت‌شدگی همسان‌گرد را نیز در اختیار کاربر قرار می‌دهد، که می‌توان با تعریف ضرایب رابطه‌ی ۶ و یا وارد کردن مستقیم منحنی تنش در برابر کرنش خمیری، سخت‌شدگی همسان‌گرد فولاد را تعریف کرد. در این نرم‌افزار مدل سخت‌شدگی ترکیبی چابوچی نیز موجود است. از این مدل برای تعریف فرضیه‌ی سخت‌شدگی ترکیبی و پویای غیرخطی استفاده شده است. در ادامه، هر یک از فرضیات سخت‌شدگی خمیری مورد مطالعه در این نوشتار و نحوه‌ی تعریف متغیرهای آن در نرم‌افزار ارائه شده است.

- **سخت‌شدگی ترکیبی (CH):** در این حالت رفتار کامل فولاد به‌صورت ترکیبی از سخت‌شدگی همسان‌گرد و پویا در نظر گرفته می‌شود. به منظور شبیه‌سازی سخت‌شدگی پویا، مدل غیرخطی چابوچی با ۳ عبارت سخت‌شدگی استفاده شده است. برای تعیین متغیرهای سخت‌شدگی پویا، نمودار اصلاح شده‌ی تنش - کرنش حقیقی برای اثر گلوئی به‌کار رفته است. همچنین تابع سخت‌شدگی همسان‌گرد براساس مدل غیرخطی چابوچی تعریف شده است. استفاده از چنین مدلی فقط در مطالعات دقیق و پیشرفته مشاهده می‌شود و در این نوشتار به عنوان مدل مرجع به کار رفته است.

- **سخت‌شدگی همسان‌گرد نوع اول (IH-T1):** در این حالت فرض می‌شود تمامی رفتار غیرخطی فولاد ناشی از اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد است. این حالت در این نوشتار فرض شده است.

- **سخت‌شدگی همسان‌گرد نوع دوم (IH-T2):** این حالت شبیه حالت قبل است، اما منحنی تنش - کرنش فولاد برای اثر گلوئی شدن اصلاح نشده است.

این تذکر لازم است که نرم‌افزار برای مقادیر کرنش خمیری معادل بزرگ‌تر از مقادیر ورودی، فرض ثابت ماندن تنش تسلیم را اعمال می‌کند. استفاده از این مدل بسیار فراگیر است.

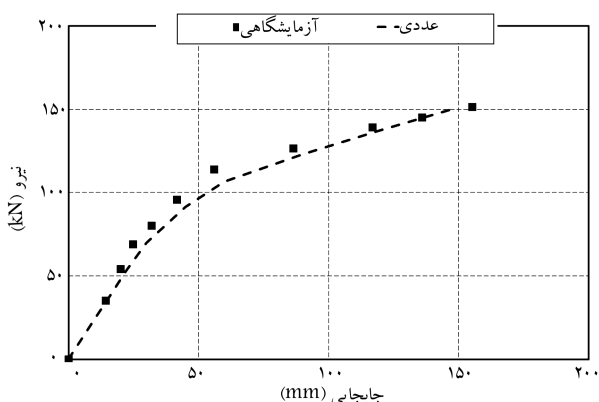
- **سخت‌شدگی همسان‌گرد خطی (LIH):** در این حالت نیز فرض شده است که تمامی رفتار خمیری فولاد ناشی از اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد است. اما تابع سخت‌شدگی همسان‌گرد نه براساس واقعیت و بلکه به‌صورت خطی تعریف می‌شود، یعنی منحنی تنش - کرنش از نقطه‌ی تسلیم اولیه تا نقطه‌ی متناظر با تنش بیشینه در منحنی تنش - کرنش اصلاح‌نشده برای اثر گلوئی به‌صورت خطی است. استفاده از این مدل بسیار فراگیر است.

- **سخت‌شدگی پویای خطی (LKH):** در این حالت با صرف‌نظر از اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد، رفتار خمیری به‌صورت سخت‌شدگی خطی پراگر فرض می‌شود. در این حالت لازم است مقادیر تنش در ابتدای جریان خمیری (تنش تسلیم) و تنش حقیقی بیشینه (بدون اصلاح اثر گلوئی شدن) و مقدار کرنش خمیری نظیر آن در نرم‌افزار تعریف شود. استفاده از این مدل نیز بسیار فراگیر است.

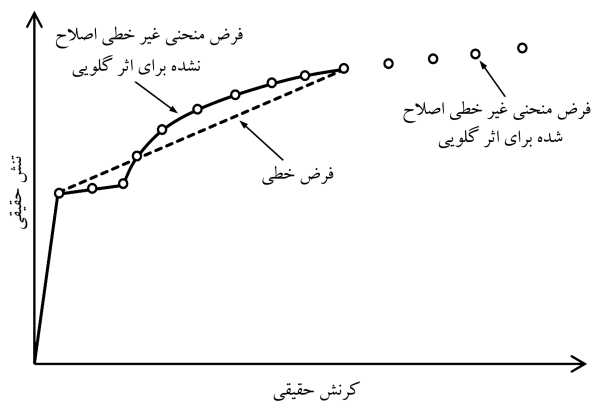
- **سخت‌شدگی پویای غیرخطی (NLKH):** این حالت فرض می‌کند تمامی رفتار غیرخطی فولاد ناشی از سخت‌شدگی غیرخطی پویاست. تعریف اختصاص متغیرهای مدل در این حالت مشابه حالت سخت‌شدگی ترکیبی است، با این تفاوت که در این حالت، متغیرهای سخت‌شدگی همسان‌گرد تعریف نمی‌شوند. به عبارت بهتر فرض می‌شود که اندازه‌ی سطح تسلیم در طی جریان خمیری ثابت می‌ماند. این حالت در این نوشتار فرض شده است. برای تعریف مدل سخت‌شدگی غیرخطی پویا در نرم‌افزار از مدل ترکیبی بدون اختصاص متغیرهای سخت‌شدگی همسان‌گرد استفاده شده است.

۵.۳. اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از دقت مدل‌سازی، نمودار پوش چرخه‌ی هیستریسیس اتصال با نتایج آزمایشگاهی در حالت بارگذاری دور از گسل مقایسه شده است. شکل ۷، این مقایسه را نشان می‌دهد که مؤید انطباق مناسب پاسخ‌های عددی است. باید توجه شود که در تحلیل عددی مدل دقیق سخت‌شدگی ترکیبی برای فولاد نرمه‌ی IR-ST37 به کار رفته است.



شکل ۷. صحت‌سنجی پوش نیرو - تغییر مکان مدل با نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۶. فرضیات مختلف سخت‌شدگی.

۴. بررسی نتایج

۱.۴. معرفی معیارهای مقایسه

در این پژوهش به منظور مقایسه‌ی رفتار اتصال تحت اثر فرضیات مختلف سخت‌شدگی خمیری، معیارهای زمان شروع ترک، مقاومت و ظرفیت جذب انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. در تعیین زمان شروع ترک فرض می‌شود که برای هر فولاد و در هر حالت بارگذاری، در صورتی که کرنش خمیری بیشینه در مدل از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، ترک آغاز می‌شود. برای تعیین مقدار کرنش خمیری بحرانی از مدل پیشرفته و جدید رشد حفره‌ی چرخه‌ی CVGM^[۱۰] و برای معیار مقاومت در حالت بارگذاری دور از گسل از نمودار پوش چرخه‌ی و در حالت نزدیک گسل از نمودار نیرو - تاریخچه‌ی بارگذاری استفاده شده است (منظور از نیرو و تغییر مکان در نمودارهای مذکور، مقدار این کمیت‌ها در نقطه‌ی اعمال بار است). همچنین در هر دو حالت بارگذاری، برای معیارهای ظرفیت جذب انرژی از نمودارهای انرژی اتلافی خمیری - چرخه‌ی بارگذاری استفاده شده است. با توجه به اینکه رفتار واقعی فولاد به حالت سخت‌شدگی ترکیبی بسیار نزدیک است، در تمامی نمودارها، پاسخ فرضیات سخت‌شدگی مختلف با نتایج فرض سخت‌شدگی ترکیبی مقایسه شده است. به بیان دیگر، مدل ترکیبی به‌عنوان مدل مرجع جهت مقایسه به کار رفته است.

۲.۴. نتایج معیار مقاومت

جدول ۳، درصد اختلاف نیروی پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌های سخت‌شدگی خمیری نسبت به مدل سخت‌شدگی ترکیبی (مدل مرجع) را در جابجایی بیشینه قبل از شروع ترک ارائه می‌کند. این مقادیر مقاومت (و کرنش خمیری معادل که در ادامه‌ی نوشتار در مورد آن بحث شده است) برای فولاد JW5^۰ به دلیل ترک نخوردن این فولاد در طول بارگذاری، مربوط به انتهای تاریخچه‌ی بارگذاری است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که:

سخت‌شدگی ترکیبی با مدل‌های سخت‌شدگی خطی و غیرخطی پویا نسبت به مدل‌های سخت‌شدگی همسان‌گرد کمتر می‌شود و بالعکس.

- در اغلب موارد (به غیر از زمانی که فولاد خاصیت نرم‌شدگی چرخه‌ی دارد، مانند AP11^۰) مدل‌های سخت‌شدگی خطی و غیرخطی پویا مقادیر کمتر و مدل‌های سخت‌شدگی همسان‌گرد غیرخطی نوع اول و دوم مقادیر بیشتری نسبت به مدل سخت‌شدگی ترکیبی پیش‌بینی می‌کنند. در مورد مدل سخت‌شدگی خطی همسان‌گرد در صورتی که منحنی تنش - کرنش فولاد شکلی دوخطی داشته باشد، این مدل مانند مدل‌های سخت‌شدگی غیرخطی همسان‌گرد تحلیلی دست بالا ارائه می‌کند؛ اما اگر تغییرات شیب منحنی تنش - کرنش فولاد مورد مطالعه زیاد و یا مقدار کرنش خمیری نظیر تنش بیشینه کوچک باشد، این مدل نتایج دست پایین ارائه می‌کند.

۳.۴. نتایج معیار ظرفیت استهلاک انرژی

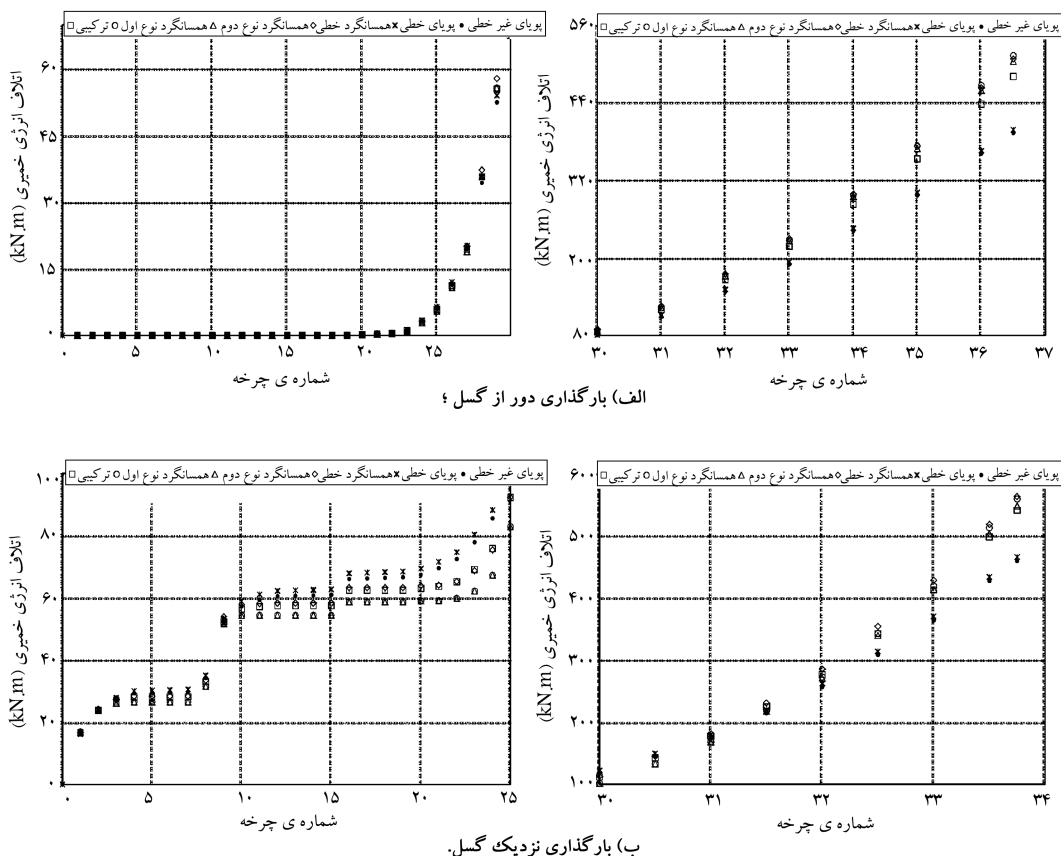
شکل ۸، میزان انرژی استهلاکی در برابر چرخه‌ی بارگذاری را برای فولاد IR-ST37 در حالت بارگذاری دور و نزدیک گسل نشان می‌دهد. همچنین در پیوست ب درصد اختلاف انرژی استهلاکی در برابر چرخه‌ی بارگذاری برای هر یک از مدل‌های سخت‌شدگی خمیری نسبت به مدل سخت‌شدگی ترکیبی ارائه شده است. این اطلاعات برای هر یک از فولادهای مورد مطالعه در این نوشتار و در دو حالت بارگذاری دور و نزدیک گسل ارائه شده است. در حالت بارگذاری دور از گسل، در طول چرخه‌های ابتدایی بارگذاری (۲۰ چرخه اول)، اتصال رفتاری ارتجاعی و در نتیجه استهلاک انرژی ناچیزی دارد. این تذکر لازم است که در هر دو حالت بارگذاری دور و نزدیک گسل، بیشترین انرژی جذب شده در چرخه‌های پایانی بارگذاری رخ می‌دهد. بنابراین به منظور رعایت اختصار در پیوست ب مقادیر استهلاک انرژی برخی از چرخه‌ها ارائه شده است. با توجه به شکل ۸ و پیوست ب، این نتایج قابل استخراج است:

- روند خطا در پیش‌بینی مقاومت فقط به انتخاب مدل سخت‌شدگی بستگی دارد و مستقل از نوع بارگذاری (استفاده از پروتکل دور و یا نزدیک گسل) است.
- در صورتی که سهم سخت‌شدگی همسان‌گرد در منحنی تک‌محوری تنش - کرنش فولاد ناچیز باشد (مانند فولادهای AW5^۰ و AP11^۰)، اختلاف پیش‌بینی مدل

جدول ۳. مقایسه‌ی نیروی پیش‌بینی شده (برحسب KN) نظیر جابجایی بیشینه قبل از شروع ترک با پاسخ مدل CH.

درصد اختلاف مدل‌های سخت‌شدگی خمیری مختلف با مدل CH								پیش‌بینی مدل		تغییر مکان		نام فولاد		
NLKH				LKH				CH		(mm)				
NF	FF	NF	FF	NF	FF	NF	FF	NF	FF	NF**	FF*			
-۲۵	-۲۴	-۳۰	-۳۰	۶	۵	۱۱	۱۱	۱۴	۱۲	۱۶۷	۱۷۰	۱۸۰	۲۱۰	IR-ST37
-۱۲	-۱۴	-۱۲	-۱۳	۵	۶	۲۶	۳۰	۲۶	۳۰	۱۵۲	۱۵۷	۱۵۰	۱۸۰	AW5 ^۰
-۴	-۴	-۲۷	-۳۲	-۷	-۸	۳	۲	۳	۳	۱۸۶	۲۰۳	۱۲۰	۱۵۰	AP5 ^۰
۰	۱	۰	۰	۰	۱	۴	۵	۴	۵	۲۵۱	۲۵۷	۱۵۰	۱۵۰	AP11 ^۰
-۸	-۹	-۳۷	-۴۰	-۲۹	-۳۱	۴	۳	۴	۳	۱۹۰	۲۰۱	۱۵۰	۱۸۰	JP5 ^۰
-۲۳	-۲۲	-۵۰	-۴۸	-۳۸	-۳۹	-۱	۰	-۱	۰	۲۱۶	۲۱۴	۲۱۰	۲۱۰	JW5 ^۰
۲۵	۲۴	۵۰	۴۸	۳۸	۳۹	۲۶	۳۰	۲۶	۳۰	CH		بیشینه‌ی درصد اختلاف هر یک از مدل‌ها با مدل CH		

* بارگذاری دور از گسل. ** بارگذاری نزدیک گسل.



شکل ۸. نمودار انرژی اتلافی خمیری - چرخه‌ی بارگذاری برای فولاد IR-ST37.

- روند خط‌ها در پیش‌بینی این کمیت فقط به انتخاب مدل سخت‌شدگی بستگی دارد و مستقل از نوع بارگذاری (استفاده از پروتکل دور و یا نزدیک گسل) است.
- مشاهده می‌شود که در بیشتر موارد، مدل‌های سخت‌شدگی همسان‌گرد لحظه‌ی شروع ترک را دیرتر و یا هم‌زمان با مدل سخت‌شدگی ترکیبی پیش‌بینی می‌کنند. برخلاف این، مدل‌های سخت‌شدگی پویا در بیشتر موارد زمان شروع ترک را زودتر پیش‌بینی می‌کنند.
- در صورتی که اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد در منحنی تک‌محوری تنش - کرنش فولاد قابل توجه باشد، اختلاف پیش‌بینی مدل سخت‌شدگی ترکیبی با مدل‌های سخت‌شدگی همسان‌گرد نسبت به مدل‌های سخت‌شدگی خطی و غیرخطی پویا کمتر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار اثر فرضیات سخت‌شدگی فولاد در مدل رفتاری خمیری مورد استفاده در معیارهایی مانند بیشینه‌ی نیروی ایجاد شده در عضو سازه‌ی، میزان استهلاک انرژی، و زمان آغاز گسیختگی مورد بررسی قرار گرفته است. دو پروتکل بارگذاری دور و نزدیک گسل به نمونه‌ی مورد بررسی اعمال شده است. تحلیل‌ها برای ۶ نوع فولاد با خواص سخت‌شدگی متفاوت و با در نظر گرفتن ۶ فرضیه‌ی مختلف در مدل رفتاری انجام شده است. برخی از این فرضیات همان نمونه‌هایی هستند که در اغلب تحلیل‌های مهندسی استفاده می‌شوند. مدل سخت‌شدگی ترکیبی غیرخطی

گسل فولاد، با توجه به اینکه اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد در ابتدای جریان خمیری فعال می‌شود، مقدار انرژی اتلافی خمیری نسبت به مدل سخت‌شدگی ترکیبی کمتر پیش‌بینی می‌شود. با ادامه‌ی بارگذاری و اشباع اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد، مقدار پیش‌بینی شده در چرخه‌های انتهایی از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل سخت‌شدگی ترکیبی بیشتر می‌شود. همچنین در مدل‌های سخت‌شدگی خطی همسان‌گرد و پویا با توجه به ضریب خمیری کوچک در این دو مدل در چرخه‌های ابتدایی، جریان خمیری بیشتری رخ می‌دهد، اما با ادامه‌ی بارگذاری این روند معکوس می‌شود.

• با توجه به هندسه‌ی اتصال مورد مطالعه، در آغاز جریان خمیری، تعداد کمی از المان‌ها وارد ناحیه‌ی خمیری می‌شوند. بنابراین میزان استهلاک انرژی مدل‌های مختلف، تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارند.

• در صورتی که اثر سخت‌شدگی همسان‌گرد در منحنی تک‌محوری تنش - کرنش فولاد قابل توجه باشد، اختلاف پیش‌بینی مدل سخت‌شدگی ترکیبی با مدل‌های سخت‌شدگی خطی و غیرخطی همسان‌گرد نسبت به مدل‌های سخت‌شدگی خطی و غیرخطی پویا کمتر می‌شود.

۴.۴. معیار زمان شروع ترک

در جدول ۴، شماره‌ی چرخه‌ی شروع ترک، برای هر یک از مدل‌های سخت‌شدگی خمیری محاسبه شده است. با توجه به جدول مذکور، این مطالب قابل برداشت است:

جدول ۴. شماره‌ی چرخه‌ی شروع ترک با فرض سطح شروع ترک در مدل CH.

مدل سخت‌شدگی خمیری												نام فولاد
NLKH		LKH		LIH		IH-T۲		IH-T۱		CH		
NF	FF	NF	FF	NF	FF	NF	FF	NF	FF	NF	FF	
۲۸	۳۳	۲۷	۳۲	۳۲	۳۶	۳۲	۳۶	۳۳	۳۶	۳۲	۳۶	IR-ST۳۷
۲۸	۳۲	۲۸	۳۲	۳۳	۳۷	۳۳	۳۷	۳۳	۳۷	۳۰	۳۵	AW۵۰
۲۷	۳۳	۲۳	۳۳	۲۹	۳۳	۲۹	۳۳	۲۹	۳۳	۲۸	۳۳	AP۵۰
۲۹	۳۳	۲۹	۳۳	۳۰	۳۳	۳۰	۳۴	۳۰	۳۴	۲۹	۳۳	AP۱۱۰
۲۹	۳۴	۲۵	۳۲	۲۸	۳۴	۲۹	۳۴	۲۹	۳۴	۳۰	۳۵	JP۵۰

بنابراین در صورتی که شبیه‌سازی عددی فولاد بدون توجه به رفتار واقعی آن صورت پذیرد و اثرات ترکیبی سخت‌شدگی پویا و همسان‌گرد در نظر گرفته نشود، خطای قابل توجهی در برآورد مدل عددی از کمیت‌های نیرو، انرژی اتلافی خمیری و کرنش خمیری معادل بیشینه قابل انتظار است. در این نوشتار نتایج نشان داده است که در برخی موارد خطاها از مرز ۵٪ هم عبور می‌کنند، که به هیچ عنوان قابل اغماض نیست. این نکته توجه جامعه‌ی مهندسان و دانشگاهی را به موضوع شبیه‌سازی دقیق‌تر فولاد می‌طلبد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه به منظور کالیبره‌کردن مدل سخت‌شدگی ترکیبی، نیاز به انجام آزمایش چرخه‌ی تک‌محوری است، در صورت عدم دسترسی به نتایج این آزمایش، این بررسی ابتدایی توصیه می‌شود: دو تحلیل با فرض‌های سخت‌شدگی غیرخطی پویا و همسان‌گرد صورت گیرد، در صورتی که اختلاف پاسخ‌های دو تحلیل مذکور کوچک باشد، به معنی آن است که نتایج تحلیل به مدل سخت‌شدگی حساسیت زیادی ندارد و بنابراین می‌توان به نتایج حاصل از این دو فرضیه اطمینان کرد. در این حالت با توجه به اینکه فرض سخت‌شدگی غیرخطی پویا اغلب تحلیلی در جهت اطمینان ارائه می‌کند، بهتر است از این فرضیه استفاده شود.

چابوچی به عنوان یک مدل توانمند به عنوان مدل مرجع به کار رفته است. در محدوده‌ی اتصال مورد بررسی، پروتکل‌های بارگذاری به کار رفته، فولادهای مصرفی و مدل‌های سخت‌شدگی خمیری مورد مطالعه در این نوشتار، نتایج اصلی به این شرح حاصل شده است:

- روند خطاها در پیش‌بینی کمیت‌های مقاومت، انرژی استهلاکی و زمان آغاز گسیختگی، فقط به انتخاب مدل سخت‌شدگی بستگی دارد و مستقل از نوع بارگذاری (استفاده از پروتکل دور و یا نزدیک گسل) است.
- معیارهای مقاومت و زمان شروع ترک، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان حساسیت نسبت به انتخاب مدل سخت‌شدگی خمیری را دارند.
- به‌طور کلی با افزایش سهم سخت‌شدگی همسان‌گرد در منحنی تک‌محوری تنش - کرنش فولاد، اختلاف مدل‌های سخت‌شدگی همسان‌گرد با مدل سخت‌شدگی ترکیبی در پیش‌بینی مقاومت نهایی اتصال، ظرفیت استهلاک انرژی و زمان شروع ترک کاهش می‌یابد و بالعکس.

پانویس‌ها

1. cyclic
2. strain hardening
3. kinematic
4. isotropic
5. constitutive model
6. multi-surface models
7. two-surface models
8. endochronic models
9. elastic-perfectly plastic
10. Bauschinger effect
11. cyclic hardening/softening
12. ratchetting
13. relaxation
14. accumulated (effective) plastic strain
15. Prager's hardening rule
16. Armstrong-Frederick hardening rule
17. dynamic recovery

منابع (References)

1. Khan, A.S. and Huang, S., *Continuum Theory of Plasticity*, John Wiley & Sons, New York, pp. 119-238 (1995).
2. McDowell, D.L. "The significance of nonproportional loading tests for characterization of cyclic response of metals", *Proc. 1985 Spring Conference on Experimental Mechanics, Society for Experimental Stress Analysis*, Las Vegas, pp. 229-236 (1985).
3. Salawdeh, S. and Goggins, J. "Numerical simulation for steel brace members incorporating a fatigue model", *Engineering Structures*, **46**, pp. 332-349 (2013).
4. Wijesundara, K.K., Rassathi, G.A., Nascimbene, R. and Bolognini, D. "Seismic performance of brace-beam-column connections in concentrically braced frames", In *Structures Congress. ASCE, Florida, United States*, pp. 930-942 (2010).
5. Yoo, J.H., Lehman, D.E. and Roeder, C.W. "Influence of connection design parameters on the seismic perfor-

mance of braced frames”, *Journal of Constructional Steel Research*, **64**(6), pp. 607-623 (2008).

6. Clark, K.A. “Experimental performance of multi-story X-braced SCBF systems” PhD Dissertation, University of Washington (2009).
7. Asgarian, B. and Moradi, S. “Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces”, *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(1), pp. 65-74 (2011).
8. Yoo, J.H., Roeder, C.W. and Lehman, D.E. “Simulated behavior of multi-story X-braced frames”, *Engineering Structures*, **31**(1), pp. 182-197 (2009).
9. Zhang, W., Huang, M., Zhang, Y. and Sun, Y. “Cyclic behavior studies on I-section inverted V-braces and their gusset plate connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(3), pp. 407-420 (2011).
10. Yoo, J.H., Roeder, C.W. and Lehman, D.E. “Analytical performance simulation of special concentrically braced frames”, *Journal of Structural Engineering*, **134**(6), pp. 881-889 (2008).
11. Berman, J.W. and Bruneau, M. “Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames”, *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1929-1938 (2007).
12. Ferrario, F. “Analysis and modelling of the seismic behaviour of high ductility steel-concrete composite structures”, PhD Dissertation, University of Trento, Italy (2004).
13. Ye, Y., Hajjar, J.F., Dexter, R.D., Prochnow, S.C. and Cotton, S.C. “Nonlinear analysis of continuity plate and doubler plate details in steel moment frame connections”, Msc Thesis, University of Minnesota (2000).
14. Abaqus analysis user's manual, III (2009).
15. Bari, S. and Hassan, T. “Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation”, *International Journal of Solids and Structures*, **16**(3-4), pp. 381-409 (2000).
16. Sazmand, E. and Aghakouchak, A. “Modeling the panel zone in steel mr frames composed of built-up columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 54-68 (2012).
17. ATC-24, *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, Report No. ATC-24, CA (1992).
18. Krawinkler, H., Gupta, A., Medina, R., and Luco, N., *Development of Loading Histories for Testing of Steel Beam-to-Column Assemblies*, SAC Background Report SAC/BD-00/10 (2000-a).
19. Shabanian, M. “Ultra low cycle fatigue life estimation of wrinkled energy dissipators”, MSc Thesis, Tarbiat Modares University (2010) (in Persian).
20. Kanvinde, A.M. “Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures”, PhD Dissertation, Stanford University (2004).

هر فولاد استفاده می‌شوند.

مقادیر تنش - کرنش خمیری که به صورت پر رنگ نمایش داده شده‌اند، تنش حقیقی-کرنش خمیری حقیقی نظیر تنش بیشینه‌ی مهندسی هستند.

ب) ظرفیت استهلاک انرژی فولادهای مورد مطالعه

در چرخه‌های ابتدایی بارگذاری، به دلیل مقدار پایین جریان خمیری، اعداد مربوط به درصد اختلاف چندان قابل اعتنا نیست.

پیوست

الف) مشخصات خمیری فولادهای مورد مطالعه

در جدول الف) مقادیر تنش-کرنش خمیری هر یک از فولادهای مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین داده‌هایی که به صورت پر رنگ مشخص شده‌اند، مربوط به تعریف سخت‌شدگی خطی پویا و همسان‌گرد هستند. برای تعریف سخت‌شدگی ترکیبی، غیرخطی پویا و غیرخطی همسان‌گرد نوع اول تمامی داده‌های ارائه شده برای

جدول الف) - مقادیر منحنی تنش حقیقی کرنش خمیری حقیقی فولادهای مورد مطالعه در نوشتار.

[20] JW50		[20] JP50		[20] AP110		[20] AP50		[20] AW50		[19] IR-ST37	
کرنش	تنش	کرنش	تنش	کرنش	تنش	کرنش	تنش	کرنش	تنش	کرنش	تنش
خمیری	(MPa)	خمیری	(MPa)	خمیری	(MPa)	خمیری	(MPa)	خمیری	(MPa)	خمیری	(MPa)
0.000	310	0.000	310	0.000	758	0.000	345	0.000	345	0.000	281
0.020	724	0.036	547	0.036	796	0.036	589	0.008	345	0.021	352
0.043	513	0.081	554	0.081	816	0.081	609	0.023	417	0.051	433
0.106	573	0.136	587	0.106	837	0.106	630	0.048	479	0.101	495
0.600	689	1.330	614	0.136	918	0.136	642	0.072	525	0.151	532
2.330	786	2.330	910	1.330	945	0.142	645	1.195	1034	0.168	541
3.330	910	3.330	924	2.330	958	1.330	827	8.563	3447	1.000	800

جدول ۱ ب) شماره‌ی چرخه‌ی شروع ترک با فرض سطح شروع ترک در مدل CH.

نام فولاد	مدل سخت‌شدگی خمیری	شماره چرخه																			
		بارگذاری دورازگسل										بارگذاری نزدیک گسل									
		۳۷	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۳۲	۳۰	۲۸	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۲۰	۲۳	۲۵	۲۷	۲۹	۳۰	۳۱
IR-ST27	پیش‌بینی مدل (KN.m) CH	۴۸۰	۴۳۷	۳۵۳	۲۸۳	۲۱۸	۱۶۶	۸۶	۳۶	۶	۰	۴۸۰	۴۳۷	۳۵۳	۲۸۳	۲۱۸	۱۶۶	۸۶	۳۶	۶	۰
	درصد IH-T1	۷	۷	۶	۵	۴	۴	۲	۰	-۷	-۱۸	۷	۷	۶	۵	۴	۴	۲	۰	-۷	-۱۸
	درصد IH-T2	۵	۵	۵	۴	۴	۳	۲	۰	-۷	-۱۸	۵	۵	۵	۴	۴	۳	۲	۰	-۷	-۱۸
	اختلاف با مدل CH LIH	۶	۶	۶	۶	۵	۵	۴	۴	۴	۵	۶	۶	۶	۶	۵	۵	۴	۴	۴	۵
	اختلاف با مدل CH LKH	-۱۷	-۱۶	-۱۵	-۱۳	-۱۱	-۹	-۵	۰	۱۰	۱۰	-۱۷	-۱۶	-۱۵	-۱۳	-۱۱	-۹	-۵	۰	۱۰	۱۰
NLKH	-۱۸	-۱۸	-۱۶	-۱۵	-۱۳	-۱۱	-۸	-۴	۵	۵	-۱۸	-۱۸	-۱۶	-۱۵	-۱۳	-۱۱	-۸	-۴	۵	۵	
AW50	پیش‌بینی مدل (KN.m) CH	۴۵۹	۴۱۸	۳۳۶	۲۶۸	۲۰۴	۱۵۵	۷۶	۲۹	۳	۰	۴۵۹	۴۱۸	۳۳۶	۲۶۸	۲۰۴	۱۵۵	۷۶	۲۹	۳	۰
	درصد IH-T1	۸	۸	۶	۵	۴	۳	۱	۰	۰	-۴	۸	۸	۶	۵	۴	۳	۱	۰	۰	-۴
	درصد IH-T2	۸	۸	۶	۵	۴	۳	۱	۰	۰	-۴	۸	۸	۶	۵	۴	۳	۱	۰	۰	-۴
	اختلاف با مدل CH LIH	۵	۵	۴	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۰	۵	۵	۴	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۰
	اختلاف با مدل CH LKH	-۸	-۸	-۷	-۶	-۵	-۵	-۳	۰	۳	۲	-۸	-۸	-۷	-۶	-۵	-۵	-۳	۰	۳	۲
NLKH	-۸	-۷	-۷	-۶	-۵	-۴	-۲	۱	۴	۳	-۸	-۷	-۷	-۶	-۵	-۴	-۲	۱	۴	۳	
AP50	پیش‌بینی مدل (KN.m) CH	۴۱۱	۳۷۱	۲۸۹	۲۲۴	۱۶۴	۱۲۰	۵۳	۱۷	۲	۰	۴۱۱	۳۷۱	۲۸۹	۲۲۴	۱۶۴	۱۲۰	۵۳	۱۷	۲	۰
	درصد IH-T1	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۲۰	۲۲	۳۰	۴۳	۶۳	۳۰	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۲۰	۲۲	۳۰	۴۳	۶۳	۳۰
	درصد IH-T2	۱۴	۱۵	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۳۰	۴۳	۶۳	۳۰	۱۴	۱۵	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۳۰	۴۳	۶۳	۳۰
	اختلاف با مدل CH LIH	۲۱	۲۲	۲۴	۲۷	۳۰	۳۴	۴۵	۶۳	۹۹	۵۶	۲۱	۲۲	۲۴	۲۷	۳۰	۳۴	۴۵	۶۳	۹۹	۵۶
	اختلاف با مدل CH LKH	۱۴	۱۵	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۳۰	۴۳	۶۳	۳۰	۱۴	۱۵	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۳۰	۴۳	۶۳	۳۰
NLKH	۲۱	۲۲	۲۴	۲۷	۳۰	۳۴	۴۵	۶۳	۹۹	۵۶	۲۱	۲۲	۲۴	۲۷	۳۰	۳۴	۴۵	۶۳	۹۹	۵۶	
AP110	پیش‌بینی مدل (KN.m) CH	۳۴۰	۳۰۱	۲۲۳	۱۶۴	۱۱۱	۷۴	۲۴	۴	۰	۰	۳۴۰	۳۰۱	۲۲۳	۱۶۴	۱۱۱	۷۴	۲۴	۴	۰	۰
	درصد IH-T1	۳	۳	۱	۰	-۲	-۲	-۲	-۱	-۱	۰	۳	۳	۱	۰	-۲	-۲	-۲	-۱	-۱	۰
	درصد IH-T2	۳	۳	۱	۰	-۲	-۲	-۲	-۱	-۱	۰	۳	۳	۱	۰	-۲	-۲	-۲	-۱	-۱	۰
	اختلاف با مدل CH LIH	۴	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۰	۴	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۰
	اختلاف با مدل CH LKH	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۱	۰	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۱	۰
NLKH	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
JP50	پیش‌بینی مدل (KN.m) CH	۴۳۰	۳۸۹	۳۰۶	۲۳۹	۱۷۹	۱۳۲	۶۲	۲۲	۳	۰	۴۳۰	۳۸۹	۳۰۶	۲۳۹	۱۷۹	۱۳۲	۶۲	۲۲	۳	۰
	درصد IH-T1	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۷	۲۱	۲۹	۴۱	۲۶	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۷	۲۱	۲۹	۴۱	۲۶
	درصد IH-T2	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۷	۲۱	۲۹	۴۱	۲۶	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۷	۲۱	۲۹	۴۱	۲۶
	اختلاف با مدل CH LIH	۵	۶	۹	۱۲	۱۶	۲۰	۳۰	۴۷	۸۹	۶۵	۵	۶	۹	۱۲	۱۶	۲۰	۳۰	۴۷	۸۹	۶۵
	اختلاف با مدل CH LKH	-۴	-۳	۱	۵	۹	۱۴	۲۶	۴۵	۹۱	۶۶	-۴	-۳	۱	۵	۹	۱۴	۲۶	۴۵	۹۱	۶۶
NLKH	-۷	-۷	-۶	-۵	-۴	-۳	۰	۳	۱۱	۱۲	-۷	-۷	-۶	-۵	-۴	-۳	۰	۳	۱۱	۱۲	
JW50	پیش‌بینی مدل (KN.m) CH	۴۵۰	۴۰۷	۳۲۰	۲۵۰	۱۸۶	۱۳۸	۶۴	۲۲	۲	۰	۴۵۰	۴۰۷	۳۲۰	۲۵۰	۱۸۶	۱۳۸	۶۴	۲۲	۲	۰
	درصد IH-T1	۸	۸	۸	۹	۱۰	۱۲	۱۶	۲۴	۴۴	۵۶	۸	۸	۸	۹	۱۰	۱۲	۱۶	۲۴	۴۴	۵۶
	درصد IH-T2	۸	۸	۸	۹	۱۰	۱۲	۱۶	۲۴	۴۴	۵۶	۸	۸	۸	۹	۱۰	۱۲	۱۶	۲۴	۴۴	۵۶
	اختلاف با مدل CH LIH	-۱	۰	۳	۶	۱۰	۱۴	۲۶	۴۵	۱۰۵	۱۱۵	-۱	۰	۳	۶	۱۰	۱۴	۲۶	۴۵	۱۰۵	۱۱۵
	اختلاف با مدل CH LKH	-۸	-۷	-۳	۰	۵	۹	۲۲	۴۴	۱۰۶	۱۱۷	-۸	-۷	-۳	۰	۵	۹	۲۲	۴۴	۱۰۶	۱۱۷
NLKH	-۱۲	-۱۱	-۹	-۶	-۳	۰	۸	۲۰	۵۸	۸۵	-۱۲	-۱۱	-۹	-۶	-۳	۰	۸	۲۰	۵۸	۸۵	