

The effect of using different types of material hardening models on the accuracy of modeling the cyclic behavior of steel components and RBS connection

Nasibe Naraki¹, Ehsan Dehghani², Seyed Ahmad Mobinipour³, Seyed Rohollah Hoseini Vaez⁴

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

ABSTRACT

The focus on new connections, including the reduced beam section (RBS), and their ductility investigations in the plastic range increased after the disastrous earthquakes of Northridge and Kobe and the observation of the brittle behavior of moment steel frame connections. On the other hand, the importance of the cyclic behavior of steel components and its difference from the uniform loading state has led to the development of several models for modeling cyclic loading plastic deformation in recent years. In this paper, the investigation of the methods of cyclic behavior modeling and RBS connection simulation under cyclic loads by using the material's different hardening behaviors in the Abaqus software have been taken into account with considering the high cost of laboratory modeling, the progress of finite element software, and the importance of accurate and realistic modeling. Moreover, the numerical hysteresis curve has been compared with the experimental curve. Various behaviors of modeling, including the model with elastic – perfect plastic hardening, isotropic, kinematic, and combined Armstrong-Frederick models with parameters provided by other researchers, have been investigated. The obtained results indicate that the hysteresis curve of the model with parametric combined hardening is more compatible with the experimental hysteresis curve, and the surface under the hysteresis diagram in the kinematic hardening state is closer to the parametric combined hardening model than in the isotropic and elastic – perfect plastic states.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 October 2023

Revise Date: 12 January 2024

Accept Date: 25 January 2024

Keywords:

Cyclic loading

Combined hardening

Kinematic hardening

Isotropic hardening

FE

RBS connection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.418991.3232>

*Corresponding author: Seyed Rohollah Hoseini Vaez

Email address: hoseinivaez@qom.ac.ir

تاثیر به کارگیری انواع مختلف مدل‌های سخت شونده‌ی مواد بر دقت مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای اجزای فولادی و اتصال RBS

نصیبه نارکی^۱، احسان دهقانی^۲، سید احمد مبینی پور^۲، سید روح الله حسینی واعظ^{۴*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

پس از زلزله‌های فاجعه بار نورتریج و کوبه و مشاهده‌ی رفتار ترد و شکننده اتصالات قاب‌های خمشی فولادی، تمرکز بر روی اتصالات جدید، از جمله تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)، و بررسی شکل‌پذیری آنها در محدوده پلاستیک افزایش یافت. از طرفی اهمیت رفتار چرخه‌ای اجزای فولادی و تفاوت آنها با حالت بارگذاری یکنواخت، منجر به توسعه چندین مدل برای مدل‌سازی تغییر شکل پلاستیک بارگذاری چرخه‌ای در سال‌های اخیر شده است. با توجه به پرهزینه بودن مدل‌سازی آزمایشگاهی و پیشرفت نرم‌افزارهای اجزای محدود و اهمیت مدل‌سازی دقیق و منطبق بر واقعیت، در این مطالعه به بررسی روش‌های مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای مواد و مدل‌سازی اتصال RBS تحت بارهای چرخه‌ای با استفاده از رفتارهای سخت شونده‌ی مختلف مواد در نرم‌افزار اباکوس پرداخته و منحنی هیستریزیس عددی با منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی مقایسه شده است. مدل‌های مختلف مدل‌سازی رفتار مواد شامل مدل رفتاری با سخت‌شوندگی الاستیک-پلاستیک کامل، ایزوتروپیک، سینماتیک و ترکیبی آمستراگ فردریک با پارامترهای ارائه شده توسط سایر محققین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده، حاکی از آن است که منحنی هیستریزیس مدل‌سازی با سخت‌شوندگی ترکیبی پارامتری، انطباق بیشتری با منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی دارد و سطح زیر نمودار هیستریزیس در حالت سخت‌شوندگی سینماتیک نسبت به حالت ایزوتروپیک و الاستیک-پلاستیک کامل به مدل سخت‌شوندگی ترکیبی پارامتری نزدیک‌تر است.

کلمات کلیدی: بارگذاری چرخه‌ای، سخت‌شوندگی ترکیبی، سخت‌شوندگی سینماتیک، سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، FE، اتصال RBS

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.418991.3232	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.418991.3232	۱۴۰۳/۰۶/۳۱	۱۴۰۲/۱۱/۰۵	۱۴۰۲/۱۱/۰۵	۱۴۰۲/۱۰/۲۲	۱۴۰۲/۰۷/۱۶
سید روح الله حسینی واعظ Hoseinivaez@qom.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

با پیشرفت علوم کامپیوتر و نرم‌افزارهای المان محدود (FE)^۱ و سرعت و دقت محاسباتی بالای این نرم‌افزارها و با توجه به پرهزینه بودن مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، نحوه‌ی درست مدل‌سازی عددی برای تطابق بیشتر با مدل آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله موارد مهم در مدل‌سازی عددی، تعریف درست رفتار مصالح مخصوصاً در ناحیه پلاستیک است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که رفتار چرخه‌ای مصالح فولادی و شکل‌پذیر به دلیل وجود پدیده‌هایی مانند سخت‌شوندگی، اثر باوشینگر^۲ و به طور کلی پلاستیسیته، با رفتار تک محوری متفاوت است. برخلاف بارگذاری یکنواخت^۳، بارگذاری چرخه‌ای^۴ پیچیدگی‌های بیشتری را در رفتار تنش-کرنش مواد فولادی ایجاد می‌کند و تست‌های تک محوری به تنهایی برای توصیف دقیق پاسخ مواد تحت بارگذاری چرخه‌ای کافی نیستند و استفاده از مدل‌های تخصصی را ضروری می‌سازد [۱].

در مطالعات عددی بررسی رفتار مواد تحت بارهای چرخه‌ای، مدل‌های رفتاری مختلفی در نظر گرفته شده است که آراوجو^۵ شرح جامعی از مدل‌های مواد موجود همراه با پیشینه‌ی ریاضی و مکانیکی آن‌ها را ارائه کرده است [۲]. همچنین مگنوس دالبرگ^۶ و پیتر سیگل^۷ به بررسی محدودیت‌ها و قابلیت‌های مدل‌هایی که به طور گسترده در برنامه‌های کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پرداخته‌اند [۳].

مواد پلاستیکی دارای محدوده ارتجاعی هستند که در آن به روش کاملاً الاستیک پاسخ می‌دهند. مرز این محدوده در فضای تنش یا کرنش، سطح تسلیم نامیده می‌شود. سطح اولیه تسلیم می‌تواند اندازه و شکل خود را در فضای تنش تغییر دهد. هنگامی که سطح تسلیم منبسط می‌شود گفته می‌شود که ماده سخت شده است و هنگامی که منقبض می‌شود می‌گویند ماده نرم شده است. اگر ماده مورد نظر، سخت‌شونده کرنشی شود سطح تسلیم مطابق با قانون سخت‌شوندگی (یعنی ایزوتروپیک^۸، سینماتیک^۹ و ترکیبی^{۱۰}) برای مقادیر تنش فراتر از تسلیم اولیه تغییر می‌کند. از آنجایی که تعیین مکان دقیق سطح تسلیم دشوار است، معیارهای تسلیم زیادی پیشنهاد شده است که متداول‌ترین نوع سطوح مورد نظر برای فولادها، فون میسز^{۱۱} است که در آن از دو حالت متغیر ایزوتروپیک و سینماتیک استفاده می‌شود [۱].

برای پلاستیسیته مستقل از زمان، تغییر شکل پلاستیک تنها در صورتی می‌تواند رخ دهد که حالت تنش به گونه‌ای باشد که [۳]:

$$f(\sigma) = 0 \quad (1)$$

علاوه بر این در طول بارگذاری، تغییر تابع تسلیم، df ، باید برابر صفر باشد.

$$df = \dot{f} = 0 \quad (2)$$

در شکل‌پذیری میسز فرض بر این است که پلاستیسیته توسط متغیر دوم، J_2 ، تانسور تنش انحرافی کنترل می‌شود. تنش انحرافی، \underline{s} ، برابر با تنش تنش‌های واقعی، $\underline{\sigma}$ ، است با این تفاوت که تنش‌های متوسط (تنش هیدرواستاتیک، σ_m) از آن کم شده است.

¹ Finite Elements
² Bauschinger Effect
³ Monotonic Loading
⁴ Cyclic Loading
⁵ Araujo
⁶ Magnus Dahlberg
⁷ Peter Segle
⁸ Isotropic
⁹ kinematic
¹⁰ combined
¹¹ von Mises

تنش معادل میسز بر اساس تنش انحرافی :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}SS} \quad (3)$$

متغیر ایزوتروپیک باعث تغییر اندازه یا گسترش سطح تسلیم می‌شود که به تنهایی قادر به توصیف یک رفتار چرخه‌ای که شامل تغییر شکل چرخه‌ای مکرر است، نیست. بنابراین، این نوع سخت شدن برای بارگذاری سیکلی اهمیت کمتری دارد. با این حال سخت شدن ایزوتروپیک گاهی اوقات به منظور مدل‌سازی جنبه‌هایی از مکانیزم سخت شدن چرخه‌ای استفاده می‌شود. یک فرمول رایج برای توصیف شعاع سطح تسلیم به عنوان تابعی از کرنش پلاستیکی معادل انباشته شده به صورت زیر است [۳]:

$$R = R(\varepsilon_{eq}^p) = \sigma_0 + K(\varepsilon_{eq}^p) \quad (4)$$

که σ_0 ، حد تنش الاستیک و K پارامتر سخت‌شوندگی است.

شعاع R با افزایش ε_{eq}^p در حین بارگذاری، گسترش می‌یابد.

و ε_{eq}^p یک کرنش پلاستیکی معادل است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{eq}^p = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon^p\varepsilon^p} \quad (5)$$

که ε^p ، کرنش پلاستیک پیشین^{۱۲} است.

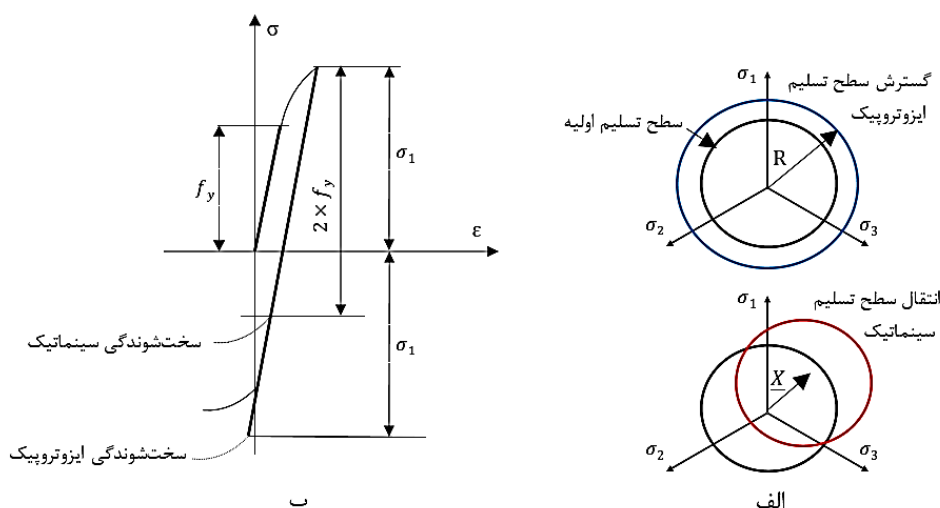
در حالی که متغیر سینماتیکی باعث انتقال سطح تسلیم، بدون تغییر اندازه یا گسترش آن، در فضای تنش انحرافی می‌شود که بر اساس نحوه‌ی انتقال سطح تسلیم، مدل‌های سینماتیکی مختلفی توسعه یافته‌اند که تفاوت بین این مدل‌ها در بیان چگونگی تکامل مرکز، X ، است. پارامتر X گاهی اوقات تانسور تنش برگشتی نامیده می‌شود [۳].

اوتوسن^{۱۳} و همکاران در مرجع [۴] مبانی نظری مدل‌های پلاستیسیته را به صورت عمیق مورد بررسی قرار داده‌اند.

شکل ۱ تفاوت بین سخت‌شدگی ایزوتروپیک و سینماتیک و نحوه‌ی تغییر سطح تسلیم را برای نمونه فولادی بارگذاری شده با چرخه‌ی تک محوری نشان می‌دهد [۱].

¹² previous plastic strain

¹³ Ottosen



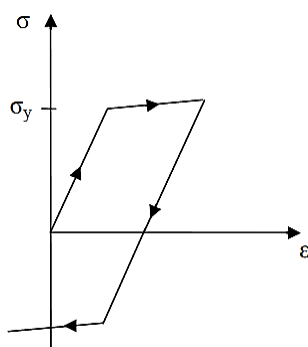
شکل ۱: سخت‌شدگی ایزوتروپیک و سینماتیک نمونه فولادی بارگذاری شده با چرخه‌ی تک محوری، الف) نحوه‌ی گسترش سطح تسلیم در فضای تنش سه بعدی، ب) نمودار تنش و کرنش تک محوری [۳، ۱]

در برنامه‌های المان محدود، FE، مانند آباکوس^{۱۴} و انسیس^{۱۵}، مدل‌های سینماتیک مختلفی استفاده شده است که در ذیل شرح مختصری از آن آورده شده است.

۱- مدل سخت شدن سینماتیکی خطی (LKIN^{۱۶}): ساده ترین فرض برای تکامل تانسور تنش برگشتی^{۱۷}، $d\underline{X}$ ، این است که فرض کنیم به صورت خطی با کرنش‌های پلاستیکی تغییر می‌کند. این فرض به گفته ملان پیگر^{۱۸} چنین است [۳]:

$$d\underline{X} = \frac{2}{3} C d\varepsilon^p \quad (۶)$$

که ε^p کرنش پلاستیک پیشین و C از پارامترهای ماده است که باید کالیبره شود. این مدل می‌تواند حلقه‌های پایدار را در بارگذاری چرخه‌ای، از جمله اثر باوشینگر، توصیف کند. با این حال خطی بودن تقریب اثر باوشینگر را نسبتاً خام می‌کند. در یک حالت خاص، مدل LKIN با مدول مماس صفر، با مدل کاملاً پلاستیکی یکسان خواهد بود [۳].



شکل ۲: سخت شدن سینماتیکی خطی [۳]

^{۱۴} ABAQUS

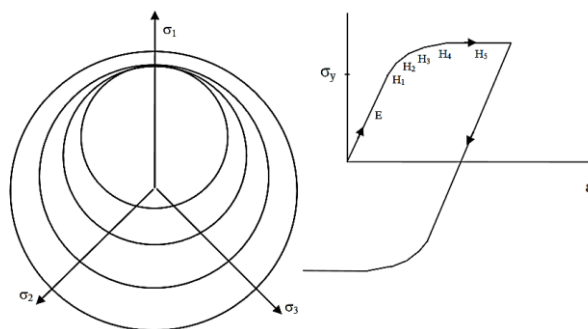
^{۱۵} ANSYS

^{۱۶} Linear kinematic hardening

^{۱۷} back stress

^{۱۸} Melan-Pager

۲- مدل سخت شدن سینماتیک چند خطی (Mroz¹⁹): در مدل سخت شدن سینماتیک چند خطی فرض می شود که سخت شدن مواد در امتداد بخش‌های خطی به صورت تکه‌ای انجام می شود. برای هر قطعه مقدار مدول سخت شدن ثابت، $H_k = d\sigma/d\varepsilon_p$ ، انتخاب شده که σ تنش و ε_p کرنش پلاستیک است. این مشابه استفاده از مجموعه ای از مدل های سینماتیکی خطی با چندین سطح تسلیم است که هر کدام با یک تابع تسلیم توصیف می شوند. این مدل قادر به توصیف دقیق اثر بوشینگر در حلقه‌های چرخه‌ای است. با این حال، این مدل نمی تواند تغییر شکل پیش‌رونده^{۲۰} مواد را توصیف کند که علت این امر به این واقعیت مربوط می شود که مدل همیشه بدون توجه به تنش متوسط، حلقه های متقارن تولید می کند [۳].



شکل ۳: سخت شدن سینماتیک چند خطی [۳]

۳- مدل سخت شدن آرمسترانگ-فردریک^{۲۱} (AF): یک مدل پیچیده تر که رفتار فیزیکی واقعی را بهتر نشان می دهد توسط آرمسترانگ و فردریک در سال ۱۹۶۷ ایجاد شد. اساس این مدل افزودن یک مدت حافظه گذرا^{۲۲} به قانون تکامل برای سخت شدن سینماتیک خطی است. مدل را می توان متشکل از دو سطح تسلیم در نظر گرفت. این مدل در هنگام بارگذاری، تا زمانی که سطح تسلیم با سطح مرزی تماس نداشته باشد، دارای مدول سختی متغیر خواهد بود. هنگامی که سطح داخلی با سطح مرزی تماس پیدا می کند، مدل به طور ایده آل پلاستیکی خواهد بود و مدول پلاستیکی صفر خواهد بود. سطح مرزی در فضای تنش ثابت می شود و می توان نشان داد که حداکثر تنش موثر به صورت زیر است [۵]:

$$\sigma_{eq,max} = \sigma + \frac{C}{\gamma} \quad (7)$$

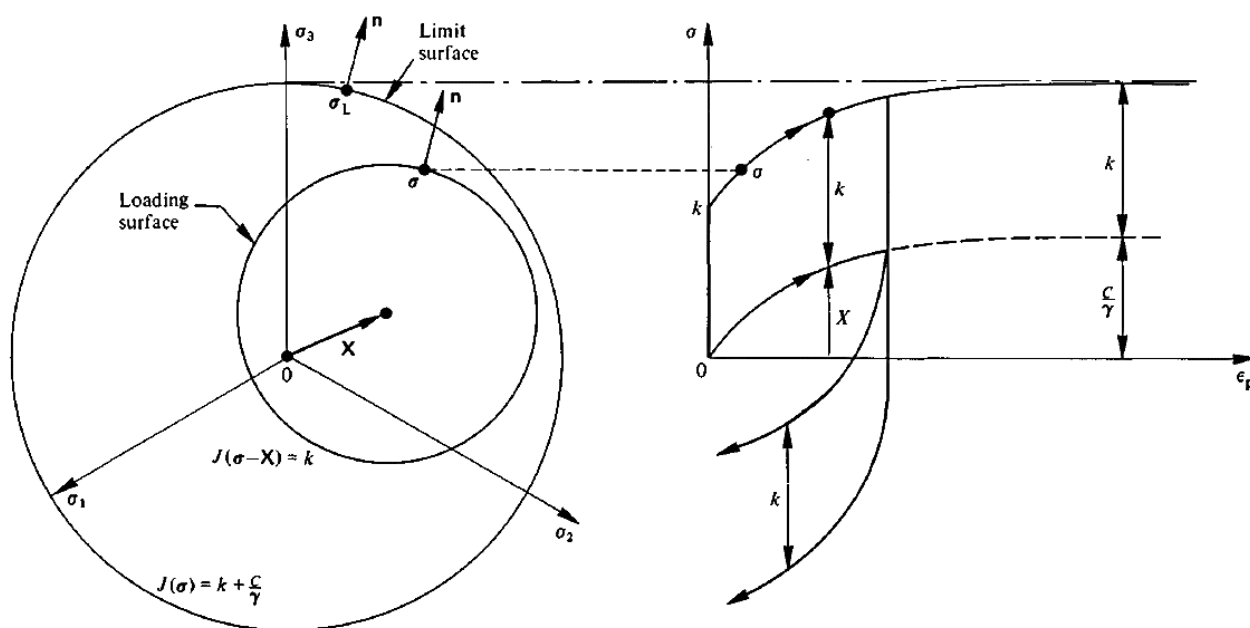
دو پارامتر C و γ پارامترهای ماده ای هستند که باید تعیین شوند.

¹⁹ Multi-Linear kinematic hardening

²⁰ ratcheting

²¹ Armstrong Fredrick

²² fading memory term



شکل ۴: سطح و مرز تسلیم برای مدل AF [۶]

۴- مدل چابوچه^{۲۳}: برای بهبود قابلیت و انعطاف‌پذیری مدل آرمسترانگ-فردریک، مدل AF توسط چابوچه توسعه داده شد. ایده اصلی ترکیبی از چندین مدل سینماتیک غیرخطی است. این مدل دارای همان ویژگی‌های اولیه مدل AF است. توجه داشته باشید که این مدل با مدل AF با $n=1$ که در آن تعداد مدل سینماتیک غیرخطی ترکیب شده است، یکسان می‌شود. افزایش تعداد پارامترها به طور قابل توجهی قابلیت و انعطاف مدل را افزایش می‌دهد. مهم‌تر از همه، از نرخ ثابت تغییر شکل پیش‌روند اجتناب می‌شود و مدل می‌تواند نشان دهنده زوال تغییر شکل پیش‌روند باشد. مدل با $n>1$ گاهی اوقات به عنوان مدل چابوچه افزون شده^{۲۴} معرفی می‌شود [۷].

۵- مدل AF بسته به متغیرهای میدان: می‌توان پارامترهای ماده را، به عنوان جایگزینی برای حالت مدل چابوچه افزون شده، به متغیرهای دیگر وابسته کرد. ون ایتن^{۲۵} و نیلسون^{۲۶} [۸] اجازه می‌دهند تا پارامترهای C و γ به حداکثر محدوده کرنش قبلی، $\Delta \epsilon_{max}^p$ ، بستگی داشته باشند، بنابراین نمایش بهبود یافته سخت شدن چرخه ای را در مقایسه با مدل پایه AF امکان پذیر می‌کند.

مدل‌های سینماتیکی پیشرفته‌تری نیز وجود دارد که در حال حاضر در کدهای تجاری موجود نمی‌باشند. از جمله این موارد می‌توان به مدل اصلاح شده چابوچه [۹]، توسعه بیشتر مدل چابوچه اصلاح شده توسط باری^{۲۷} و همکاران [۱۰]، مدل اونو و وانگ^{۲۸} [۱۱] که بر اساس نمایش چند خطی سینماتیکی است، اشاره کرد. اشکال آشکار این مدل‌ها این است که تعیین پارامترها بسیار پیچیده‌تر می‌شود. اخیراً ری^{۲۹} و همکاران پارامترهای مدل سخت‌شوندگی ترکیبی چابوچه را برای شش ماده مختلف آهنی و غیرآهنی با ساختارهای کریستالی متفاوت از طریق تکنیک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مورد ارزیابی قرار داده و با برازش منحنی‌های تجربی، مقادیر مناسبی را برای پارامترهای سخت‌شوندگی ترکیبی مواد مورد بررسی، ارائه دادند [۱۲].

مدل‌های سینماتیکی را می‌توان با یک مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک ترکیب کرد که برای در نظر گرفتن همزمان سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک از مدل ترکیبی استفاده می‌شود که در آن علاوه بر انتقال سطح تسلیم، دامنه‌ی سطح تسلیم نیز منبسط

²³ Chaboche

²⁴ superimposed Chaboche model

²⁵ Van Eeten

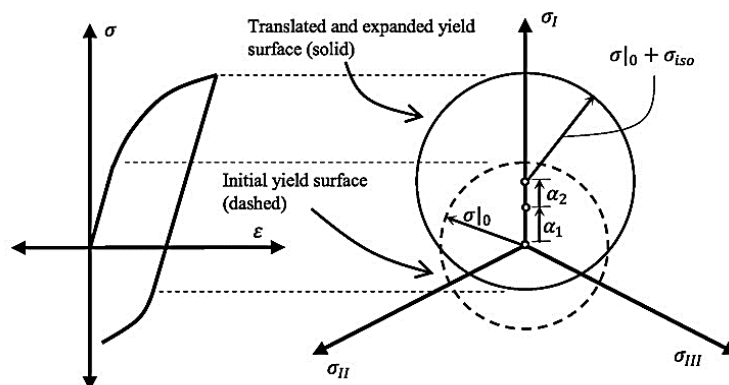
²⁶ Nilsson

²⁷ Bari

²⁸ Ohno-Wang

²⁹ Ray

می‌شود [۶]. یکی از کامل‌ترین مدل‌های ترکیبی ایزوتروپیک و سینماتیک، مدل آمسترانگ فردریک است که سطح تسلیم در فضای تنش‌های وسترگارد^{۳۰} علاوه بر افزایش مساحت، در فضا نیز منتقل می‌شود [۱۳]. شکل ۵ مدل ترکیبی سطح تسلیم فون میسر در فضای تنش سه محوری را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۵: جابجایی و افزایش سطح تسلیم فون میسر در فضای تنش سه محوری [۱۳]

همانطور که اشاره شد مدل سازی دقیق رفتار چرخه‌ای مصالح فولادی و شکل‌پذیر مخصوصاً در ناحیه پلاستیک بسیار حائز اهمیت است. پس از زلزله‌های فاجعه بار نواریج^{۳۱} ۱۹۹۴ و کوبه^{۳۲} ۱۹۹۵ و رفتار ترد و شکننده اتصالات قاب‌های خمشی فولادی، تحقیقات گسترده‌ای بر روی روش‌های جدید طراحی اتصالات فولادی و همچنین بررسی رفتار آن‌ها در بارگذاری چرخه‌ای انجام شد [۱۴-۱۷] که منجر به ارائه ضوابطی برای طراحی شکل‌پذیر اتصالات تیر به ستون شده است [۱۷]. معمولاً طراحی سازه‌های قاب‌های خمشی فولادی به گونه‌ای است که اتصالات تیر به ستون اولین محل وارد شونده به ناحیه پلاستیک باشد لذا با توجه به اهمیت رفتار سازه تحت بارگذاری چرخه‌ای در ناحیه پلاستیک و همچنین به دلیل هزینه‌های بالای مدل‌سازی آزمایشگاهی و نیاز به مدل سازی نرم‌افزاری، ضروریست که مدل سازی دقیق اتصالات تیر به ستون به عنوان نواحی مستعد پلاستیک شوندگی تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

از این رو در سال‌های اخیر تاثیر مدل‌های رفتاری مواد بر رفتار چرخه‌ای اتصالات مختلف توسط سایر محققین مورد بررسی قرار گرفته است از جمله این موارد بررسی مدل‌های رفتاری مختلف بر روی اتصال پیچی تیر به ستون با صفحه انتهایی گسترش یافته توسط محجوب و همکاران [۱۸] و اتصال سیمپسون توسط دیلمی و همکاران [۱۹] است. همچنین آندری کریسان نیز مدل‌های رفتاری مختلف مواد را برای یک قاب یک دهنه که بخشی از یک ساختمان ۱۸ طبقه و دارای ستون‌های صلیبی و تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)^{۳۳} است مورد بررسی قرار داده است [۱]. اخیراً نیز سعیدی و عرفانی رفتار چرخه اتصال تیر RBS به ستون جعبه‌ای را با استفاده از مدل سخت شوندگی ترکیبی مدل سازی کرده و رفتار چرخه آن را مورد بررسی قرار دادند [۲۰].

از آنجایی که اتصال تیر به ستون با مقطع تیر کاهش یافته (RBS) از مقرون به صرفه‌ترین و کاربردی‌ترین اتصالات صلب و از جمله اتصالات از پیش‌تایید شده و مورد تایید آیین‌نامه‌های مختلف [۱۷] می‌باشد، تحقیق بر روی این نوع اتصال در زمینه‌های مختلف، مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. در این مطالعه تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف مواد بر پاسخ چرخه‌ای اتصال تیر به ستون فولادی RBS بررسی شده است. مدل انتخابی برگرفته از مدل آزمایشگاهی گالوسیسی^{۳۴} و همکاران [۱۶] است که در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، نسخه 6.14.2، با مدل‌های رفتاری مختلف مواد مدل‌سازی شده و در انتها برای بررسی تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف مواد بر پاسخ چرخه‌ای اتصال، منحنی‌های هیستریزیس مدل عددی با منحنی هیستریزیس مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است.

³⁰ Westergaard

³¹ Northridge

³² Kobe

³³ Reduce Beam Section

³⁴ Galoussis

۲- مدل سازی عددی و صحت سنجی

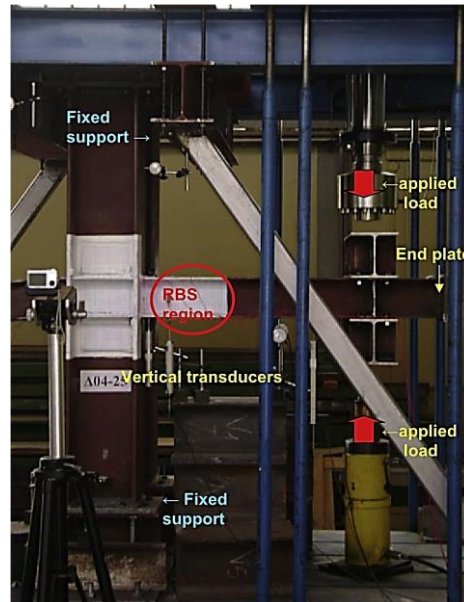
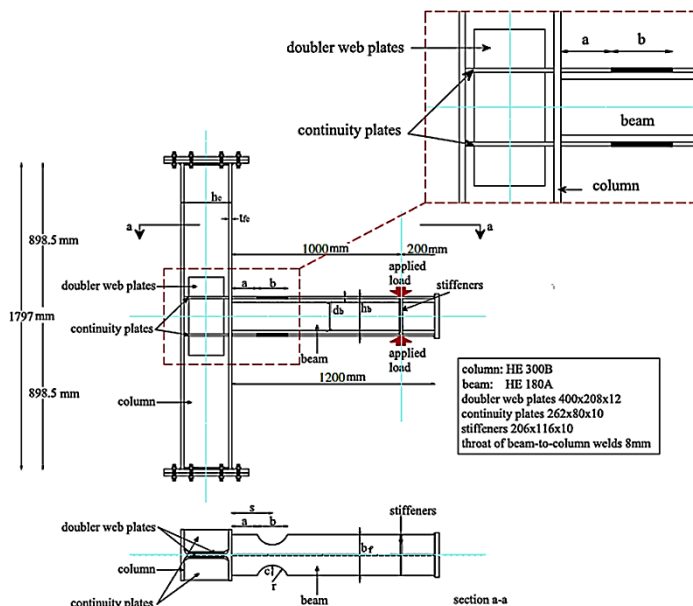
مدل مورد بررسی اتصال تیر به ستون RBS، نمونه RBS_b، برگرفته از مطالعه گالوسپیس است که شامل یک ستون با مقطع HE300B و یک تیر با مقطع HE180A می باشد. مشخصات تیر و ستون و RBS_b به ترتیب در جدول ۱ و ۲ و مشخصات اتصال در شکل ۶ آورده شده است [۱۶].

جدول ۱: مشخصات تیر و ستون [۱۶]

Designation	Depth of section h (mm)	Width of section b (mm)	Thickness		Root radius r (mm)	Area of section A (cm ²)	Mass per metre G (kg/m)	Second moment of area	
			of flange, t _f (mm)	of web, t _w (mm)				Axis z-z I _z (cm ⁴)	Axis y-y I _y (cm ⁴)
HE 180A	171	180	9.5	6	15	45.3	35.5	925	2 510
HE 300B	300	300	19	11	27	149	117	8563	25 170

جدول ۲: مشخصات قسمت کاهش یافته تیر RBS_b [۱۶]

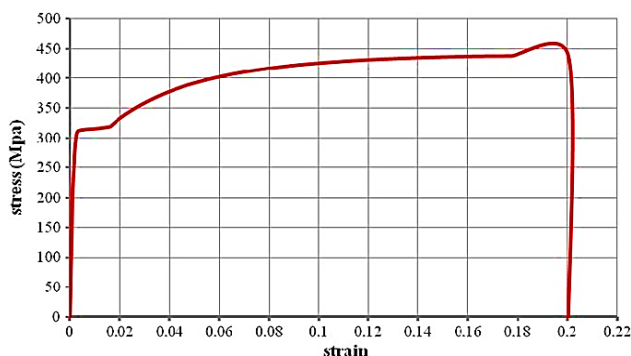
Specimens	b _r (mm)	d _b (mm)	a		b		c	s (mm)	r (mm)	
			(mm)	%b _r	(mm)	%d _b				(mm)
RBS _b	180	171	72	40	102.6	60	22.5	25	123.3	69.73



شکل ۶: شماتیک اتصال تیر به ستون و بارگذاری (سمت چپ) و مدل سازی آزمایشگاهی (سمت راست) [۱۶]

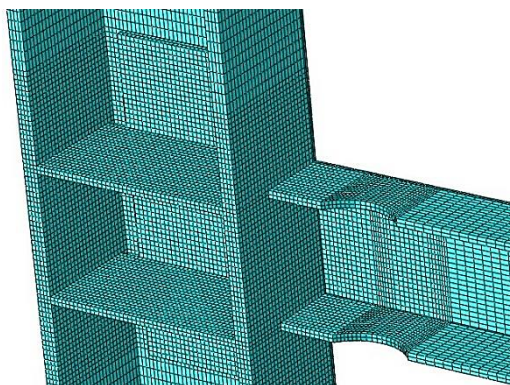
خواص مواد برای تیرها از آزمایش خمش سه نقطه‌ای به دست آمده است که نتیجه به زیر شرح بود (شکل ۷):

مدل یانگ (E): ۲۰۹۰۰۰ N/mm²، تنش تسلیم (F_y): ۳۱۰ N/mm²، تنش نهایی (F_u): ۴۳۰ N/mm².



شکل ۷: منحنی تنش-کرنش حاصل از خمش سه نقطه‌ای نمونه مصالح

مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس براساس توضیحات مقاله مرجع [۱۶] برای تیر و ستون به صورت المان‌های جامد^{۳۵}، ۸ گره‌ای و سه بعدی با انتگرال کاهش یافته^{۳۶} (المان C3D8R در آباکوس) انجام شده که به خاطر تقارن دو محوری^{۳۷} و برای کاهش عملیات محاسباتی، نصف اتصال مدل‌سازی شده است (شکل ۸).



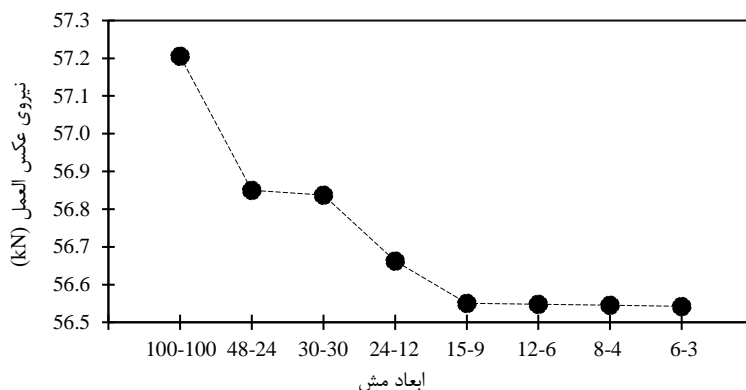
شکل ۸: مدل‌سازی آباکوس

برای بررسی تاثیر اندازه ابعاد مش بر روی پاسخ سازه، مدل را با ۸ اندازه ابعاد مش مختلف، به ترتیب mesh8-4، mesh6-3، mesh12-6، mesh15-9، mesh24-12، mesh30-30، mesh48-24 و mesh100-100 (که عدد دوم اندازه ابعاد مش به کار رفته برای ناحیه اتصال تیر به ستون و قسمت کاهش یافته تیر و عدد اول اندازه ابعاد مش به کار رفته برای سایر قسمت‌های مدل‌سازی می‌باشد)، مش‌بندی کرده و نحوه همگرایی اندازه ابعاد مش در مقابل نیروی عکس‌العمل مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۹). نتایج همگرایی حاکی از آن است که نیروهای عکس‌العمل برای اندازه ابعاد مش mesh6-3 تا mesh15-9 تقریباً ثابت است. بنابراین اندازه ابعاد مش mesh12-6 (شکل ۸) ملاک عمل قرار گرفت.

³⁵ Solid

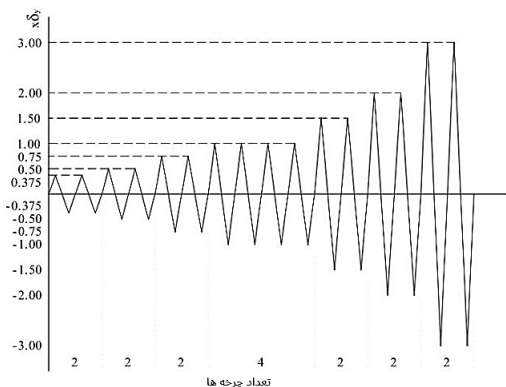
³⁶ reduced integration

³⁷ biaxial symmetry



شکل ۹: تاثیر اندازه‌ی ابعاد مش بندی بر مقدار نیروی عکس العمل

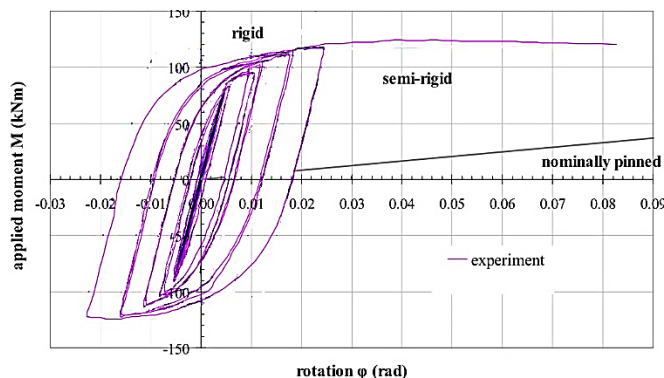
بارگذاری به صورت جابجایی در بالای تیر و در فاصله یک متری از بر ستون به صورت چرخه‌ای به تیر وارد می‌شود. دامنه جابجایی چرخه‌ای از پروتکل مقررات لرزه‌ای AISC (2002) (AISC)، که مانند پروتکل بارگذاری SAC ۱۹۹۷ است، پیروی می‌کند (شکل ۱۰). در هر مرحله، دو چرخه با ضرب دامنه‌ی جابجایی (جدول ۳) در ضرب δ_y ، جابجایی در نقطه تسلیم، ادامه می‌یابد. پس از بارگذاری، پاسخ‌های الگوهای رفتاری مختلف به صورت نمودار $M-\phi$ با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌شود که M (لنگر) از حاصل ضرب نیرو در فاصله نیرو تا بر ستون بدست می‌آید و ϕ (چرخش) از تقسیم جابجایی قائم وسط قسمت کاهش یافته بر فاصله قسمت کاهش یافته تا بر ستون محاسبه می‌شود. شکل ۱۱ نمودار $M-\phi$ مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد [۱۶].



جدول ۳: پروتکل بارگذاری [۱۶]

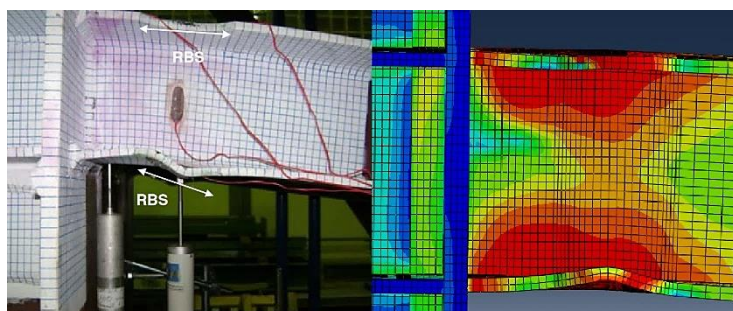
مراحل بارگذاری	تغییر شکل اوج، δ_y	n تعداد چرخه،
1	0.375	2
2	0.50	2
3	0.75	2
4	1.00	4
5	1.50	2
6	2.00	2
7	3.00	2

شکل ۱۰: پروتکل بارگذاری [۱۶]

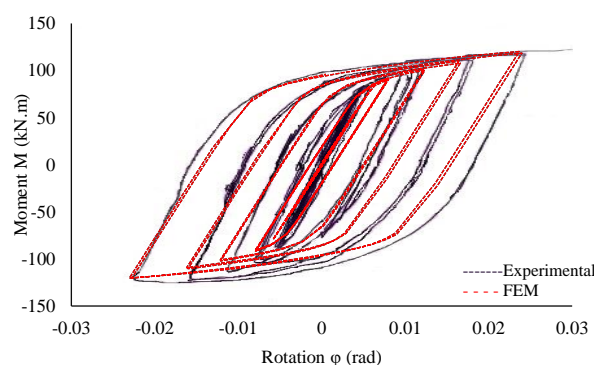


شکل ۱۱: نمودار $M-\phi$ مدل آزمایشگاهی RBS_b

برای صحت سنجی نمونه مدل سازی شده، پس از انجام تحلیل، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است محل تشکیل مفصل پلاستیک در هر دو مدل در قسمت کاهش یافته تیر می‌باشد و مدل خرابی و محل تشکیل مفصل پلاستیک در مدل عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. در شکل ۱۳، منحنی هیستریزیس مدل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده و همانطور که مشخص است انطباق خوبی با یکدیگر دارند.



شکل ۱۲: مدل خرابی نمونه آزمایشگاهی (سمت چپ) و مدل عددی (سمت راست)



شکل ۱۳: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل عددی (قرمز رنگ) و آزمایشگاهی (بنفش)

۳- کالیبراسیون مواد و نتایج حاصل

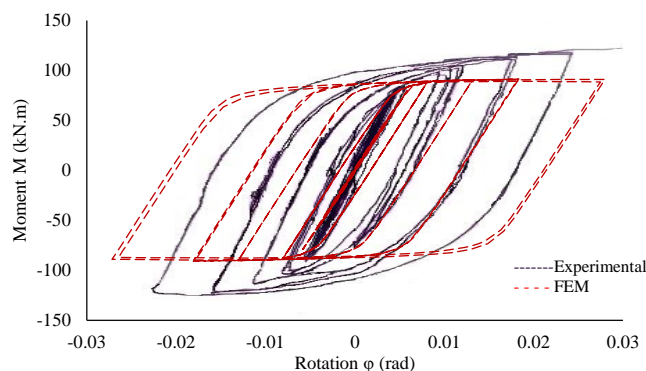
۳-۱- مدل سازی الاستیک پلاستیک کامل

مدل سازی الاستیک-پلاستیک کامل معمولاً برای مدل سازی رفتار سازه‌های فولادی تحت بارگذاری یکنواخت به اندازه کافی دقیق است. پارامترهایی که در مدل سازی الاستیک پلاستیک کامل مورد استفاده قرار می‌گیرد مدل الاستیسیته، E ، و تنش تسلیم، F_y ، است که برای تعریف خواص مصالح در نرم‌افزار آباکوس باید ابتدا تنش و کرنش مهندسی را با استفاده از روابط (۸) و (۹) به تنش کرنش واقعی تبدیل و سپس به نرم‌افزار معرفی کرد [۱].

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (8)$$

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (9)$$

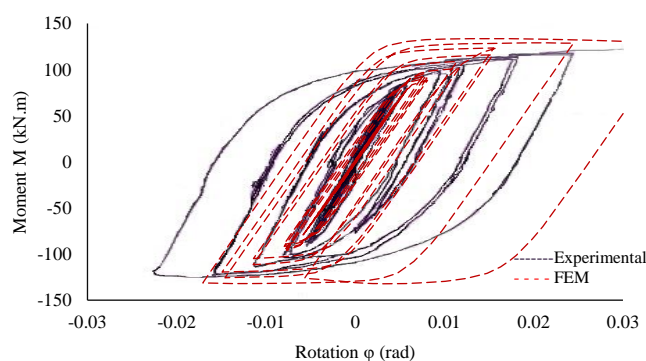
ε و σ به ترتیب تنش و کرنش مهندسی و σ_{true} و ε_{true} به ترتیب تنش و کرنش واقعی هستند. مقایسه منحنی آزمایشگاهی و مدل عددی با رفتار الاستیک-پلاستیک، شکل ۱۴، نشان می‌دهد نیروها به صورت محافظه کارانه‌ای کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است.



شکل ۱۴: مقایسه منحنی آزمایشگاهی و مدل عددی با رفتار الاستیک-پلاستیک کامل

۲-۲- مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

این مدل سخت‌شوندگی مواد معمولاً برای محاسبات پلاستیسیته فلز استفاده می‌شود و مستلزم آن است که ماده رابطه تنش کرنش پلاستیک تک محوری را برآورده کند. برای تسلیم ایزوتروپیک یعنی افزایش سطح تسلیم، از سطح تسلیم فون میسز با جریان پلاستیک مرتبط استفاده می‌شود. شکل ۱۵، نتیجه تحلیل عددی مدل سازی مواد با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، مدل رفتاری ایزوتروپیک، نیروها را به صورت دست بالا و بیش از حد برآورد می‌کند.

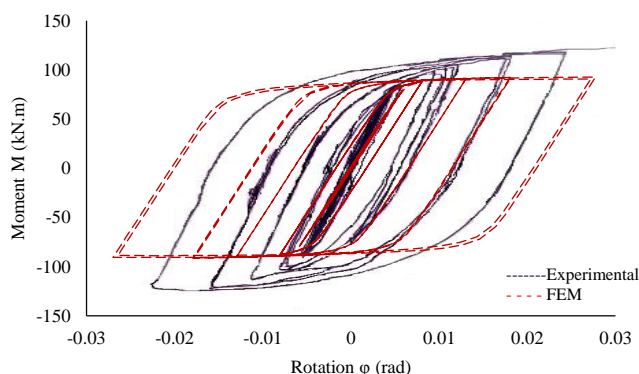


شکل ۱۵: مقایسه منحنی آزمایشگاهی و مدل عددی با رفتار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

۳-۳- مدل سازی سخت‌شوندگی سینماتیکی خطی

برای در نظر گرفتن اثرات ماند اثر باوشینگر، قانون سخت‌شوندگی سینماتیکی خطی اجازه می‌دهد که سطح تسلیم بدون تغییر شکل جابجا شود. شکل ۱۶ مقایسه‌ی منحنی هیستریزس مدل عددی با سخت‌شوندگی سینماتیکی و مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

مدل رفتاری سینماتیک خطی نیز مانند مدل الاستیک-پلاستیک کامل باعث می‌شود که نیروها به صورت محافظه کارانه‌ای کمتر از مقدار واقعی برآورد گردد.



شکل ۱۶: مقایسه‌ی منحنی هیستریزیس مدل عددی با سخت‌شوندگی سینماتیک و مدل آزمایشگاهی

۳-۴- مدل‌سازی سخت‌شوندگی ترکیبی (ایزوتروپیک / سینماتیک)

مدل مورد بررسی مدل کامل‌تر شده مدل چابوچه^{۳۸} [۲۱]، توسط آمستراگ و فردریک است که در این مدل هر دو نوع سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک شبیه‌سازی می‌شود. بر اساس این مدل سطح تسلیم توسط تعدادی پیش‌تنش (α) و بزرگتر شدن آن توسط روابط ۱۰ و ۱۱ تعریف می‌شود.

$$Q_{\infty} = \sigma_{|0} + \exp(-b.\varepsilon^p) \quad (10)$$

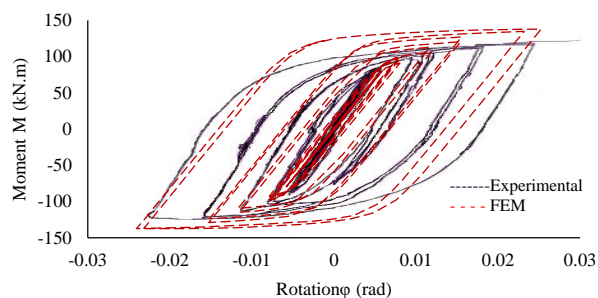
$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - \exp(-C.\varepsilon_p)) \quad (11)$$

که در آن Q_{∞} میزان افزایش سطح تسلیم در حالت چرخه اشباع، $\sigma_{|0}$ تنش تسلیم اولیه در کرنش پلاستیک معادل صفر، b نرخ رسیدن سطح تسلیم به حد اشباع، ε^p کرنش پلاستیک معادل با کار انجام شده پلاستیک مصالح در چرخه‌ها، C و γ پارامترهای مصالح که باید کالیبره شوند و ε_p نیز کرنش پلاستیک هر نقطه است. با توجه به در دسترس نبودن داده‌های چرخه‌ای برای ماده، پارامترهای رفتار پلاستیک چرخه‌ای برگرفته از مقالات سایر محققین مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۴). شکل ۱۷ تا ۲۰ نتایج حاصل از مدل سخت‌شدن ترکیبی پارامتریک را نشان می‌دهد.

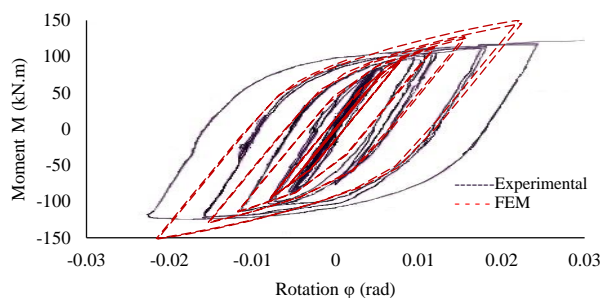
جدول ۴: خواص مواد برای مدل سخت‌شوندگی ترکیبی

شماره	C [MPa]	γ	Q_{∞} [MPa]	b	مرجع	شکل
۱	۲۲۵۰۰	۸۱	۲۰۰۰	۰/۲۶	[22]	۱۵
۲	۲۵۰۰	۲۰	۱۸۰	۲۰	ناشناخته	۱۶
۳	۱۶۰۰۰	۴۳	۴۴	۱۱	[23]	۱۷
۴	۶۸۹۵	۲۵	۱۷۲	۲	[24]	۱۸

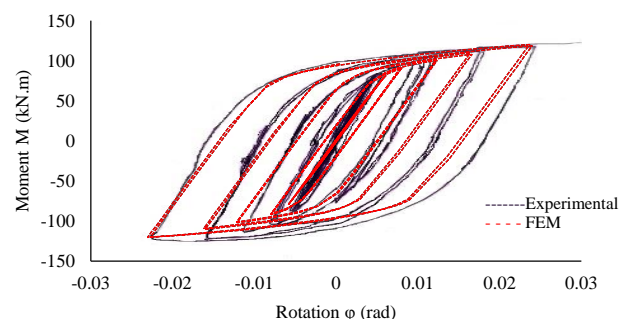
³⁸ Chaboche kinematic hardening model



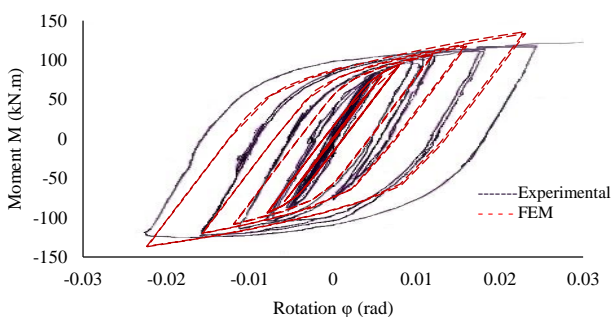
شکل ۱۷: مدل عددی با سخت‌شوندگی ترکیبی ۲



شکل ۱۸: مدل عددی با سخت‌شوندگی ترکیبی ۱



شکل ۱۹: مدل عددی با سخت‌شوندگی ترکیبی ۳



شکل ۲۰: مدل عددی با سخت‌شوندگی ترکیبی ۴

همانطور که مشخص است منحنی هیستریزیس مدل ترکیبی پارامتری انطباق بیشتری با مدل آزمایشگاهی دارد که شکل ۲۰، مدل ترکیبی ۴، این انطباق را بهتر نشان می‌دهد.

سطح زیر نمودار یا به عبارتی سطح محصور شده بین نمودارهای هیستریزیس نشان دهنده انرژی مستهلک شده توسط عضو است. هرچه این سطح بزرگ‌تر باشد نشان دهنده این است که عضو شکل‌پذیرتر بوده و قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد. در جدول ۵ سطح زیر منحنی‌های هیستریزیس مدل‌سازی‌های عددی انجام شده با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۵ مشخص است سطح زیر منحنی‌های هیستریزیس در حالت ترکیبی ۲، ایزوتروپیک و الاستیک-پلاستیک کامل از سطح زیر منحنی سایر حالات از جمله حالت ترکیبی ۳، که بیشترین انطباق با منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی را دارد، بیشتر است. نتایج حاکی از آن است که برای مدل‌سازی اتصال مورد بررسی، در صورت استفاده از مدل ترکیبی ۲، ایزوتروپیک و الاستیک-پلاستیک کامل برای مدل‌سازی مواد، اتصال شکل‌پذیرتر از مقدار آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود و جذب انرژی بیشتری را نشان خواهند داد.

جدول ۵: سطح زیر منحنی‌های هیستریزیس مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در اباکوس

مدل‌ها	الاستیک-پلاستیک کامل	ایزوتروپیک	سینماتیک	ترکیبی ۱	ترکیبی ۲	ترکیبی ۳	ترکیبی ۴
مساحت (kN.m.rad)	۴۴/۰۷۶	۴۴/۱۳۴	۴۲/۸۴۴	۴۵/۸۸۹۴۱/۱۵۰	۴۱/۲۳۸	۴۱/۶۹۹	۴۱/۶۹۹

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به بررسی مدل‌های مختلف سخت‌شوندگی مواد و تاثیر آنها بر مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای اجزای فولادی پرداخته شده است، سپس تاثیر مدل‌های مختلف سخت‌شوندگی مواد بر دقت مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای یک اتصال RBS در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی رفتارهای سخت‌شوندگی مختلف به شرح ذیل است:

۱- مقایسه منحنی هیستریزس مدل عددی، با رفتارهای سخت‌شوندگی مختلف، با نتایج مدل آزمایشگاهی تیر RBS مورد مطالعه، نشان می‌دهد که بکارگیری رفتار سخت‌شوندگی مناسب مواد برای مدل‌سازی بارگذاری چرخه‌ای اجزای فولادی، تاثیر بسزایی بر دقت مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای و انطباق آن با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۲- استفاده از مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل و سینماتیک خطی باعث شده است که نیروها به صورت محافظه‌کارانه‌ای کمتر از مقدار واقعی برآورد گردد.

۳- مدل رفتاری سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، نیروها را به صورت دست بالا و بیش از حد برآورد کرده است.

۴- در این مورد خاص، استفاده از داده‌های ارائه شده توسط سایر محققین برای پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی رفتار سخت‌شوندگی ترکیبی آمسترانگ فردریک نتایج مطلوب‌تری را نسبت به مدل‌های الاستیک-پلاستیک کامل، ایزوتروپیک و سینماتیک در بر داشته است.

۵- برای استفاده از داده‌های سایر محققین برای مدل‌سازی رفتار سخت‌شوندگی ترکیبی پارامتری، باید نتایج را با نتایج تجربی اعتبارسنجی کرد.

۶- مقایسه مساحت زیر منحنی‌های هیستریزس مدل‌های عددی مختلف نشان می‌دهد که سطح زیر نمودار مدل سخت‌شوندگی سینماتیک نسبت به ایزوتروپیک و الاستیک-پلاستیک کامل، به نتایج مدل سخت‌شوندگی ترکیبی پارامتری نزدیک‌تر است. نتایج حاکی از آن است که برای مدل‌سازی اتصال مورد بررسی، در صورت استفاده از مدل ترکیبی ۲، ایزوتروپیک و الاستیک-پلاستیک کامل برای مدل‌سازی مواد، اتصال شکل‌پذیرتر از مقدار آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود و جذب انرژی بیشتری را نشان خواهند داد.

مراجع

- [1] Crisan, A. (2016). Material calibration for static cyclic analyses. *Intersectii/Intersections*, 13(2), 44-59.
- [2] Araujo, M. C. (2002). *Non-linear kinematic hardening model for multiaxial cyclic plasticity*. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.
- [3] Dahlberg, M. and Segle, P. (2010). Evaluation of models for cyclic plastic deformation—A literature study. *Swedish Radiation Safety Authority Report*, 2010, 45.
- [4] Ottosen, N. S. and Ristinmaa, M. (2005). *The mechanics of constitutive modeling*. Elsevier.
- [5] Frederick, C. and Armstrong, P. (2007). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *Materials at High Temperatures*, 24(1), 1-26.
- [6] Lemaitre, J. and Chaboche, J. (1994). *Mechanics of solid materials*. Cambridge university press.
- [7] Chaboche, J. (1989). Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International journal of plasticity*, 5(3), 247-302.
- [8] Nilsson, F. and van Eeten, P. (2006). Constant and variable amplitude cyclic plasticity in 316L stainless steel. *Journal of Testing and Evaluation*, 34(4), 298-311.
- [9] Chaboche, J. (1991). On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects. *International journal of plasticity*, 7(7), 661-678.

- [10] Bari, S. and Hassan, T. (2002). An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation. *International journal of plasticity*, 18(7), 873-894.
- [11] Ohno, N. (1998). Constitutive modeling of cyclic plasticity with emphasis on ratchetting. *International journal of mechanical sciences*, 40(2-3), 251-261.
- [12] Nath, A. and Ray, A. and Ray, K. (2023). Analyses of the model parameters of kinematic-isotropic hardening rule using genetic algorithm approach for predicting cyclic-plasticity of metallic structural materials. *Procedia Structural Integrity*, 43, 246-251.
- [13] Cooke, R. and Kanvinde, A. (2015). Constitutive parameter calibration for structural steel: Non-uniqueness and loss of accuracy. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 394-404.
- [14] Ghaderi, M. Gerami, M. and Vahdani, R. (2020). Investigating the effect of extremely low cyclic fatigue in steel moment frames with reduced beam section connections. *Journal of Structural and Constructional Engineering*, 7, 5-19.
- [15] Hamedi, F. and Adibzadeh, S. B. (2023). Minimum Thickness of the Column Face in the Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Moment Connection to Box Column without Continuity Plate. *Civil Infrastructure Researches*, 8, 157-172.
- [16] Pachoumis, D. and Galoussis, E. and Kalfas, C. and Efthimiou, I. (2010). Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections—experimental analysis and finite element model simulation. *Engineering Structures*, 32(9), 2683-2692.
- [17] Sofias, C. and Pachoumis, D. (2020). Assessment of reduced beam section (RBS) moment connections subjected to cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 171, 106151.
- [18] Mahjoob, S. and Erfani, S. (2018). Investigating different behavior models of materials in numerical modeling of bolted connection of beam to column with extended end plate. In: *The 4th International Conference on Structural Engineering*.
- [19] Deylami, A. and Ghasemi, P. (2019). Investigation of the effect of different steel material constitutive models on the Simpson Strong-Tie connection. In: *The 10th Natoinalth Conference On Steel & Structure*.
- [20] Saeedi, H. and Erfani, S. (2023). Cyclic behavior of a novel bolted beam-to-box column connection with reduced beam section. *Structures*, 53, 1369-1388.
- [21] Myers, A. (2009). *Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments*. Stanford University.
- [22] Abaqus, I. (2007). Abaqus Verification Manual, version 6. *Hibbit-Karlson-Sorensen Inc*.
- [23] Collin, J. Parenteau, T. and Mauvoisin, G. and Pilvin, P. (2009). Material parameters identification using experimental continuous spherical indentation for cyclic hardening. *Computational Materials Science*, 46(2), 333-338.
- [24] Elkady, A. and Lignos, D. (2015). Analytical investigation of the cyclic behavior and plastic hinge formation in deep wide-flange steel beam-columns. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 1097-1118.