

مطالعه‌ی عددی رفتار میراگرهای لانه‌زنبوری موجدار

علیرضا معززی مهر طهران* (استادیار)

مهرداد جعفری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریفمهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۳-۳، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی به نام میراگر لانه‌زنبوری موجدار ارائه شده است. از مزایای میراگر پیشنهادی می‌توان به سادگی در ساخت و اجرای آن ضمن ارائه‌ی رفتار پایدار تحت بارگذاری جانبی اشاره کرد. شکل پایه‌ی میراگر لانه‌زنبوری متشکل از دو ورق خم‌کاری شده به شکل دوزنقه است، که با استفاده از جوش به یکدیگر متصل می‌شوند و هندسه‌ی لانه‌زنبوری را ایجاد می‌کنند. در پژوهش حاضر، ابتدا رابطه‌ی تحلیلی سختی اولیه‌ی میراگر به دست آمده است. سپس در شبیه‌سازی عددی با اعمال بارگذاری یکنواخت و چرخه‌یی، رفتار میراگر در ناحیه‌های خطی و غیرخطی بررسی شده است. به منظور برآورد تأثیر مشخصه‌های هندسی در رفتار میراگر، مطالعه‌ی پارامتری بر روی دوازده نمونه انجام و نتایج متناظر ارائه شده است. همچنین، براساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی، سختی مؤثر، میرایی معادل و مدل سه‌خطی رفتار میراگر جهت استفاده در طرح عملی سازه‌ها ارائه شده است.

واژگان کلیدی: میراگر فلزی تسلیمی، هندسه‌ی لانه‌زنبوری، تحلیل غیرخطی، رفتار چرخه‌یی، روش اجزاء محدود.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های بهبود عملکرد سازه‌ها در مقابل زلزله، کنترل غیرفعال سازه است. کنترل غیرفعال، شامل استفاده از ابزارهای مختلفی، مانند: جداسازهای پایه، میراگرهای جرمی، میراگرهای اصطکاکی و تسلیمی است. میراگرهای تسلیمی، انرژی ورودی زلزله را با استفاده از رفتار خمیری مصالح خود مستهلک می‌کنند. از مزیت‌های میراگر تسلیمی می‌توان به هزینه‌ی ساخت پایین، رفتار پایدار در شرایط محیطی مختلف و نیز آشنایی مهندسان با مصالح و رفتار پایه‌ی آنها اشاره کرد.

مفهوم اولیه‌ی استفاده از میراگرها برای جذب انرژی در سال ۱۹۷۲، توسط کلی^۱ و همکاران،^۲ ارائه و استقبال قابل توجهی از آن شده است. برگمن^۳ (۱۹۸۷)،^۴ میراگر ADAS^۵ را ارائه کرد، که یکی از شناخته شده‌ترین میراگرهای تسلیمی است. تسای^۶ و همکاران،^۷ نیز با بهینه‌سازی شکل ADAS، میراگر TADAS^۸ را در سال ۱۹۹۳ ارائه کردند. میراگر TADAS از چند ورقه‌ی مثلثی، که به شکل موازی به هم وصل شده‌اند، تشکیل و در بارگذاری جانبی با استفاده از رفتار خمشی ورق‌های مذکور، انرژی ورودی اتلاف می‌شود. ناکاشیما^۹ و همکاران (۱۹۹۴)،^{۱۰} با استفاده از ورق فولادی ساخته شده از مصالح با تنش تسلیم پایین^{۱۱}، میراگر SPD^{۱۲} را ارائه داده‌اند، که با رفتار برشی، انرژی ورودی را تلف می‌کند. چن^{۱۳} و همکاران

* نویسنده مسئول

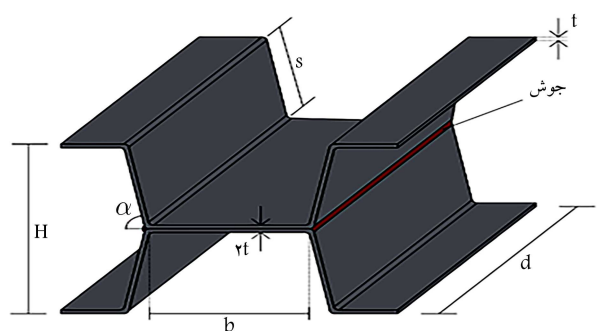
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2022.60894.3130

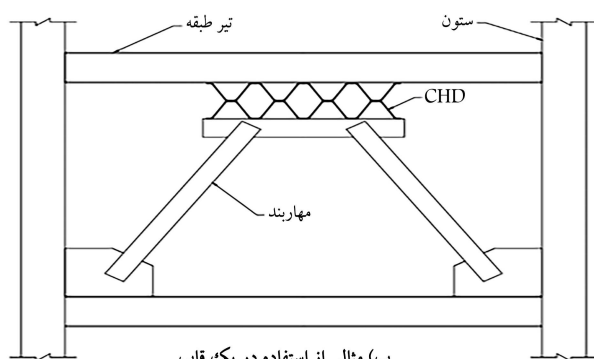
استناد به این مقاله:

معززی مهر طهران، علیرضا و جعفری، مهرداد، ۱۴۰۲. مطالعه‌ی عددی رفتار میراگرهای لانه‌زنبوری موجدار. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۳-۳.

(۲۰۰۶)،^{۱۴} با به کارگیری بهینه‌ی سخت‌کننده‌های قائم و افقی، رفتار میراگر SPD را بهبود بخشیده و میراگر SSPD^{۱۵} را معرفی کرده‌اند؛ که با آن، تغییر جذب انرژی بیشتر شده و همچنین هیچ نشانه‌یی از باریک‌شدگی^{۱۶} و افت مقاومت در میراگر SSPD مشاهده نشده است. ملکی و باقری (۲۰۱۰)،^{۱۷} میراگر PD^{۱۸} را ارائه دادند. در ادامه، برای بهبود برخی از مشخصه‌های مکانیکی PD، ملکی و محجوبی (۲۰۱۳)،^{۱۹} میراگر DPD^{۲۰} را معرفی کردند، که در ساخت آن از دو لوله‌ی فولادی، که در نقاط مشخصی به یکدیگر جوش شده‌اند، استفاده شده است. چراغی و همکاران (۲۰۱۷)،^{۲۱} میراگر PIP^{۲۲} را ارائه داده‌اند، که از دو لوله‌ی درون هم تشکیل شده است؛ که با توجه به هندسه آن می‌تواند به شکل دوسطحنی عمل کند. در زمین‌لرزه‌های کوچک، فقط لوله‌ی بیرونی تغییرشکل خواهد داشت و اگر تغییرمکان‌ها از حدی که در طراحی در نظر گرفته شده است فراتر برود، سختی و مقاومت نیرویی لوله‌ی داخلی نیز وارد عمل خواهد شد. این موضوع باعث می‌شود در تغییرمکان‌های نسبتاً بزرگ، میراگر PIP سختی مضاعفی داشته باشد، که در زلزله‌های بزرگ مفید خواهد بود. امیری و همکاران (۲۰۱۸)،^{۲۳} میراگر BSD^{۲۴} را معرفی کردند. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی آنها نشان داد که میراگر BSD، جذب انرژی بالایی دارد و با برآورده کردن شرایط هندسی مشخصی، می‌تواند به شکل کمانش‌تاب عمل کند، که این امر موجب بهبود رفتار چرخه‌یی میراگر می‌شود. لی و همکاران (۲۰۱۹)،^{۲۵} میراگر SBC^{۲۶} را ارائه کرده‌اند، که پیکربندی آن ترکیبی



الف) مشخصات هندسی؛



ب) مثالی از استفاده در یک قاب.

شکل ۲. میراگر لانه‌زنبوری موجودار.

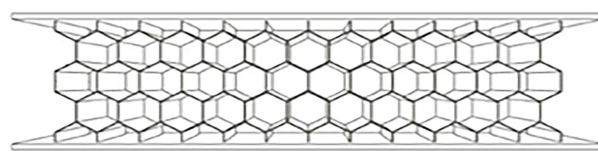
عمق در بازه‌ی ۵ الی ۱۲ میلی‌متر بوده است. در واقع عملکرد میراگرهای HSF [۱۲] و HHSD [۱۳] غالباً به شکل صفحه‌یی بوده است، در حالی که میراگر CHD در خمش و کشش عمل می‌کند. ماحصل شکل انتخابی برای میراگر لانه‌زنبوری موجودار منجر به بهبود رفتار چرخه‌یی میراگر شده است، که در قسمت‌های آتی با جزئیات بیشتر به آن پرداخته شده است.

در گام نخست پژوهش حاضر، رابطه‌ی تحلیلی سختی میراگر در ناحیه‌ی کشسان به دست آمده است. در ادامه، برای بررسی رفتار میراگر، از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن مؤلفه‌های هندسی مشخص شده در شکل ۲ - الف، نمونه‌های مختلفی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌یی تحلیل شده‌اند. بدین ترتیب، ضمن مطالعه‌ی رفتار میراگر تحت بارگذاری جانبی، تأثیر هر یک از مؤلفه‌های هندسی جهت دست‌یابی به هندسه‌ی بهینه‌ی میراگر مشخص شده است. همچنین براساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی انجام شده، سختی مؤثر، میرایی معادل و مدل سه‌خطی رفتار میراگر جهت امکان استفاده در طرح عملی سازه‌ها ارائه شده است.

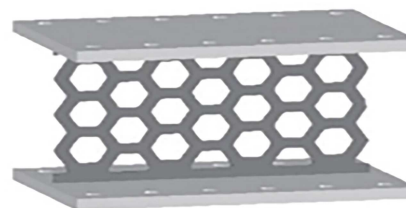
۲. مطالعه‌ی تحلیلی

رابطه‌ی تحلیلی سختی اولیه‌ی میراگر CHD با استفاده از تحلیل ماتریسی به دست آمده است. برای این کار، مدل ساده شده‌ی میراگر CHD مطابق شکل ۳ انتخاب شده است. با توجه به محل جوش بین دو قطعه‌ی میراگر، صفحه‌های محل تماس دو قطعه‌ی میراگر به شکل مجزا از هم عمل می‌کردند و در نتیجه لازم بود بین دو گره‌ی ۳ و ۴، از دو آلمان مجزا با عرض d و ارتفاع t استفاده شود.

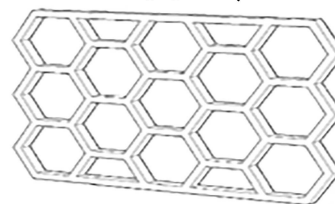
برای مدل‌سازی اعضاء میراگر از آلمان‌های تیر - ستون با ماتریس سختی ارائه شده در رابطه‌ی ۱ و منطبق بر درجه‌های آزادی (DOF) [۲۳] در شکل ۴ استفاده



الف) HD [۱۱]



ب) HSF [۱۲]



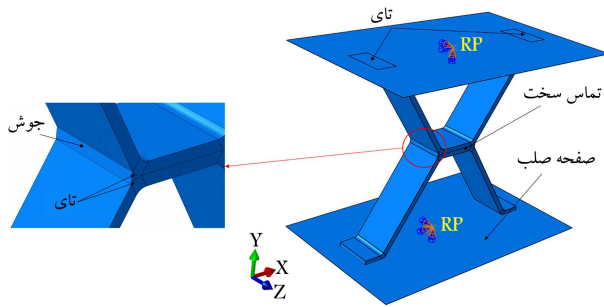
ج) HHSD [۱۳]

شکل ۱. میراگرهای پیشین مبتنی بر هندسه‌ی لانه‌زنبوری.

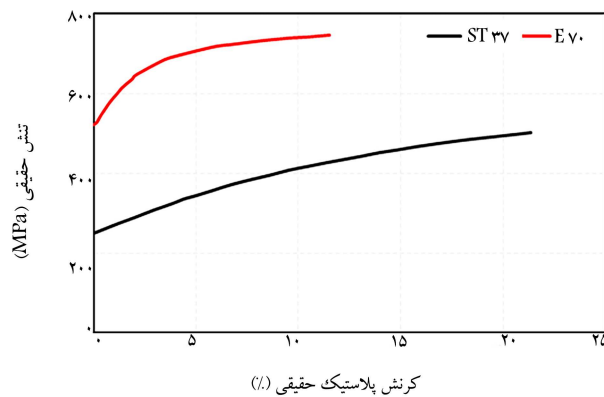
از میراگرهای ADAS و SP [۱۷] است و بدین ترتیب، هم‌زمان از دو مکانیزم رفتار خمشی و برشی بهره می‌گیرد. در میراگر SBC، مقاومت خارج از صفحه‌ی عنصر برشی (SP) با به کارگیری ورق‌های فولادی عنصر خمشی (ADAS)، بهبود یافته و بدین ترتیب میراگر ارائه شده، عملکرد مناسب‌تری نسبت به هر کدام از میراگرهای پایه به تنهایی داشته است.

یکی از پیکربندی‌هایی که اخیراً برای میراگرهای تسلیمی به آن توجه شده است، استفاده از هندسه‌ی لانه‌زنبوری است. در همین راستا، لی و همکاران [۱۷] (۲۰۱۷)، [۱۸] میراگر HD را ارائه داده و با شبیه‌سازی عددی، رفتار میراگر مذکور را مطالعه و امکان استفاده از آن در بهبود مشخصه‌های لرزه‌یی سازه‌های جدید و موجود را بررسی کرده‌اند. یانگ و همکاران [۱۲] (۲۰۲۰)، [۱۹] میراگر HSF را ارائه داده و جهت بررسی رفتار آن، ۹ نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌یی قرار داده‌اند. نتایج به دست آمده‌ی ایشان، بیان‌گر جذب انرژی مناسب میراگر HSF تا نسبت گریز ۲۰ هدف بود. در نهایت، جوانمردی و همکاران [۱۳] (۲۰۲۰)، [۲۰] میراگر HHSD را معرفی کردند. ایشان برای ایجاد هندسه‌ی لانه‌زنبوری در میراگر ذکر شده، از برش‌کاری ورق فولادی استفاده و طی مطالعات عددی و آزمایشگاهی، اثر مشخصه‌های هندسی را در رفتار میراگر HHSD بررسی کرده‌اند. در شکل ۱، نمای میراگرهای پیشین مبتنی بر هندسه‌ی لانه‌زنبوری مشاهده می‌شود.

در پژوهش حاضر، نوع جدیدی از میراگرهای لانه‌زنبوری، به نام میراگر لانه‌زنبوری موجودار (CHD) [۲۲] معرفی شده است، که نمای آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. شکل پایه‌ی میراگر CHD، متشکل از دو ورق خم‌کاری شده به شکل ذوزنقه است، که با استفاده از جوش به یکدیگر متصل شده و هندسه‌ی لانه‌زنبوری را ایجاد کرده‌اند. جهت قرارگیری سلول‌های لانه‌زنبوری میراگر پیشنهادی CHD، ۹۰ درجه با میراگر لی و همکاران [۱۱] (۲۰۱۷)، [۲۱] تفاوت دارد (بنا به تحلیل‌های انجام شده توسط نویسندگان، این امر باعث بهبود رفتار میراگر می‌شود). ساخت میراگر CHD با استفاده از خم‌کاری ورق‌های فولادی، امکان اعمال عمق‌های متفاوت (مؤلفه‌ی d در شکل ۲ - الف) را فراهم می‌کند. شایان توجه است در پژوهش‌های پیشین، پیشینه‌ی



شکل ۵. مدل اجزاء محدود میراگر لانه زنبوری موجدار.



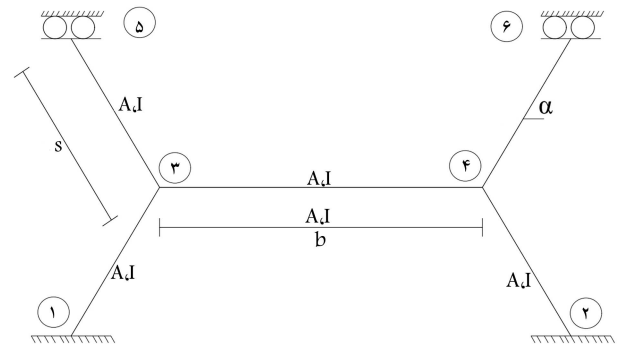
شکل ۶. نمودار تنش - کرنش حقیقی مصالح [۱۵ و ۱۶]

جوش به یکدیگر متصل شده‌اند. برای برآورد دقیق‌تر رفتار میراگر، جوش دو ورق دوزنقه‌بی به یکدیگر به شکل سه‌بندی در نظر گرفته شده است. شعاع خم ورق‌های فولادی به اندازه‌ی ضخامت ورق انتخاب شده است. صفحه‌های اتصال‌دهنده‌ی میراگر به قاب اصلی با المان صفحه‌بی صلب و ورق‌های دوزنقه‌بی میراگر و جوش با المان‌های حجمی C3D8R مدل‌سازی شده‌اند. همچنین اتصال میراگر به صفحه‌های صلب با استفاده از قید تای^{۲۴} و مدل‌سازی برهم‌کنش صفحات میراگر در ناحیه‌ی اتصال با یکدیگر به کمک قید تماس سخت^{۲۵} صورت گرفته است.

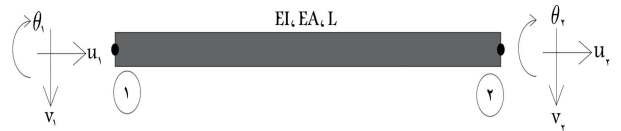
بر اساس مطالعات حساسیت‌سنجی، از اندازه‌ی مش ۱ الی ۲/۵ میلی‌متر در راستای طولی و عرضی (۴ المان در ضخامت ورق) و ۱۰ میلی‌متر در راستای عمق میراگر استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی نمونه در صفحه‌های صلب پایین و بالا به صورت کاملاً گیردار اعمال شده و تنها امکان حرکت جانبی هم‌راستا با بارگذاری (محور x در شکل ۵) در صفحه‌ی فوقانی وجود داشته است.

مصالح استفاده شده برای فولاد از جنس ST-۳۷ با مدول یانگ ۲۱۰ گیگاپاسکال و الکتروکود از نوع E۷۰ بوده است، که نمودار تنش - کرنش آنها از پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین استخراج شده است (شکل ۶). [۱۵ و ۱۶]

برای شبیه‌سازی خرابی مصالح، در پژوهش حاضر از مدل خرابی شکل‌پذیر^{۲۶} استفاده شده است. در روش مذکور فرض بر این است که شکست در اثر رشد، گسترش و به هم پیوستن حفره‌هایی که به صورت اجتناب‌ناپذیری در هر ماده‌ی وجود دارند، ایجاد می‌شود. در معیار خرابی اخیر، کرنش شروع خرابی به عنوان تابعی از



شکل ۳. مدل تحلیلی ساده شده‌ی میراگر لانه زنبوری موجدار.



شکل ۴. درجه‌های آزادی المان تیر - ستون.

شده است. در گام نخست، لازم است ماتریس سختی هر یک از اعضا به دست آید. ماتریس سختی کل سازه نیز با سرهم‌بندی ماتریس‌های سختی تمامی اعضا تشکیل شده است.

$$k_{el} =$$

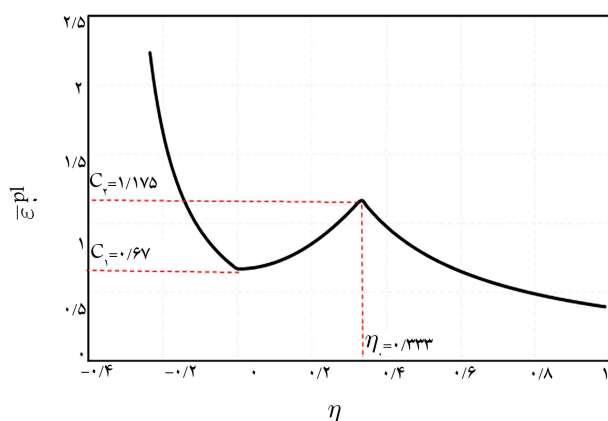
$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & \theta_1 & u_2 & v_2 & \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن، $A = d \times t$ مساحت و $I = \frac{dt^3}{12}$ ممان اینرسی اعضا هستند. با داشتن ماتریس سختی کل سازه و اعمال بار واحد به دو درجه‌ی آزادی انتقالی گره‌های ۵ و ۶ سازه در شکل ۳، می‌توان سختی میراگر را به دست آورد، که معادله‌ی آن در رابطه‌ی ۲ ارائه شده است. همچنین در صورتی که از چند سلول میراگر در راستای افق استفاده شود: (n_x تعداد سلول‌ها)، عملکرد مجموعه به شکل موازی و سختی معادل آنها نیز برابر با مجموع سختی سلول‌ها خواهد بود.

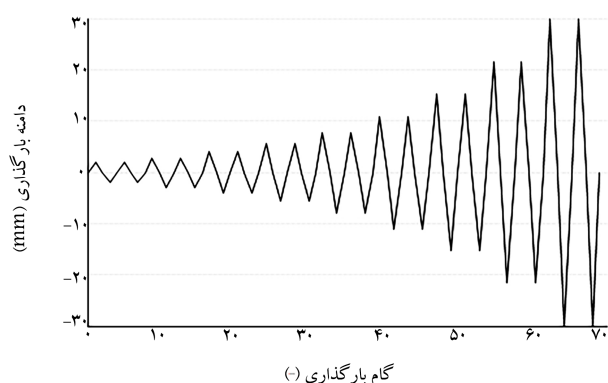
۳. شبیه‌سازی عددی

به منظور بررسی جامع رفتار میراگر پیشنهادی CHD از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس^[۱۴] استفاده شده است. در شکل ۵، نمای مدل کامپیوتری ساخته شده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، دو ورق دوزنقه‌بی در لبه‌های کناری به وسیله‌ی

$$K_{el,t} = n_x \times \frac{dt^3 E [(\lambda s^2 - t^2 t^2) \times \cos^2(\alpha) + 12sb \times \cos(\alpha) + 6b^2 + 2t^2 + b^2/s]}{b^2 \times \cos^2(\alpha) (bt^2 + 6st^2 - 2bs^2 - 6s^2) + 12s^2 bt^2 \times \cos(\alpha) + (6b^2 + 12t^2)s^2 + 3s^2 b^2} \quad (2)$$



شکل ۸. مکان هندسی شروع خرابی.

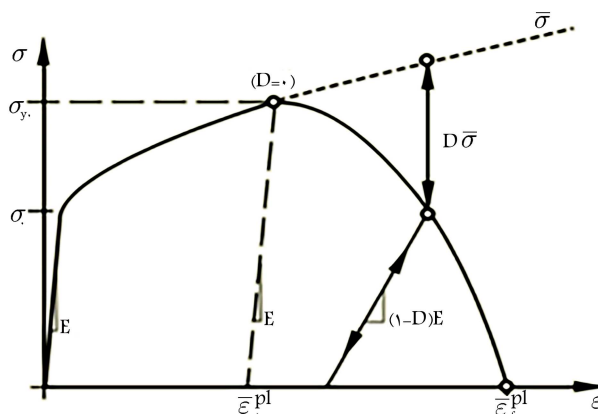


گام بارگذاری (-)

شکل ۹. تاریخچه‌ی بارگذاری طبق دستورالعمل FEMA ۴۶۱ [۲۰].

موارد دیگری که در معرفی خرابی مصالح باید تعیین شوند، مسیر خرابی و نیز کرنش خمیری گسیختگی ($\bar{\epsilon}_f^{pl}$) است. در پژوهش حاضر از مسیر خطی برای مدل‌سازی رفتار مصالح بین دو نقطه‌ی متناظر با کرنش $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ و $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ استفاده شده است. همچنین نرم‌افزار آباکوس برای کاهش وابستگی مدل‌سازی خرابی مصالح به اندازه‌ی مش، از تغییر طول گسیختگی ($\bar{u}_f^{pl}$) به جای $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ استفاده می‌کند. روش اندازه‌گیری مستقیم آزمایشگاهی برای $\bar{u}_f^{pl}$ وجود ندارد؛ اما به عنوان معیاری برای آن می‌توان از حاصل ضرب درصد افزایش طول نمونه‌ی کششی تک‌محوری در طول گنج نمونه استفاده کرد. [۱۹] در پژوهش حاضر، از مقدار 0.05 متر برای تغییر طول گسیختگی استفاده شده است. از آن‌جا که کرنش‌های خمیری قابل توجهی در مصالح جوش مشاهده نشده است، از اعمال خرابی مصالح برای مدل‌سازی مصالح جوش صرف‌نظر شده است.

برای بارگذاری چرخه‌ی نمونه‌ها از تاریخچه‌ی بارگذاری پیشنهادی FEMA ۴۶۱ [۲۰] با جابه‌جایی هدف 30 میلی‌متر مطابق شکل ۹ استفاده شده است. هر دامنه‌ی بارگذاری، دو چرخه تکرار می‌شود و این روند با افزایش 40 درصدی دامنه‌ها ادامه خواهد داشت تا به جابه‌جایی هدف دست یابد. بدین ترتیب از دامنه‌های بارگذاری 3 ، $2/85$ ، $3/98$ ، $5/58$ ، $7/81$ ، $93/10$ ، $31/15$ ، $43/21$ و 30 میلی‌متر استفاده شده است. این میزان جابه‌جایی هدف متناظر با نسبت گریز 1% برای ساختمانی با ارتفاع متعارف هر طبقه به میزان 3 متر است. لازم به توضیح است که محل اعمال بارگذاری چرخه‌ی (از نوع جابه‌جایی کنترل) در نقطه‌ی مرجع صفحه‌ی صلب فوقانی شکل ۵ بوده است. مضافاً با توجه به انجام تحلیل شبه‌استاتیکی، نرخ بارگذاری موضوعیت ندارد.



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش با در نظر گرفتن خرابی مصالح. [۱۴]

تنش سه‌محوری σ_y مطرح است، که مقدار آن مطابق رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (3)$$

که در آن، تنش هیدرواستاتیک معادل σ_m و تنش فون - مایسز معادل $\bar{\sigma}$ به ترتیب از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (5)$$

که در آنها، σ_i ها ($i=1-3$) تنش جهات اصلی هستند.

پس از رسیدن مقدار کرنش به کرنش خمیری، شروع خرابی ($\bar{\epsilon}_f^{pl}$)، مقدار پارامتر خرابی (D) از صفر شروع به افزایش می‌کند. مطابق شکل ۷، که با افزایش آن، میزان سختی (تانسور E) و ظرفیت تنش مصالح (تانسور σ) مطابق روابط ۶ و ۷ کاهش می‌یابد. در نهایت، زمانی که پارامتر خرابی در کرنش خمیری گسیختگی ($\bar{\epsilon}_f^{pl}$) برابر با مقدار واحد شود، المان کاملاً گسیخته می‌شود.

$$E = (1 - D) \times E \quad (6)$$

$$\sigma = (1 - D) \times \bar{\sigma} \quad (7)$$

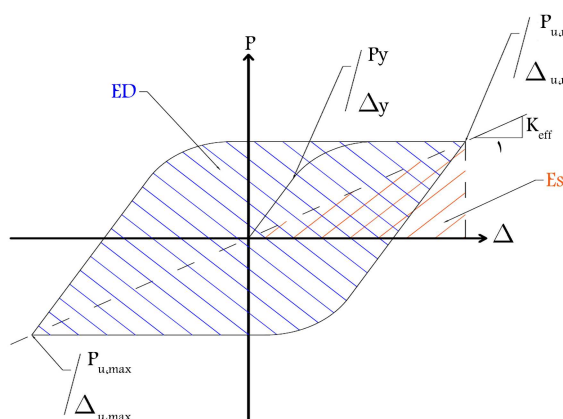
که در آنها، $\bar{\sigma}$ تانسور تنش مؤثر (تانسور تنش در غیاب خرابی) است، که در لحظه‌ی فعلی تحلیل، محاسبه شده است.

یکی از نکات کلیدی در مدل‌سازی خرابی مصالح، یافتن کرنش خمیری شروع خرابی است. در رابطه‌ی ۸، مکان هندسی متناظر پیشنهادی توسط پژوهش‌های پیشین، [۱۷] ارائه شده است؛ که در آن، C_1 برابر با $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ در برش خالص ($\eta = 0$) و C_2 برابر با $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ در کشش تک‌محوری است ($\eta = \eta_0 = \frac{1}{3}$). این مقادیر با استفاده از نتایج آزمون کشش استاندارد کالیبره می‌شوند، که برای این منظور می‌توان از گزارش‌های پیشین استفاده کرد. [۱۸] نمودار مکان هندسی استفاده شده در پژوهش حاضر در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

$$\bar{\epsilon}_0^{pl} = \begin{cases} \infty & \eta \leq -\frac{1}{3} \\ C_1 / (1 + 3\eta) & -\frac{1}{3} < \eta \leq 0 \\ C_1 + (C_2 - C_1)(\eta/\eta_0)^2 & 0 < \eta \leq \eta_0 \\ C_2(\eta_0/\eta) & \eta_0 < \eta \end{cases} \quad (8)$$

جدول ۱. ابعاد نمونه‌ها.

نمونه	متغیر	t [mm]	d [mm]	b [mm]	H [mm]	s [mm]	a [deg]
CHD-۱	Base Model	۶	۵۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۲	t	۴	۵۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۳		۸	۵۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۴		۶	۲۵	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۵	d	۶	۱۰۰	۵۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۶		۶	۵۰	۲۵	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۷	b	۶	۵۰	۱۰۰	۲۵۰	۱۴۵	۶۰
CHD-۸		۶	۵۰	۵۰	۱۵۰	۸۷	۶۰
CHD-۹	H(s)	۶	۵۰	۵۰	۲۰۰	۱۱۵	۶۰
CHD-۱۰		۶	۵۰	۵۰	۳۰۰	۱۷۳	۶۰
CHD-۱۱	a	۶	۵۰	۵۰	۲۰۴	۱۴۵	۴۵
CHD-۱۲		۶	۵۰	۵۰	۲۸۰	۱۴۵	۷۵



شکل ۱۱. سختی مؤثر و انرژی تلف شده در یک چرخه‌ی کامل.

انجام شده، افزایش تعداد سلول میراگر در راستای افق، تأثیر خطی در رفتار میراگر دارد، لذا در نمونه‌های انتخابی، یک سلول بررسی شده است.

پس از بارگذاری نمونه‌ها، با استفاده از نمودار چرخه‌ی حاصل می‌توان اطلاعات مختلفی مانند: سختی مؤثر، میرایی و بسکوز معادل و منحنی چندخطی معادل را به دست آورد. سختی مؤثر (K_{eff}) را می‌توان طبق رابطه‌ی ۹ و میرایی و بسکوز معادل (ξ) میراگر را می‌توان از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه کرد:

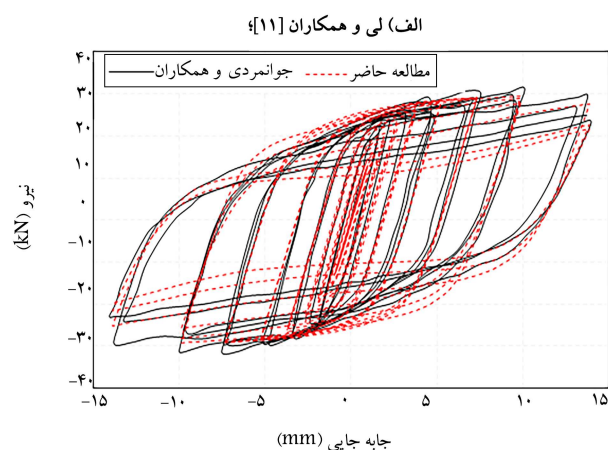
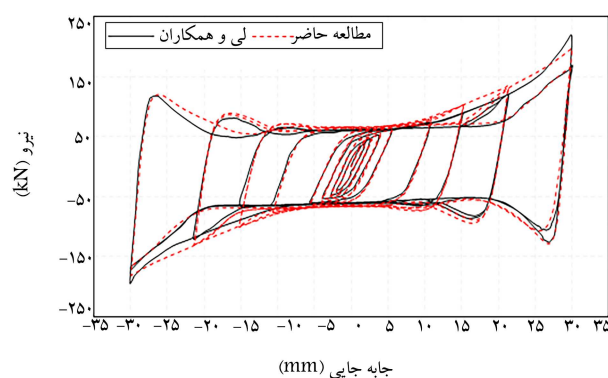
$$K_{eff} = \frac{|P_{u,max}| + |P_{u,min}|}{|\Delta_{u,max}| + |\Delta_{u,min}|} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \times \frac{E_D}{E_s} \quad (10)$$

که در آن، E_D انرژی جذب شده در یک چرخه‌ی کامل بارگذاری و E_s انرژی کرنشی کشسان در همان چرخه است.^[۲۱] دیگر پارامترهای روابط اخیر در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

۱.۵. تأثیر ضخامت

برای بررسی تأثیر ضخامت در رفتار میراگر از سه نمونه با ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر استفاده شده است. نمودار بارگذاری چرخه‌ی نمونه‌ها در شکل ۱۲ - الف مشاهده می‌شود؛ که در آن، پاسخ مدل پایه (Base Model-(BM)) متناظر با ردیف اول جدول ۱ با رنگ مشکی و نمونه با ضخامت‌های ۴ و ۸ میلی‌متر به ترتیب با رنگ قرمز و آبی نشان داده شده‌اند. با افزایش ضخامت، میزان سختی اولیه



شکل ۱۰. راستی آزمایی پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر.

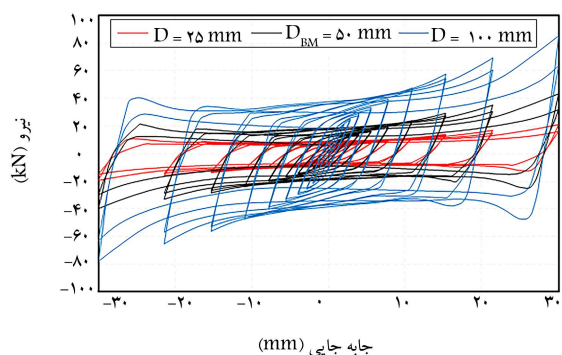
۴. راستی آزمایی مدل‌سازی

به منظور راستی آزمایی مدل‌سازی‌های انجام شده در مطالعه‌ی حاضر، از نتایج دو پژوهش به این شرح استفاده شده است:

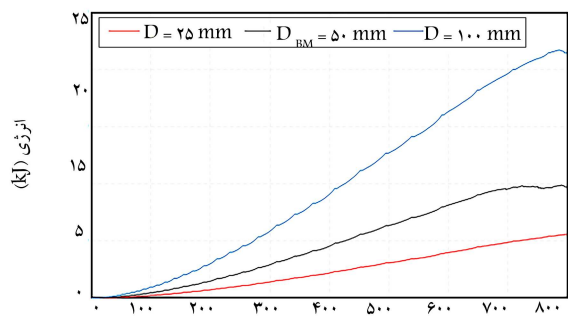
ابتدا مطالعه‌ی لی و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۱] که از مدل مصالح غیرخطی استفاده کرده‌اند، بررسی شده است. سپس به پژوهش جوانمردی و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۲] که علاوه بر مصالح غیرخطی، خرابی مصالح را نیز در نظر گرفته‌اند، پرداخته شده است. مبنی بر توضیحات اخیر، درگام نخست، میراگر نمونه‌ی ۱ (HD-۱) پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۱] تحت بارگذاری چرخه‌ی بررسی شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ - الف؛ تطابق مناسبی بین مطالعه‌ی حاضر و پژوهش مذکور وجود داشته است. نمودار رفتار چرخه‌ی نمونه‌ی شماره‌ی ۱ (HHSD-۱) پژوهش جوانمردی و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۲] در شکل ۱۰ - ب مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن مدل خرابی مصالح نیز همچنان تطابق بسیار خوبی بین نتایج ملاحظه می‌شود.

۵. مطالعه‌ی پارامتری

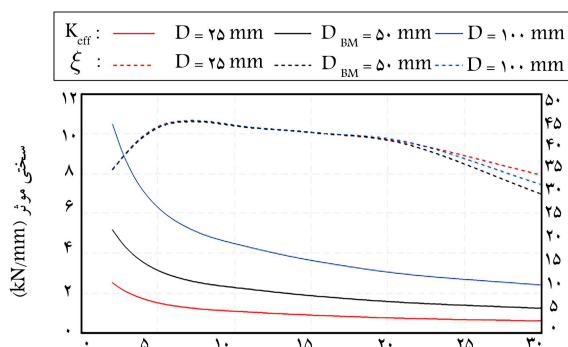
جهت بررسی عملکرد میراگر لانه‌زنبوری موجودار، ۱۲ نمونه مطابق جدول ۱ انتخاب شده است. پارامترهای جدول مطابق با نامگذاری شکل ۲ - الف هستند. بدیهی است در صورت نیاز به تراز مقاومت یا جذب انرژی بالاتر می‌توان از نمونه‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر یا ضخامت بیشتر استفاده کرد. لازم به ذکر است که با توجه به بررسی‌های



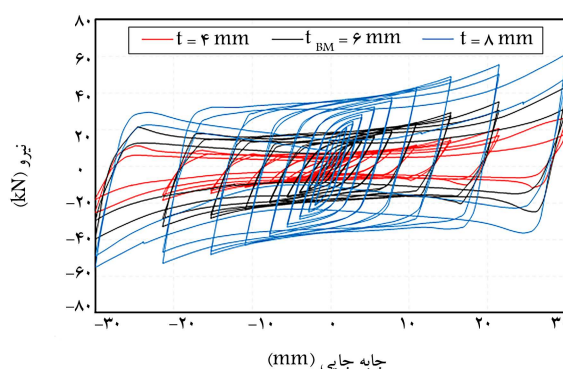
الف) رفتار چرخه‌یی؛



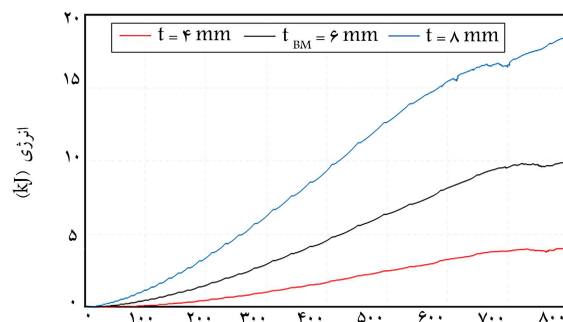
ب) انرژی جذب شده؛



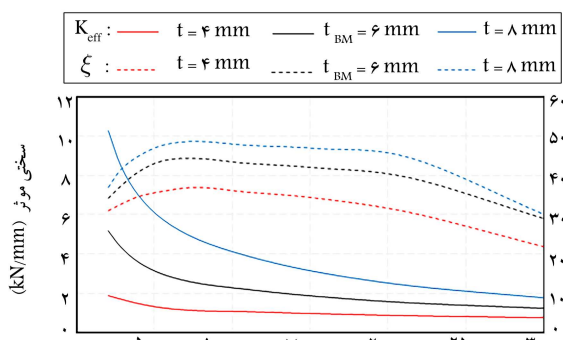
ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.
شکل ۱۳. تأثیر عمق.



الف) رفتار چرخه‌یی؛



ب) انرژی جذب شده؛



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.
شکل ۱۲. تأثیر ضخامت.

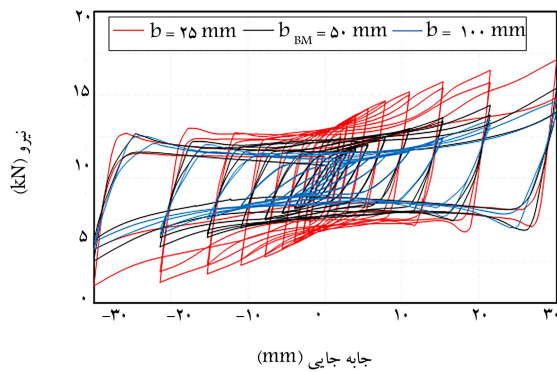
در بازه‌ی ۲۰ الی ۵۰ درصد بوده و با افزایش ضخامت میزان میرایی و همچنین سختی معادل افزایش داشته است. سختی مؤثر میراگر پس از رسیدن به حد تسلیم، به شکل قابل توجهی کاهش یافته و با افزایش ضخامت میراگر، نسبت کاهش سختی مذکور، نمایان‌تر شده است.

۲.۵. تأثیر عمق

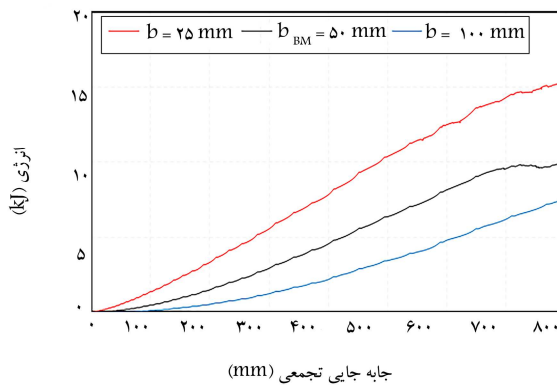
در بخش حاضر، به بررسی اثر عمق در پاسخ‌های میراگر پرداخته شده است. نمودار نیرو - تغییرمکان بارگذاری چرخه‌یی نمونه‌ها در شکل ۱۳ - الف مشاهده می‌شود. هر سه نمونه، رفتار چرخه‌یی پایدار و متقارن داشته و با افزایش عمق، سختی و مقاومت نهایی میراگر افزایش یافته است. بیشینه‌ی نیروی مقاوم نمونه با عمق ۱۰۰

و مقاومت نهایی میراگر به شکل قابل توجهی افزایش یافته است. رفتار چرخه‌یی هر سه نمونه: پایدار، متقارن و بدون اثری از زوال مقاومت و سختی بوده است.

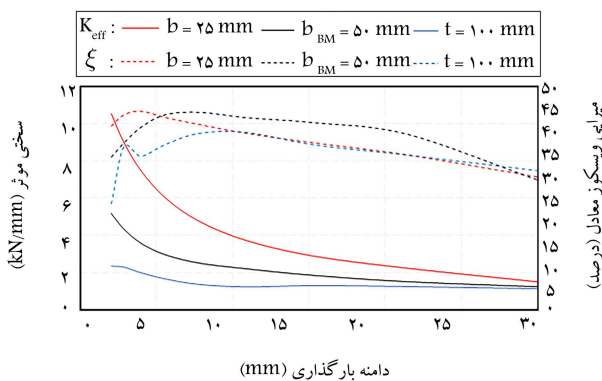
عمده‌ی رفتار میراگر لانه‌زنبوری موجدار، عملکرد کششی و خمشی آن است. با افزایش ضخامت، میزان مصالح مشارکت‌کننده افزایش داشته و باعث چاق‌تر شدن نمودارهای چرخه‌یی شده است. مطابق شکل ۱۲ - ب، با افزایش ضخامت و چاق شدن نمودارهای چرخه‌یی، انرژی جذب شده نیز بهبود یافته است؛ به طوری که با افزایش ضخامت از ۴ به ۶ و از ۶ به ۸ میلی‌متر به ترتیب انرژی جذب شده ۱۴۱ و ۹۱ درصد افزایش داشته است. در شکل ۱۲ - ج، سختی مؤثر و میرایی و یسکوز معادل مشاهده می‌شود؛ که از منحنی‌های بارگذاری چرخه‌یی به دست آمده و مقادیر آنها برای هر دامنه‌ی بارگذاری به شکل مجزا ارائه شده است. میرایی معادل نمونه‌ها



الف) رفتار چرخه‌ای؛



ب) انرژی جذب شده؛



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.

شکل ۱۴. تأثیر عرض.

طبق شکل ۱۵ - ب، با کاهش ارتفاع، میزان جذب انرژی میراگر افزایش یافته است؛ به طوری که با تغییر ارتفاع از ۳۰۰ به ۲۵۰، از ۲۵۰ به ۲۰۰ و از ۲۰۰ به ۱۵۰ به ترتیب انرژی جذب شده ۲، ۱۱ و ۱۸ درصد افزایش داشته است. همان‌طور که در شکل ۱۵ - ج مشاهده می‌شود، میرایی معادل نمونه‌ها در انتهای بارگذاری ۲۳ الی ۳۵ درصد بوده و همچنین با کاهش ارتفاع، سختی مؤثر نمونه‌ها افزایش داشته است.

۵.۵. تأثیر زاویه

در بخش حاضر، به بررسی نمونه‌ها با زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه پرداخته شده است. با تغییر در زاویه نمونه‌ها، طول عضو مورب (s) ثابت نگه داشته

میلی‌متر برابر با ۸۷ کیلونیوتن بوده است، که بیشترین مقدار در بین ۱۲ نمونه‌ی انتخابی بوده است. با توجه به شکل ۱۳ - ب، با افزایش عمق از ۲۵ به ۵۰ و از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌متر، انرژی جذب شده به ترتیب ۷۴ و ۱۲۲ درصد افزایش داشته است. همچنین مطابق با شکل ۱۳ - ج، با تغییر عمق، میرایی معادل تغییر محسوسی نداشته و برای همه‌ی نمونه‌ها در بازه‌ی ۳۰ الی ۴۸ درصد قرار گرفته است. از سوی دیگر، با افزایش عمق، میزان سختی مؤثر افزایش یافته و با ۲ برابر شدن عمق، سختی مؤثر نیز حدوداً ۲ برابر شده است.

۳.۵. تأثیر عرض

نمونه‌هایی با عرض ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر برای بررسی اثر مشخصه‌ی عرض در رفتار میراگر انتخاب شده‌اند. با کوچک شدن عرض، سختی عضو افقی نسبت به چرخش دو انتهای آن بیشتر شده و توانسته است مهار جانبی بیشتری برای اعضاء مورب در ناحیه‌ی اتصال‌شان ایجاد کند. در نتیجه با کاهش عرض، سختی میراگر به شکل قابل توجهی افزایش یافته است، که در شکل ۱۴ - الف مشهود است. از سوی دیگر، با افزایش عرض، طول ناحیه‌ی که میراگر به شکل کشسان رفتار می‌کند، افزایش خواهد داشت. همان‌طور که در شکل اخیر مشخص است که با کاهش عرض، رفتار چرخه‌ای بهبود داشته و نمونه‌ها، چرخه‌هایی بدون افت مقاومت و سختی را طی کرده‌اند.

در شکل ۱۴ - ب، انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها مشاهده می‌شود. با کاهش عرض از ۱۰۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۲۵ میلی‌متر، انرژی جذب شده به ترتیب ۲۹ و ۵۷ درصد افزایش داشته است. طبق شکل ۱۴ - ج، نمونه‌ها با عرض ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌متر به جز چند چرخه‌ی ابتدایی، میرایی معادل یکسانی داشته‌اند؛ اما نمونه‌ی پایه با عرض ۵۰ میلی‌متر در تمام چرخه‌ها، اندکی میرایی بالاتری از دو نمونه‌ی اخیر داشته است. همچنین با کاهش عرض، میزان سختی مؤثر میراگر در بارگذاری چرخه‌ای افزایش یافته است.

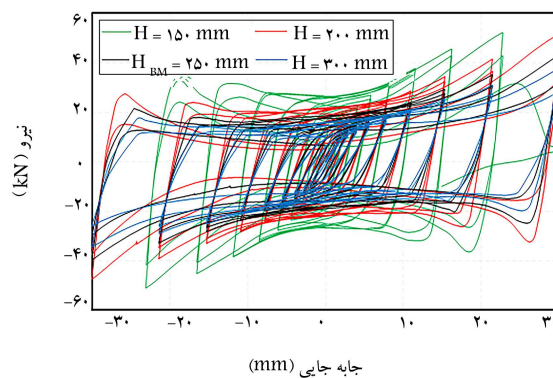
۴.۵. تأثیر ارتفاع

تأثیر تغییرات ارتفاع با افزایش مقدار آن از ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر بررسی شده است. لازم به ذکر است که با تغییر ارتفاع، طول اعضاء مورب (s) نیز مطابق مقادیر جدول ۱ تغییر کرده است. با توجه به شکل ۱۵ - الف، با کاهش ارتفاع، سختی و بیشینه‌ی نیروی مقاوم میراگر افزایش یافته و میراگر، نمودارهای چرخه‌ای چاق‌تری داشته است. نکته‌ی که در نمودار اخیر بارگذاری چرخه‌ای مورد توجه است، وقوع خرابی کامل در نمونه با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر است. نمای میراگر ذکر شده، در آخرین گام پایدار بارگذاری چرخه‌ای در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. که مطابق آن، بیشترین تنش و متعاقباً کرنش خمیری در دو انتهای قسمت افقی رخ داده است. لذا شروع و گسترش خرابی میراگر نیز در همین ناحیه متمرکز بوده است. این نوع گسیخته شدن اعضا در نمونه‌های آزمایشگاهی جوانمردی و همکاران (۲۰۲۰) [۱۳] نیز مشاهده شده است.

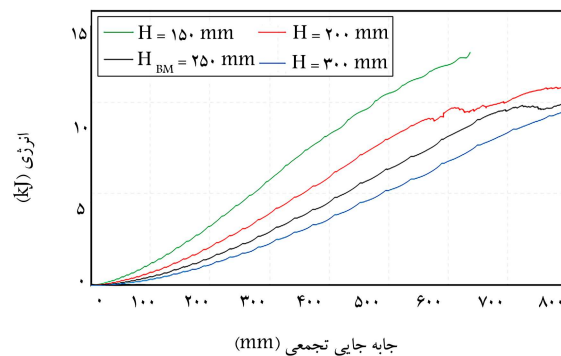
با بررسی‌های انجام شده، مشخص شد نمونه‌هایی که گریز نسبی (نسبت جابه‌جایی جانبی دو سر میراگر به ارتفاع میراگر) در آنها بیشتر از حدود ۱۵٪ بوده است، نتوانسته‌اند بارگذاری چرخه‌ای را تا انتها (با دامنه‌ی ۳۰ میلی‌متر) طی کنند. با در نظر گرفتن این موضوع، کمینه‌ی ارتفاع مجاز میراگر لانه‌زنبوری موجد برای جابه‌جایی هدف ۳۰ میلی‌متر را می‌توان برابر با ۲۰۰ میلی‌متر در نظر داشت، که این موضوع یکی از ملاک‌های انتخاب نمونه‌های جدول ۱ بوده است.

شده است. در نتیجه با تغییر زاویه، ارتفاع میراگر نیز تغییر خواهد کرد. مطابق شکل ۱۷ - الف، کاهش زاویه، تأثیر قابل توجهی در سختی اولیه است. زیرا هر چه زاویه‌ی اعضا مورب با افق کمتر شده است، سختی محوری اعضا مذکور، سهم بیشتری از سختی کل را داشته‌اند (عملکرد مهاربندگونه)؛ در حالی که هر چه زاویه‌ی اعضا مورب به قائم نزدیک‌تر بوده است، سختی محوری کمتر وارد عمل شده و فقط سختی خمشی عضوهای مورب اثرگذار بوده است.

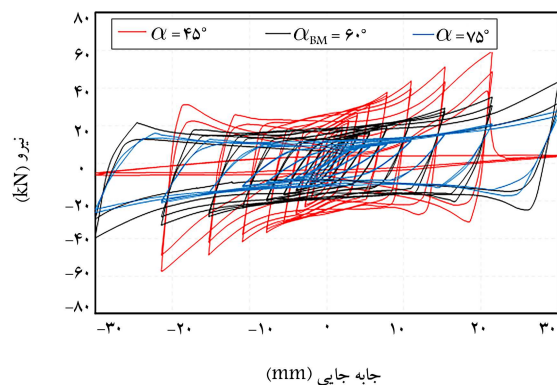
همچنین با کاهش زاویه، نیروی مقاوم میراگر افزایش یافته است. رفتار چرخه‌یی میراگر نیز با کاهش زاویه، بهبود یافته است. از سوی دیگر، نمونه با زاویه ۴۵ درجه تا انتهای چرخه با دامنه‌ی ۲۲ میلی‌متر رفتار مناسبی داشته است، اما پس از طی



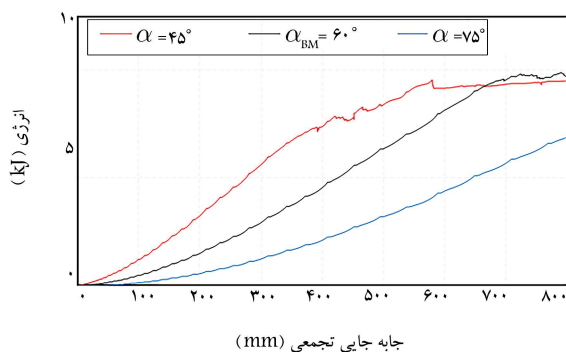
الف) رفتار چرخه‌یی؛



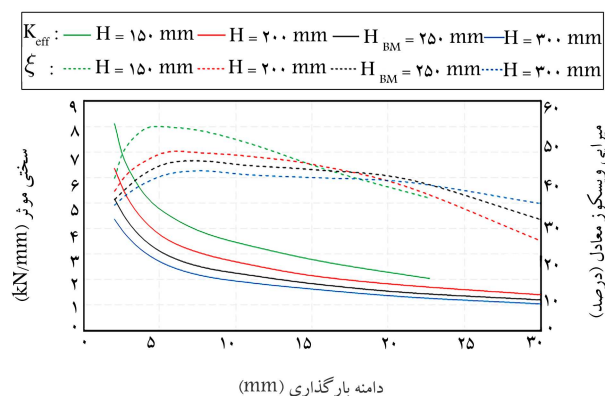
ب) انرژی جذب شده؛



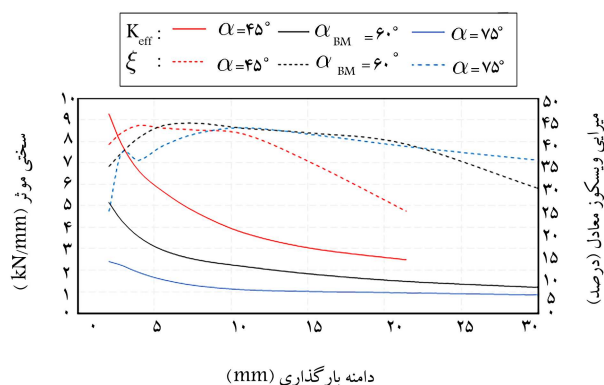
الف) رفتار چرخه‌یی؛



ب) انرژی جذب شده؛

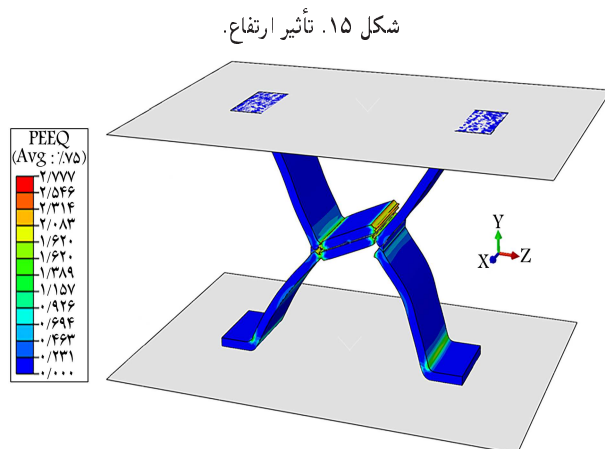


ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.



ج) سختی مؤثر و میرایی معادل.

شکل ۱۷. تأثیر زاویه.



شکل ۱۶. شاخص PEEQ میراگر نمونه‌ی ۱۵ پیش از گسیختگی کامل.

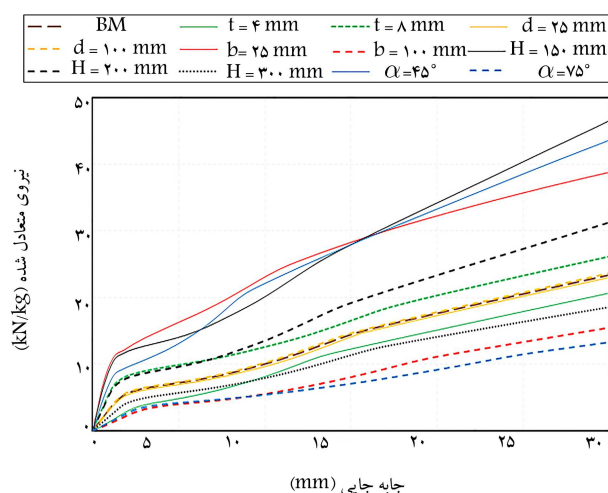
جدول ۲. مقایسه‌ی مشخصه‌های مکانیکی برخی از میراگرهای تسلیمی پیشین و میراگر لانه‌زن‌بوری موجدار.

مشخصه‌ی میراگر	CHD	DPD ^[۸]	TADAS ^[۱۴]	BSD ^[۱۵]	HHS ^[۳]	HSD ^[۲]
وزن (kg)	۱/۶	۴	۴۶	۱/۳	۱/۲	۰.۰۰
ارتفاع (mm)	۲۵۰	۱۱۰-۱۱۴	۳۰۴	۸۰	۱۴۰	۲۰۳
سختی کشسان (kN/mm)	۱۸/۷۱	۹/۷۵	۶۷/۵	۳۷/۶	۰.۰۰	۳۸/۳
میرایی (%)	۴۴	۴۵	۲۴۶	۳۷	۲۹/۵	۰.۰۰
ظرفیت تغییرشکل ^۳ (-)	۱۲	۳۰	۲۹	۲۸	۸	۱۳
جابه‌جایی تجمعی (mm)	۸۰۰	۸۰۰	۰.۰۰	۴۰۰	۲۱۵	۸۰۰
انرژی جذب شده (kJ)	۱۵/۳	۱۸/۷۵	۰.۰۰	۲۵	۵/۵۵	۰.۰۰
انرژی جذب شده‌ی متعادل به وزن (kJ/kg)	۹/۵۶	۴/۶۹	۰.۰۰	۱۹	۴/۶	۱۳/۵
بیشینه‌ی نیروی مقاوم (kN)	۵۷	۵۷/۵	۵۷۶	۱۶۲	۵۰	۴۸
بیشینه‌ی نیروی مقاوم متعادل به وزن (kN/kg)	۳۶/۶	۱۴/۴	۱۲/۵	۱۲۴	۴۱/۷	۰.۰۰
رفتار چرخه‌یی	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار	متقارن و پایدار

۱. موجود نیست.

۲. برگرفته از نوشتار ملکی و همکاران.^[۷]

۳. نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان قابل تحمل به ارتفاع میراگر.



شکل ۱۸. نیروی مقاوم متعادل شده به وزن میراگر CHD تحت بارگذاری یک‌نواخت.

ایجاد کرده است. به کارگیری زاویه‌ی کمتر از ۴۵ درجه نیز توصیه نمی‌شود؛ زیرا برای جلوگیری از گسیختگی کامل میراگر لازم است ارتفاع کمینه‌ی رعایت شود، که این امر باعث افزایش بیش از اندازه‌ی طول اعضاء مورب و احتمال کمانش در آنها خواهد شد. بنابر موارد ذکر شده، توصیه می‌شود برای مشخصه‌های عرض، زاویه و ارتفاع، مقدار کمینه‌ی در نظر گرفته شود و با تغییر ضخامت، عمق و تعداد سلول میراگر به مشخصات مکانیکی مورد نیاز طراحی دست یافت. از بین سه عامل اخیر، مشخصه‌ی ضخامت، بیشترین تأثیر را داشته و تغییر در عمق و تعداد سلول (درافق) به صورت خطی در رفتار میراگر اثرگذار بوده‌اند.

در جدول ۲، مقایسه‌ی بین میراگر لانه‌زن‌بوری موجدار (نمونه‌ی شماری ۶ در جدول ۱) و برخی از میراگرهای تسلیمی شناخته شده صورت گرفته است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، میراگر لانه‌زن‌بوری موجدار، قابلیت جذب انرژی، مقاومت نیرویی و میرایی مناسبی داشته و به خوبی می‌تواند از سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی محافظت کند.

اولین چرخه از دامنه‌ی بارگذاری ۳۰ میلی‌متر دچار گسیختگی شده است. این گسیختگی به دلیل زیاد بودن گریز نسبی دو سر میراگر بوده و با افزایش ارتفاع میراگر، نمونه با زاویه‌ی ۴۵ درجه نیز تا انتهای بارگذاری چرخه‌ی، می‌توانست رفتار مطلوبی داشته باشد.

جهت مقایسه‌ی انرژی جذب شده توسط سه میراگر مذکور، پارامتر اخیر تا جابه‌جایی تجمعی ۴۰۰ میلی‌متر مدنظر قرار گرفته است. بر اساس شکل ۱۷ - ب، با کاهش زاویه از ۷۵ به ۶۰ و از ۶۰ به ۴۵، انرژی جذب شده به ترتیب ۱۱۲ و ۶۲ درصد افزایش داشته است. منطبق بر نتایج، رفتار میراگر با زاویه‌ی ۴۵ درجه بهتر از دیگر نمونه‌ها ارزیابی شده است. مطابق شکل ۱۷ - ج، میرایی و اسکوز معادل نمونه‌ها در بازه‌ی ۲۵ الی ۴۵ درصد بوده و با کاهش زاویه، سختی مؤثر میراگر افزایش یافته است.

۶. بررسی و مقایسه‌ی نتایج

در بخش حاضر، به بررسی هندسه‌ی بهینه‌ی میراگر پیشنهادی پرداخته شده است. برای این کار، علاوه بر استناد بر نتایج ارائه شده در بخش ۵، به نیروی مقاوم متعادل شده به وزن نمونه‌ها تحت بارگذاری یک‌نواخت نیز توجه شده است. بر این اساس و مطابق با شکل ۱۸، تغییر عمق، تأثیری در پاسخ متعادل شده به وزن نداشته است. از سوی دیگر، ارتفاع، زاویه، عرض و ضخامت بیشترین تأثیر را در پاسخ بارگذاری یک‌نواخت داشته‌اند.

با توجه به نتایج ارائه شده، برای عرض، ارتفاع، و زاویه‌ی میراگر می‌توان یک مقدار بهینه متصور بود. با کاهش عرض، به شکل پیوسته رفتار میراگر بهبود یافته است، لذا توصیه می‌شود یک عرض کمینه فقط برای تأمین کمینه‌ی فواصل خم‌کاری و دیگر مسائل اجرایی و ساخت میراگر در نظر گرفته شود. کاهش ارتفاع میراگر نیز باعث افزایش کارایی شده است، اما این مورد محدود به بازه‌ی مشخص بوده و کاهش بیش از اندازه‌ی ارتفاع منجر به گسیختگی کامل در پایان بارگذاری چرخه‌ی شده است (کاهش شکل‌پذیری). تأثیر زاویه نیز به همین ترتیب بوده و استفاده از زاویه‌ی ۴۵ درجه، رفتار مطلوب‌تری را

جدول ۳. مشخصه‌های مکانیکی نمونه‌ی میراگرهای لانه‌زنبوری موجودار.

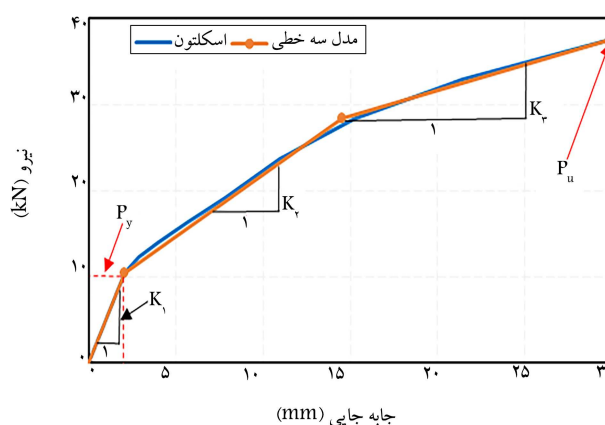
نمونه	مولفه متغیر	$K_{el,t}$ (kN/mm)	$K_{el,n}$ (kN/mm)	$K_{el,t}$ (kN/mm)	K_1 (kN/mm)	K_p (kN/mm)	K_p (kN/mm)	K_p/K_1	K_p/K_1	P_y (kN)	P_u (kN)	E_D (kJ)	Mass (kg)
CHD-۱	BM	۵/۳۵	۶/۰۰	۰/۸۹	۵/۱۴	۱/۳۵	۰/۶۳	۰/۲۶	۰/۱۲	۱۰/۴	۴۳/۳	۹/۷	۱/۸۴
CHD-۲	$t=۴$	۱/۶۱	۱/۷۳	۰/۹۳	۱/۸۹	۰/۸۳	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۲۶	۲/۸	۲۶/۵	۴/۰	۱/۲۴
CHD-۳	$t=۸$	۱۲/۴۴	۱۴/۳۰	۰/۸۷	۱۰/۱۹	۲/۴۸	۰/۶۴	۰/۲۴	۰/۰۶	۲۰/۷	۶۱/۴	۱۸/۵	۲/۴۵
CHD-۴	$d=۲۵$	۲/۶۸	۲/۹۳	۰/۹۱	۲/۴۹	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۲۶	۰/۱۳	۵/۱	۲۱/۰	۵/۶	۰/۹۲
CHD-۵	$d=۱۰۰$	۱۰/۷۰	۱۲/۱۷	۰/۸۸	۱۰/۴۳	۲/۶۳	۱/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۲	۲۱/۲	۸۵/۳	۲۱/۵	۳/۶۷
CHD-۶	$b=۲۵$	۱۴/۶۴	۱۸/۷۱	۰/۷۸	۸/۸۹	۱/۵۹	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۰۲	۲۱/۰	۵۷/۰	۱۵/۳	۱/۶۰
CHD-۷	$b=۱۰۰$	۲/۳۳	۲/۲۸	۰/۹۸	۲/۲۷	۱/۰۵	۰/۹۹	۰/۴۶	۰/۴۴	۴/۷	۳۷/۰	۷/۵	۲/۰۷
CHD-۸	$H=۱۵۰$	۱۲/۵۳	۱۳/۰۰	۰/۹۶	۷/۸۶	۲/۲۷	۰/۸۸	۰/۲۹	۰/۱۱	۱۶/۱	۵۲/۱	۱۲/۷	۱/۲۹
CHD-۹	$H=۲۰۰$	۷/۶۶	۸/۵۶	۰/۹۰	۵/۱۶	۱/۵۰	۰/۶۳	۰/۲۹	۰/۱۲	۱۲/۷	۵۱/۷	۱۰/۸	۱/۵۷
CHD-۱۰	$H=۳۰۰$	۴/۰۵	۴/۵۴	۰/۸۹	۴/۳۵	۱/۲۳	۰/۵۶	۰/۲۸	۰/۱۳	۸/۸	۳۸/۰	۹/۵	۲/۱۱
CHD-۱۱	$a=۴۵$	۱۲/۵۶	۱۴/۶۴	۰/۸۶	۹/۱۱	۳/۱۹	۱/۲۶	۰/۳۵	۰/۱۴	۱۸/۵	۵۹/۶	۹/۵	۱/۸۴
CHD-۱۲	$a=۷۵$	۲/۱۳	۲/۳۹	۰/۸۹	۲/۲۵	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۳۳	۴/۹	۲۷/۸	۶/۹	۱/۸۴
میانگین	-	-	-	۰/۹۰	-	-	-	۰/۳۰	۰/۱۷	-	-	-	۱/۸۷

دلیل خم‌کاری ورق‌های فولادی است، که در تحلیل ماتریسی، خم‌های ذکر شده لحاظ نشده‌اند. مطابق شکل ۱۹، پارامترهای K_1 ، K_2 و K_3 سختی‌های منحنی سه‌خطی و همچنین P_y و P_u به ترتیب نیروی تسلیم و بیشینه‌ی نیروی مقاوم میراگر هستند.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نوع جدیدی از میراگرهای تسلیمی با عنوان میراگر لانه‌زنبوری موجودار ارائه شده است. میراگر لانه‌زنبوری دارای هزینه‌ی ساخت اولیه‌ی کم، ساخت و به کارگیری آسان و نیز قابلیت تعویض ساده پس از تحمل بارگذاری است. در طی پژوهش حاضر، رابطه‌ی سختی اولیه‌ی میراگر بر اساس تحلیل ماتریسی به دست آمده است. طی مطالعات پارامتری بر روی مدل اجزاء محدود، تأثیر هر یک از مشخصه‌های هندسی در رفتار میراگر لانه‌زنبوری موجودار بررسی و بدین ترتیب هندسه‌ی بهینه‌ی میراگر معرفی شده است. همچنین با استفاده از نمودارهای بارگذاری چرخشی، میرایی معادل، سختی مؤثر و مدل رفتاری سه‌خطی میراگر ارائه شده است. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. طی بارگذاری چرخشی، در نمونه‌هایی که محدودیت نسبت گریز نسبی در آنها برآورده شده بود، رفتاری پایدار، متقارن و بدون اثری از باریک‌شدگی مشاهده شد.
۲. با افزایش ضخامت و عمق یا کاهش عرض، ارتفاع و زاویه می‌توان سختی میراگر لانه‌زنبوری موجودار را افزایش داد و با مقدار مورد نیاز طراحی منطبق ساخت.
۳. با کاهش عرض، پیوسته رفتار میراگر بهبود داشته است، در نتیجه توصیه می‌شود از یک عرض کمینه فقط برای تأمین کمینه‌ی فواصل خم‌کاری و دیگر مسائل اجرایی استفاده شود.
۴. با کاهش زاویه و ارتفاع و یا افزایش ضخامت، عمق و تعداد سلول میراگر در راستای افقی، رفتار چرخشی و انرژی جذب شده‌ی میراگر بهبود یافته است.
۵. کاهش ارتفاع، زاویه و عرض میراگر منجر به کاهش شکل‌پذیری شده است. لذا باید متناسب با میزان گریزنسبی مورد نیاز طرح تنظیم شوند.



شکل ۱۹. نمودار اسکلتون و مدل سه‌خطی نمونه‌ی پایه.

۷. مدل سه‌خطی رفتار میراگر

برای به دست آوردن برخی از پارامترهای پاسخ میراگر، نظیر منحنی سه‌خطی رفتار میراگر، نیرو و جابه‌جایی تسلیم، می‌توان از منحنی اسکلتون^{۲۸} استفاده کرد. در این راستا و بر اساس نمودارهای حاصل از پژوهش حاضر، منحنی اسکلتون بر اساس نمودار چرخشی ترسیم شده است. سپس برای به دست آوردن منحنی سه‌خطی از نمودار اسکلتون، منطبق بر روش پیشنهادی FEMA ۳۵۶^[۲۲] عمل شده است. بدین منظور شیب خطوط باید به نحوی انتخاب شود که مساحت میان نمودار اسکلتون و سه‌خطی در قسمت بالا و پایین آن با هم یکسان باشد. به عنوان مثال، نمودار اسکلتون و منحنی سه‌خطی نمونه‌ی پایه در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. مقادیر عددی پارامترهای به دست آمده از منحنی‌های مذکور برای تمام نمونه‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است. که در آن، $K_{el,t}$ معرف سختی اولیه‌ی میراگر طبق رابطه‌ی ۲ و $K_{el,n}$ سختی اولیه‌ی به دست آمده از تحلیل عددی هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، رابطه‌ی تحلیلی ارائه شده، دقت مناسبی داشته است. شایان ذکر است بخشی از خطای موجود در تخمین سختی، به

پانویسها

1. Kelly
2. Bergman
3. Added Damping And Stiffness (ADAS)
4. Tsai
5. Triangular Added Damping And Stiffness (TADAS)
6. Nakashima
7. Low Yield Steel
8. Shear Panel Damper (SPD)
9. Chen
10. Stiffened Shear Panel Damper (SSPD)
11. Pinching
12. Pipe Damper (PD)
13. Dual Pipe Damper (DPD)
14. Pipe In Pipe (PIP)
15. Block Slit Damper (BSD)
16. Shear-Bending Combined (SBC)
17. Shear Panel (SP)
18. Honeycomb Damper (HD)
19. Honeycomb Structural Fuse (HSF)
20. Drift Ratio
21. Hexagonal Honeycomb Steel Damper (HHSD)
22. Corrugated Honeycomb Damper (CHD)
23. Degree of Freedom (DOF)
24. Tie
25. Hard Contact
26. Ductile Damage
27. Stress Triaxiality
28. Skeleton Curve

منابع (References)

1. Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, **5**(3), pp. 63-73 (1972).
2. Bergman, D.M. "Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness", *Rep. No. UMCE87-10. MI, USA Univ. Michigan* (1987).
3. Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and et al. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthq. Spectra*, **9**(3), pp. 505-528 (1993).
4. Nakashima, M., Iwai, I., Iwata, M. and et al. "Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **23**(12), pp. 1299-1313 (1994).
5. Chen, Z., Ge, H. and Usami, T. "Hysteretic model of stiffened shear panel dampers", *J. Struct. Eng.*, **132**(3), pp. 478-483 (2006).
6. Maleki, S. and Bagheri, S. "Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study", *J. Constr. Steel Res.*, **66**(8-9), pp. 1088-1095 (2010).
7. Maleki, S. and Mahjoubi, S. "Dual-pipe damper", *J. Constr. Steel Res.*, **85**, pp. 81-91 (2013).
8. Cheraghi, A. and Zahrai, S.M. "Cyclic testing of multi-level pipe in pipe damper", *J. Earthq. Eng.*, **23**(10), pp. 1695-1718 (2019).
9. Ahmadi Amiri, H., Najafabadi, E.P. and Estekanchi, H.E. "Experimental and analytical study of block slit damper", *J. Constr. Steel Res.*, **141**, pp. 167-178 (2018).
10. Li, Z., Shu, G., and Huang, Z. "Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper", *J. Constr. Steel Res.*, **158**, pp. 28-40 (2019).
11. Lee, M., Lee, J. and Kim, J. "Seismic retrofit of structures using steel honeycomb dampers", *Int. J. Steel Struct.*, **17**, pp. 215-229 (2017).
12. Yang, T.Y., Li, T., Tobber, L. and et al. "Experimental and numerical study of honeycomb structural fuses", *Eng. Struct.*, **204**, p. 109814 (2020).
13. Javanmardi, A., Ghaedi, K., Ibrahim, Z. and et al. "Development of a new hexagonal honeycomb steel damper", *Arch. Civ. Mech. Eng.*, **20**(63), pp. 1-19 (2020).
14. Dassault Systèmes Simulia, "Abaqus CAE user's Manual", (2017).
15. Yazdi, M. "Design of fillet welds in plastic state", *M.Sc. Thesis*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (In Persian) (1396/2018).
16. Saneei Nia, Z., Ghassemieh, M. and Mazroi, A. "WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading", *J. Constr. Steel Res.*, **88**, pp. 90-108 (2013).
17. Wierzbicki, T., Bao, Y., Lee, Y.W. and et al. "Calibration and evaluation of seven fracture models", *Int. J. Mech. Sci.*, **47**(4-5), pp. 719-743 (2005).
18. Eshraghi, S. and Carolan, M.E. "Quick calibration of fracture behaviors in TC128 steel for finite element modeling", *Rep. No. DOT/FRA/ORD-20/46*.US. Federal Railroad Administration (2020).
19. Yu, H.L. and Jeong, D.Y. "Application of a stress triaxiality dependent fracture criterion in the finite element analysis of unnotched charpy specimens", *Theor. Appl. Fract. Mech.*, **54**(1), pp. 54-62 (2010).
20. FEMA 461, "Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and non-structural components", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC (USA) (2007).
21. Chopra, A. "Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering", *5th ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall* (2020).
22. FEMA 356, "Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC (USA) (2000).