



http://journaliss.ir

طراحی سخت کننده بهینه برای صفحات برشی فولادی با بازشوی مربعی مرکزی

سید علی حسینی^۱، سید علی اصغر حسین زاده^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، سازه، دانشگاه گلستان، گرگان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گلستان، گرگان

*گلستان، صندوق پستی ۴۹۱۳۸۱۵۷۵۹، ahosseinzade@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، از یک رویه نظام مند، مبتنی بر روش المان محدود، برای طراحی بهینه سخت کننده های صفحات برشی فولادی با بازشوی مربعی مرکزی استفاده می شود. شش آرایش مختلف از سخت کننده های افقی و عمودی که به یک سمت صفحات برشی دارای بازشوی مربعی با نسبت ابعاد مختلف، متصل شده اند مورد توجه قرار می گیرد. با استفاده از نتایج تحلیل های کمانشی مقادیر ویژه، ضخامت ها و ارتفاع های بهینه سخت کننده ها برای هر آرایش و نسبت ابعاد بازشو تعیین و به شکل نمودارهای طراحی ارائه می شود. هدف این است که سخت کننده ها (بهینه) به گونه ای طراحی شوند که با تشکیل خطوط گره ای، صفحه را به بخش های کوچک تر تقسیم کنند و در نتیجه، مود کمانش موضعی را با یک مود کمانش کلی جایگزین نمایند. نتایج تحلیل های کمانشی مدل ها نشان می دهد که حضور بازشو با نسبت بعد بازشو به بعد صفحه ۰/۲، به طور نسبی ظرفیت کمانشی را حدود ۳۳٪ کاهش می دهد؛ در حالی که استفاده از سخت کننده در صفحات با بازشو، آن را بین ۳ تا ۲۵ برابر افزایش می دهد. نتایج همچنین تأیید می کند که حضور بازشو و آرایش سخت کننده ها، تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار کمانشی و مشخصات سخت کننده بهینه دارد. همچنین نتایج تحلیل های غیرخطی و چرخه ای نشان می دهد که برای یک آرایش مشخص از سخت کننده، رفتار کلی و قابلیت جذب انرژی صفحات سخت شده، تحت تأثیر مشخصات هندسی سخت کننده بهینه نیست.

واژگان کلیدی

صفحات برشی فولادی، کمانش موضعی، سخت کننده بهینه، المان محدود، کمانش، آنالیز چرخه ای

Optimal Stiffener Design for Steel Shear Plates with Central Square Openings

S.A. Hosseini, S.A.A. Hosseinzadeh

Abstract

In this study, a systematic finite element analysis procedure is developed to facilitate optimal stiffener design for steel shear panels with central square openings. The research investigates six different arrangements of horizontal and vertical stiffeners connected to one side of shear panels with varying opening sizes. Based on buckling analysis results, optimal stiffener dimensions (thickness and height) are determined for each stiffener configuration and opening ratio, presented through design charts. The objective is to design stiffeners such that they partition the panel into smaller subpanels by forming nodal lines, thereby transforming the local buckling mode into a global one. The buckling analysis results of the models show that the presence of an opening (with opening dimension to plate dimension of 0.2) relatively reduces the buckling capacity by approximately 33%, while using stiffeners increases it by a factor of 3 to 25. Results also demonstrate that both the presence of openings and stiffener arrangement significantly influence buckling behavior and optimal stiffener dimensions. Furthermore, nonlinear static and cyclic quasi-static analysis results reveal that for specific stiffener configurations, the global behavior and energy dissipation capacity of optimally stiffened perforated plates remain consistent across different stiffener geometries.

Keywords

Steel Shear Panel, Local Buckling, Optimal Stiffener, Finite Element, Buckling, Cyclic Analysis



صفحات برشی^۱ به عنوان اعضای سازه‌ای مهندسی، دارای کاربرد گسترده‌ای در ساخت انواع تیروورق‌های مورد استفاده در پل‌ها و ساختمان‌ها، سیستم‌های مهاربندی قاب، مخازن ذخیره مایعات و گازها، پناهگاه‌ها، سازه‌های فراساحلی، کشتی‌سازی، دال‌ها، مقاطع فولادی گرم نوردشده، دیوارهای برشی فولادی و بسیاری دیگر از سازه‌ها هستند. این صفحات، بر اساس کاربرد، در محدوده وسیعی از نسبت‌های لاغری، به‌ویژه لاغری‌های زیاد (ضخامت‌های کم)، استفاده می‌شوند. صفحات برشی با ضخامت کم، مستعد کماتش تحت بارهای جانبی هستند که این موضوع منجر به کاهش سختی جانبی آن‌ها می‌شود. وقوع کماتش که با تغییر شکل ناگهانی عمود بر صفحه ورق همراه است، بر رفتار صفحه قبل از وقوع تسلیم، ویژگی‌های رفتاری صفحه در ارتباط با ایجاد تسلیم و الگوی توسعه آن در سطح ورق و همچنین رفتار پس از تسلیم اثرگذار است. از این رو مطالعه رفتار کماتشی و پس از کماتش صفحات نازک، همراه با تحقیق در مورد راهکارها و روش‌های گوناگون بهبود خصوصیات کماتشی این صفحات و تحلیل ویژگی‌های مرتبط با آن، همواره یکی از موضوعات جذاب تحقیقاتی به‌شمار می‌آید [۱].

دیوار برشی فولادی، یک سیستم کارآمد و مقاوم در برابر نیروهای جانبی است که استفاده از آن به‌ویژه در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. پیکربندی‌های مختلفی از این سیستم، از جمله سخت‌شده، سخت‌نشده و حفره‌دار در طراحی سازه‌های جدید و یا بهسازی سازه‌های موجود استفاده می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این سیستم با داشتن مقاومت و سختی الاستیک بالا، قابلیت شکل‌پذیری مناسب و توانایی جذب انرژی قابل توجه، که بخش عمده آن ناشی از حضور ورق در این سیستم است، عملکرد بسیار خوبی را در برابر نیروهای لرزه‌ای ارائه می‌دهد [۲ و ۳].

تسلیم ورق در دیوار برشی فولادی، به‌عنوان عنصر کلیدی جذب انرژی، اجزای مرزی دیوار و بخش‌های دیگر سازه را در برابر بارهای وارده محافظت می‌کند. بنابراین ورق در این سیستم، به‌عنوان عنصر اصلی در باربری و تحمل بار محسوب می‌شود. همچنین، با توجه به جزئیات اتصالات پیچی در ناحیه اتصال ورق به اعضای مرزی، امکان تعویض ورق آسیب‌دیده پس از زلزله، شرایط مناسبی را برای بازیابی ظرفیت و قابلیت جذب انرژی سیستم در زلزله‌های احتمالی آینده فراهم می‌آورد [۴].

از ویژگی‌های مهم رفتاری سیستم دیوار برشی فولادی، بروز پدیده کماتش در ورق‌های نازک فولادی است که تأثیر چشمگیری بر عملکرد کلی سیستم و ظرفیت جذب انرژی آن دارد. در نوع سخت‌شده این سیستم، به‌منظور پیشگیری یا به تعویق انداختن کماتش خارج از صفحه ورق پرکننده و همچنین کاهش یا حذف اثرات منفی ناشی از آن بر رفتار صفحه و توانایی جذب انرژی، از سخت‌کننده‌هایی استفاده می‌شود که معمولاً به‌صورت افقی و عمودی در یک سمت ورق نصب می‌شوند [۵]. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از انواع سخت‌کننده‌ها، در صورتی که دارای ابعاد مناسب باشند، می‌تواند با توجه به نحوه چیدمان سخت‌کننده‌ها، به شکل قابل توجهی بر روی مشخصه‌های رفتاری نظیر مقاومت، تغییرات سختی و ظرفیت جذب انرژی صفحه تأثیر بگذارد [۶ و ۷].

تیروورق‌ها یکی دیگر از المان‌های پرکاربرد در سازه‌های فولادی هستند و از صفحات بال و جان تشکیل شده‌اند. تیروورق‌ها، علی‌رغم شباهت ظاهری به سیستم دیوار برشی فولادی، به دلیل اختلاف در سختی خمشی درون صفحه ستون‌ها و بال‌های تیروورق، عملکرد متفاوتی از یکدیگر دارند [۸]. با توجه به اهداف طراحی، از سخت‌کننده‌های مختلفی نظیر افقی، عمودی و یا قطری، برای بهبود رفتار تیروورق‌ها در شرایط مختلف از بارگذاری استفاده می‌شود. سخت‌کننده‌های عمودی با ابعاد مناسب به‌منظور افزایش ظرفیت کماتشی و مقاومت نهایی تیروورق‌ها تحت بارهای برشی یا بارهای متمرکز به‌کار می‌روند [۹]. در حالی که استفاده از سخت‌کننده‌های افقی یا طولی با طراحی هندسی مناسب، به‌ویژه در نواحی فوقانی یا تحتانی جان، اغلب با هدف افزایش ظرفیت باربری و بهبود مقاومت کماتشی تحت بارهای خمشی انجام می‌شود [۱۰].

علی‌نیا و دستفان، در مطالعه‌ای تأثیر سخت‌کننده‌ها بر رفتار غیرخطی و چرخه‌ای صفحات برشی فولادی با استفاده از روش‌های عددی را ارزیابی کردند [۱۱]. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که طراحی و استفاده بهینه از سخت‌کننده‌ها می‌تواند مقاومت، قابلیت تغییر شکل‌پذیری^۲ و ظرفیت جذب انرژی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.

علی‌نیا و صراف‌شیرازی، روشی را به‌منظور کاهش مصرف فولاد و بهبود عملکرد برشی صفحات معرفی کردند [۱۲]. این روش مبتنی بر تعیین ابعاد بهینه سخت‌کننده‌های افقی و قائم (با تعداد متفاوت در هر جهت) است و بر این اصل تکیه دارد که وجود سخت‌کننده‌ها با ابعاد بهینه، باید مود کماتشی صفحات را

² Deformability

¹ Shear Panel

از حالت کمانش کلی به کمانش موضعی تغییر دهد. روش مذکور با استفاده از نتایج تحلیل‌های خطی کمانشی و غیرخطی استاتیکی المان محدود توسعه داده شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در یک آرایش مشخص از سخت‌کننده‌های افقی یا قائم، به‌کارگیری ابعاد هندسی بهینه برای این سخت‌کننده‌ها موجب می‌شود عملکرد کلی صفحه سخت‌شده، شامل ظرفیت‌های کمانشی، پس از کمانش و نهایی، ثابت بماند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای ترکیب‌های مختلف سخت‌کننده‌های افقی و قائم، ظرفیت پس از کمانش صفحات سخت‌شده، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.

صوری قمی و سجادی، تحقیقات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دیوار برشی فولادی یک طبقه با مقیاس ۱/۳ انجام دادند [۱۳]. نمونه‌ها در این تحقیق شامل سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده بود. نتایج نشان داد که استفاده از سخت‌کننده، ظرفیت اتلاف انرژی و سختی برشی ورق فولادی را به ترتیب حدود ۲۶ و ۵۱ درصد بهبود می‌دهد.

اسحاقی اسکویی و همکاران، پیشنهاد کردند که از سخت‌کننده‌های مورب در گوشه‌های سیستم دیوار برشی فولادی استفاده شود و اثر آن را بر رفتار سیستم مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. به‌کارگیری این سخت‌کننده‌ها در گوشه‌ها با ایجاد یک ناحیه پیوند در میانه تیر، ترکیبی از سیستم دیوار برشی فولادی و سیستم بادبندی واگرا ایجاد کرد. این ترکیب با دوران تیر پیوند تحت بارگذاری، امکان تغییرجهت میدان‌های کششی و هدایت تغییرشکل‌های پلاستیک به سمت بخش‌های پیوندی در تیرهای طبقه را فراهم آورد. سخت‌کننده‌های پیشنهادی، علاوه بر هدایت تنش‌ها در مسیر مناسب، می‌توانند به‌طور هم‌زمان مقاومت جانبی، شکل‌پذیری، و سختی سیستم را بهبود بخشند.

علاوه بر این، وجود بازشوها در صفحات برای برآورده کردن نیازهای معماری، تأمین نور، یا مسائلی همچون عبور تأسیسات، امکان دسترسی برای بازرسی و تعمیرات و یا تغییر در رفتار معمولاً امری اجتناب‌ناپذیر است. این بازشوها با اشکال مختلف می‌توانند بر میدان کششی قطری صفحات تأثیر بگذارند و به این ترتیب، رفتار کلی صفحه را متحول کنند. تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت عدم پیش‌بینی تمهیدات خاص برای این بازشوها، مقاومت و سختی صفحات با بازشو کاهش می‌یابد و الگوی توزیع و توسعه تنش‌ها در سطح صفحه تغییر می‌کند [۱۵ و ۱۶].

هاگن^۱ و لارسن^۲، در پژوهشی با بهره‌گیری از روش عددی، تأثیر بازشوهای بزرگ را بر مقاومت برشی تیورق‌ها بررسی کردند و پیشنهاداتی کاربردی برای اصلاح و ارتقای روابط موجود در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های فولادی اروپا ارائه نمودند [۱۷].

حسین‌زاده و تهرانی‌زاده، رفتار دیوارهای برشی فولادی دارای بازشوهای مستطیلی بزرگ سخت‌شده را با بهره‌گیری از روش‌های المان محدود مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. یافته‌های پژوهش نشان داد که وجود بازشوهایی با المان‌های سخت‌شده قائم و افقی در لبه‌ها که تا اعضای مرزی گسترش می‌یابند، تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های رفتاری سیستم و اندرکنش بین قاب و ورق دارد.

پاسلار و همکاران، مطالعه‌ای را در زمینه اثرات شرایط مرزی ورق پرکننده بر عملکرد دیوار برشی فولادی دارای بازشوی دایره‌ای انجام دادند [۱۹]. نتایج نشان داد که نحوه اتصال ورق پرکننده، تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت پس از کمانش و سایر ویژگی‌های رفتاری این سیستم دارد.

بهره‌بر و همکاران، مطالعه‌ای عددی بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار دارای بازشوی مربعی مرکزی انجام دادند [۲۰]. تحقیقات نشان داد که ایجاد بازشو در صفحه می‌تواند به کاهش ظرفیت تحمل بار صفحه پرکننده که به‌عنوان عنصر کلیدی در مقاومت در برابر نیروی جانبی و اتلاف انرژی عمل می‌کند، منجر شود. این موضوع ممکن است اثرات منفی بر رفتار چرخه‌ای و توانایی سیستم در جذب انرژی داشته باشد. همچنین مشخص شد که افزایش اندازه بازشوها در جان به کاهش مستقیم ظرفیت اتلاف انرژی سیستم منتهی می‌شود، به‌طوری‌که رابطه‌ای خطی میان این دو پارامتر شناسایی شده است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که افزایش ابعاد بازشوهای جان، سهم صفحه پرکننده را در عملکرد کلی سیستم کاهش داده و فشار وارده بر اعضای قاب پیرامونی را افزایش می‌دهد.

با توجه به مطالعات گذشته، تحقیقات قبلی عمدتاً بر تأثیر سخت‌کننده‌ها بر روی رفتار صفحات و یا رفتار صفحات سخت‌شده متمرکز بوده‌اند و تحقیقاتی که به‌صورت خاص به مقوله طراحی سخت‌کننده‌ها در این صفحات بپردازد کم‌تر مورد توجه بوده است. به‌علاوه با توجه به اطلاعات نویسندگان، پژوهشی که به موضوع طراحی سخت‌کننده‌ها در صفحات با بازشوی مربعی تحت بارگذاری برشی بپردازد، وجود ندارد.

² Larsen

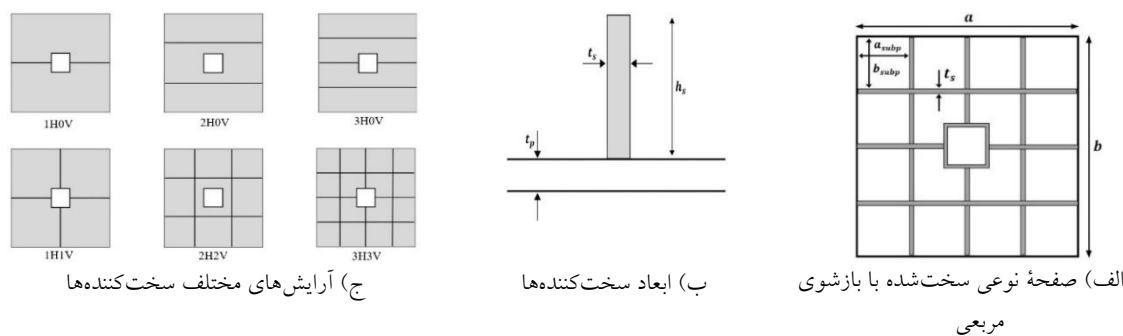
¹ Hagen

۲- روش تحقیق

در این بخش، درخصوص مدل‌ها، روش مدل‌سازی در نرم‌افزار، روش‌های آنالیز، مشخصات مصالح، شرایط مرزی و نتایج آنالیزهای حساسیت‌سنجی، صحبت می‌شود.

۲-۱- معرفی مدل‌ها

شکل (۱) به صورت شماتیک نمایی از یک صفحه سخت شده با بازشوی مربعی مرکزی را ارائه می‌دهد. تمامی سخت‌کننده‌ها، دارای سطح صاف بوده و تنها از یک طرف به ورق اصلی اتصال دارند. تعبیه سخت‌کننده‌ها در دو وجه، اگرچه سبب بهبود رفتار صفحات سخت شده از نقطه نظر پایداری و ظرفیت کمانشی خواهد شد، اما به دلیل افزایش هزینه‌های ساخت و اجرا، ایجاد محدودیت در فضای هر دو سمت صفحه، افزایش چشمگیر حجم جوشکاری و در نتیجه مخاطرات مربوط به آن و همچنین، دشواری‌های بازرسی، تعمیر و نگهداری، کم‌تر مورد توجه طراحان است.



شکل ۱- مشخصات هندسی صفحه با بازشوی مربعی و سخت‌کننده‌ها

برای تعیین مشخصات هندسی این سخت‌کننده‌ها، از رابطه (۱) استفاده می‌شود. شکل (۱-ج) نیز ترکیب‌های مختلف فرض شده از سخت‌کننده‌های افقی (H) و قائم (V) را نشان می‌دهد. اعداد قرارگرفته پیش از حروف، نشان‌دهنده تعداد سخت‌کننده‌های عمودی و افقی موجود در صفحات است. در بیش‌تر بخش‌های مطالعات، ابعاد بازشوی مربعی معادل ۲۰ درصد بعد کوچک‌تر صفحه (b) در نظر گرفته می‌شود. با این حال، برای بررسی اثر نسبت ابعاد بازشو بر نتایج، این پارامتر به صورت متغیر از صفر تا ۵۰ درصد عرض یا بعد کوچک‌تر صفحه (b) تغییر داده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از کمانش موضعی لبه‌های بازشو و بهبود توزیع تنش در سطح ورق، در لبه بازشو نیز از سخت‌کننده استفاده می‌شود که هندسه آن مشابه سایر سخت‌کننده‌های تعبیه شده در سطح صفحه است. برای اطمینان از جلوگیری از کمانش موضعی

بر این اساس، هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر سخت‌کننده بر رفتار صفحات با بازشوی مربعی مرکزی تحت بارگذاری خالص برشی و طراحی ابعاد سخت‌کننده بهینه برای این صفحات با استفاده از روش المان محدود است. شش ترکیب مختلف از سخت‌کننده‌های افقی و قائم برای صفحات با بازشو در نظر گرفته می‌شود. برای هر یک از این آرایش‌ها، با استفاده از نتایج تحلیل‌های کمانشی در نرم‌افزار نمودارهایی برای طراحی ابعاد بهینه سخت‌کننده ارائه می‌شود. ابعاد بهینه سخت‌کننده برای هر یک از آرایش‌ها، به گونه‌ای تعیین می‌شود که مود کمانش کلی صفحه با بازشو، به مود کمانش موضعی تغییر یابد. در انتها نیز تأثیرگذاری و کارایی سخت‌کننده‌های بهینه در رفتار غیرخطی استاتیکی و شبه‌استاتیکی چرخه‌ای کنترل می‌شود.

$$J_s = \frac{h_s t_s^3}{3} \quad (1)$$

$$I_s = \frac{h_s^3 t_s}{12}$$

$$A_s = h_s t_s$$

که (J_s) ثابت پیچشی، (I_s) گشتاور دوم مساحت و (A_s) مساحت سخت‌کننده‌ها است. (h_s) و (t_s) ابعاد هندسی سخت‌کننده‌ها مطابق با شکل (۱-ب) است. برای سخت‌کننده طولی:

$$\frac{h_s}{t_s} < 0.48 \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \quad (2)$$

که (F_{ys}) تنش تسلیم مصالح سخت‌کننده است. برای سخت‌کننده عرضی:

$$\frac{h_s}{t_s} < 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}}$$

در سخت‌کننده‌ها، از ضوابط موجود در کد طراحی استفاده می‌شود [۲۱]. این ضوابط که در رابطه (۲) ارائه شده‌اند، برای تعیین نسبت عرض به ضخامت سخت‌کننده‌ها به کار می‌روند. محدودیت بیش‌تری نیز بر اساس ویژگی‌های جوش‌پذیری مواد، در ارتباط با ضخامت سخت‌کننده (t_s) نسبت به ضخامت ورق اصلی (t_p) اعمال می‌شود ($t_p \leq t_s < 5t_p$) جدول (۱) مشخصات هندسی صفحات مورد مطالعه، آرایش سخت‌کننده‌ها و ابعاد بازشوهای آن‌ها را ارائه می‌کند.

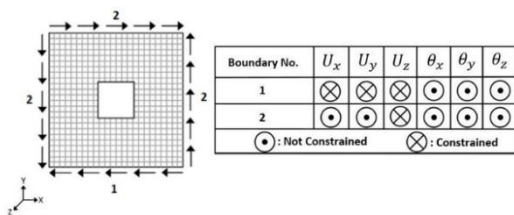
۲-۲- مدل‌سازی المان محدود و روش‌های آنالیز

در این پژوهش از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای انجام تحلیل‌ها و ارائه نتایج استفاده شده است [۲۲]. صفحات و سخت‌کننده‌ها هر دو با استفاده از المان پوسته‌ای چهار گرهی S4R مدل‌سازی شده است. این المان دارای فرمول‌بندی انتگرال‌گیری کاهش‌یافته بوده و توانایی شبیه‌سازی کرنش‌های بسیار بزرگ را دارد. این المان با برخورداری از شش درجه آزادی در هر گره، به‌خوبی می‌تواند تغییرشکل‌های کمانشی عمود بر صفحه صفحات را در تحلیل‌ها شبیه‌سازی کند و رفتار صفحات نازک تا بسیار ضخیم را به‌درستی تحلیل نماید [۲۲]. برای بررسی رفتار غیرخطی صفحات سخت‌شده، از تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن اثر تغییرشکل‌های بزرگ استفاده می‌شود. به این ترتیب، اثرات غیرخطی مکانیکی و هندسی به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار می‌گیرند.

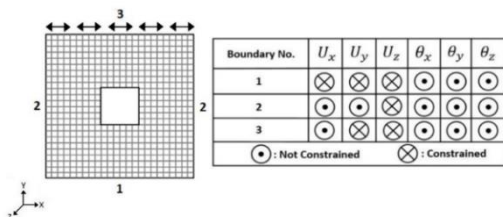
در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی از قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده می‌شود که توانایی کافی برای این نوع از تحلیل‌ها را دارد. اما در تحلیل‌های چرخه‌ای که شامل چرخه‌های متعدد تنش و کرنش به‌صورت رفت و برگشتی هستند، قانون سخت‌شوندگی سینماتیکی برای لحاظ اثر باشینگر در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲) شرایط مرزی و الگوی بارگذاری برشی در تحلیل‌ها را نشان می‌دهد. در تحلیل استاتیکی، بار برشی به‌صورت یکنواخت به لبه‌های ورق وارد می‌شود، اما در تحلیل‌های چرخه‌ای، با توجه به ماهیت تحلیل‌ها، بارگذاری به‌صورت جابه‌جایی افقی رفت و برگشتی به گره‌های لبه بالایی ورق اعمال می‌شود.

سخت‌کننده‌ها و صفحه اصلی به‌صورت صاف و فاقد اثرات تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری فرض می‌شوند. باین‌حال در عمل، صفحات فولادی به دلایلی همچون فرایند ساخت، حمل و نقل، اعوجاج ناشی از جوشکاری و مونتاژ معمولاً دارای نواقص اولیه هستند [۲۱]. همچنین نقص‌های اولیه به دلیل نازکی صفحات فولادی تحت تأثیر اثرات ثقلی سازه و حتی وزن خود

صفحات نیز ایجاد می‌شوند. در تحلیل عددی غیرخطی، در نظر گرفتن اثر این نقص‌ها برای تسهیل آغاز کمانش ضروری است. مطالعات گذشته، استفاده از نقص اولیه‌ای مطابق با یکی از موده‌های کمانشی یا با الگوی سینوسی با حداکثر دامنه‌ای که متناسب با روش‌های تولید و نصب قطعات باشد را توصیه می‌کنند. هرچند در بعضی از مطالعات نشان داده شده است که استفاده از الگوی سینوسی یا مود اول کمانش برای شبیه‌سازی اثرات نقص‌های اولیه در رفتار صفحات، اختلاف مشخصی را در نتایج ایجاد نمی‌کند [۲۳]؛ به همین دلیل، نقص اولیه بسیار کوچکی مطابق با مود اول کمانش صفحات که از نتایج تحلیل کمانشی صفحات به‌دست آمده، با حداکثر مقدار معادل با یک‌هزارم بعد ورق اعمال می‌شود [۲۴].



(الف)



(ب)

شکل ۲- الگوی بارگذاری برشی و شرایط مرزی، الف) تحلیل کمانش ویژه/ استاتیکی غیرخطی، ب) تحلیل چرخه‌ای شبه‌استاتیکی

شکل (۳)، اختلاف نتایج تحلیل کمانشی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود را با مقدار دقیق آن که از رابطه کلاسیک کمانش (رابطه (۳)) به‌دست آمده برای تعداد مختلف از المان‌ها برای یک صفحه مربعی با ابعاد ۱۰۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر مقایسه می‌کند. از نتایج شکل (۳)، برای اطمینان از صحت نتایج مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار و تعیین ابعاد مش بهینه (آنالیز حساسیت) استفاده می‌شود. بارهای برشی با الگوی برشی به‌صورت یکنواخت در امتداد صفحه میانی به تمامی گره‌های لبه و گوشه ورق اعمال می‌شوند. ظرفیت کمانشی صفحه با استفاده از رابطه (۳) معادل با 27 N/mm^{-2} به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با استفاده از یک شبکه ۴۰ در

که در آن (s) عدد کوچک‌تر بین a_{subp} و b_{subp} است. (φ) نسبت ابعاد زیرصفحات است که (a_{subp}/b_{subp}) یا (b_{subp}/a_{subp}) ، هر کدام بزرگ‌تر است.

۴۰ (۱۶۰۰ المان) از مش می‌توان از دقت منطقی نتایج در مقایسه با نتایج رابطه کلاسیک اطمینان پیدا کرد (خطای کم‌تر از ۱٪) و از این‌رو، به‌عنوان حداقل معیار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$P_{cr} = \tau_{cr} \times a \times t_p$$

$$\tau_{cr} = \frac{\Psi k \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_p}{s}\right)^2 \quad (3)$$

$$k = 5.35 + \frac{4}{\varphi^2}$$

جدول ۱- ابعاد صفحات، آرایش سخت‌کننده‌ها و ابعاد بازشوی مربعی

| صفحه | | | سخت‌کننده | | | بازشو | |
|------------------------------|----------|----------------|-----------|------------|-----------|------------------|----------------------------|
| ابعاد | | لاغری | آرایش | ضخامت (mm) | t_s/t_p | ابعاد بازشو (mm) | نسبت (L/b) |
| $a \times b \times t_p$ (mm) | b/ t_p | b_{subp}/t_p | | | | | |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 400 | 1H0V | 2.5~6.25 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 266 | 2H0V | 1.25~6.25 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 200 | 3H0V | 2.5~6.25 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 400 | 1H1V | 1.25~6.25 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 266 | 2H2V | 1.25~6.25 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 200 | 3H3V | 1.25~6.25 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 294 | 1H0V | 3.4~8.5 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 196 | 2H0V | 1.7~8.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 147 | 3H0V | 3.4~8.5 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 294 | 1H1V | 1.7~8.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 196 | 2H2V | 1.7~8.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 147 | 3H3V | 1.7~8.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 250 | 1H0V | 4~10 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 166 | 2H0V | 2~10 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 125 | 3H0V | 4~10 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 250 | 1H1V | 2~10 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 166 | 2H2V | 2~10 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 125 | 3H3V | 2~10 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 200 | 1H0V | 5~12.5 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 133 | 2H0V | 2.5~12.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 100 | 3H0V | 5~12.5 | 2~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 200 | 1H1V | 2.5~12.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 133 | 2H2V | 2.5~12.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 100 | 3H3V | 2.5~12.5 | 1~5 | 0~500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 375 | 1H0V | 8~20 | 2~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 250 | 2H0V | 4~20 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 187 | 3H0V | 8~20 | 2~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |



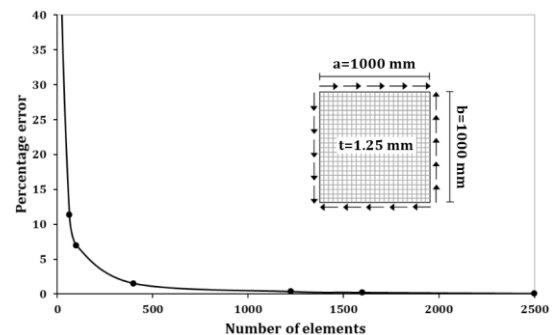
| | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|------|-------|-----|--------|----------------------------|
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 375 | 1H1V | 4~20 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 250 | 2H2V | 4~20 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 187 | 3H3V | 4~20 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 300 | 1H0V | 10~25 | 2~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 200 | 2H0V | 5~25 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 150 | 3H0V | 10~25 | 2~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 300 | 1H1V | 5~25 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 200 | 2H2V | 5~25 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 150 | 3H3V | 5~25 | 1~5 | 0~1500 | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |

کمانشی (شکل مورد) در صفحات با بازو و بدون بازو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز، برای ایجاد درک بهتر از تأثیر سخت‌کننده‌های بهینه بر رفتار کلی صفحات، تأثیر استفاده از آن‌ها بر رفتار صفحات تحت بارگذاری‌های استاتیکی غیرخطی و چرخه‌ای برای مدل‌های منتخب، ارائه می‌شود.

۳-۱- تحلیل کمانشی الاستیک

سخت‌کننده‌ها با افزایش سختی خمشی در راستای عمود بر صفحه و تبدیل صفحه به مجموعه‌ای از زیرصفحه‌های کوچک‌تر، ظرفیت صفحات را در برابر کمانش بهبود می‌بخشند و هم‌زمان تغییرشکل‌های عمود بر صفحه را نیز کاهش می‌دهند. اگر سخت‌کننده به اندازه کافی صلب باشد، در جای خود ثابت می‌ماند، خط گره‌ای ایجاد می‌کند و امکان کمانش موضعی زیرصفحات بین سخت‌کننده‌ها را فراهم می‌سازد [۱۲]. کمانش موضعی زیرصفحات، به دلیل نسبت لاغری کم‌تر در مقایسه با کمانش کلی صفحه، با محدود کردن یا کنترل تغییرشکل‌های عمود بر صفحه، در نهایت منجر به توزیع بهتر تنش‌ها، افزایش مقاومت و ایجاد ظرفیت جذب انرژی بیشتر می‌شود.

در یک آرایش مشخص برای سخت‌کننده، تعیین ابعاد بهینه شامل یافتن حداقل ارتفاع سخت‌کننده (h_s) به‌ازای ضخامت (t_s) مورد نظر سخت‌کننده است. هدف این کار، جلوگیری از وقوع کمانش کلی در صفحه بوده و در عوض ایجاد شرایطی است که کمانش موضعی در زیرصفحات اتفاق بیفتد. در این حالت، ظرفیت کمانشی صفحه سخت‌شده (بدون وجود بازو) با ظرفیت کمانشی یک زیرصفحه مستقل که دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده است، برابر در نظر گرفته می‌شود. علی‌نیا و صراف‌شیرازی [۱۲] بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی کمانشی، ابعاد بهینه سخت‌کننده‌ها برای یک صفحه مربعی شکل با ضخامت (t_p) و لاغری‌های ($\lambda = b/t_p$) متغیر را بررسی کرده‌اند. این تحلیل‌ها



شکل ۳- آنالیز حساسیت و تعیین ابعاد مش بهینه

۳-۲- مشخصات مکانیکی مصالح

صفحات فولادی نازک پیش از رسیدن به مرحله تسلیم، دچار کمانش الاستیک می‌شوند. برای صفحات و سخت‌کننده‌های مرتبط با آن‌ها، از فولاد نرمه ساختمانی استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی رفتار صفحات سخت‌شده پس از کمانش تا رسیدن به لحظه تسلیم و پس از آن، مشخصات مکانیکی فولاد به‌صورت الاستو-پلاستیک دوخطی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، مدول الاستیسیته اولیه $E_1 = 210 \text{ GPa}$ ، مدول الاستیسیته ثانویه $E_2 = 2.1 \text{ GPa}$ ، تنش تسلیم $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$ و نسبت پواسون $\nu = 0.3$ در نظر گرفته می‌شود و از معیار تسلیم فون‌میزس^۱ برای تعیین شرایط تسلیم در مصالح فولادی استفاده می‌شود.

۳- بحث در مورد نتایج

در این بخش، در ابتدا با استفاده از نتایج تحلیل‌های کمانشی، نمودارهایی به‌منظور طراحی ابعاد سخت‌کننده بهینه برای آرایش‌های مختلف سخت‌کننده در صفحات با بازوی مربعی مرکزی ارائه می‌شود. ابعاد سخت‌کننده بهینه برای صفحات با بازو نسبت به بعد آن در صفحه بدون بازو ارائه می‌شود. سپس، تأثیر نسبت لاغری سخت‌کننده بهینه در توزیع تغییرشکل‌های

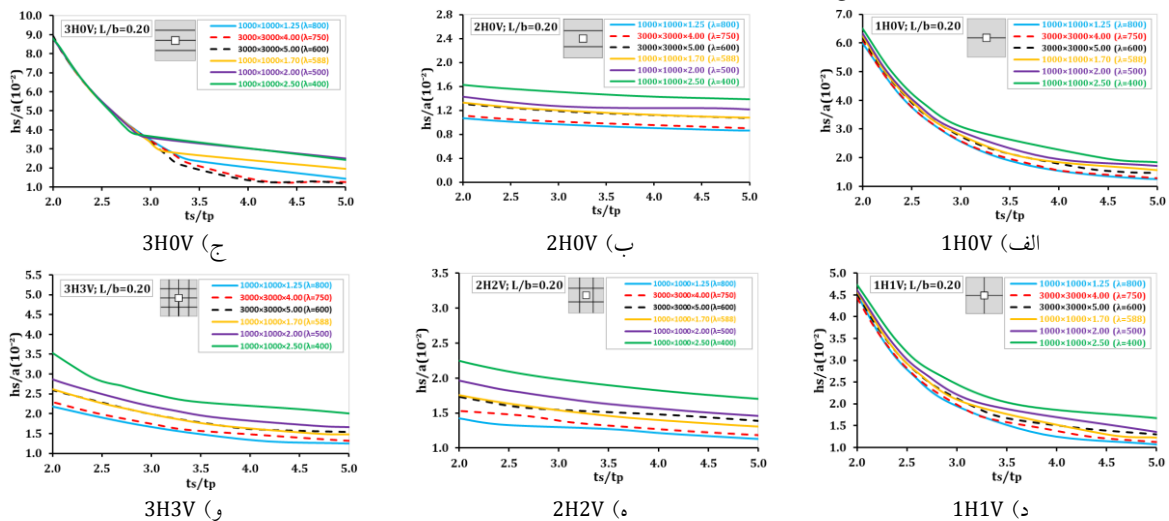
^۱ von-Mises

برای شرایط مرزی ساده و ترتیب‌های مختلف سخت‌کننده‌های افقی و قائم انجام شده است. آرایش‌ها شامل x سخت‌کننده افقی که با فاصله‌های یکسان و بدون سخت‌کننده قائم (xHOV) و x سخت‌کننده افقی همراه با x سخت‌کننده قائم (xHxV) که به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند، هستند. هندسه بهینه سخت‌کننده‌ها در یک صفحه بدون بازشو برای الگوهای سخت‌کننده مورد مطالعه، از رابطه (۴) که توسط علی‌نیا و صراف‌شیرازی [۱۲] پیشنهاد شده، تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} 1HOV: t_s h_s^2 &\geq 0.7 t_p^2 b \\ xHOV: t_s h_s^2 &\geq 0.7 \left(1 + \frac{2x}{10}\right) t_p^2 b; \quad x > 1 \\ 1H1V: t_s h_s^{2.5} &\geq 1.8 t_p^{2.5} b \\ xHxV: t_s h_s^{2.5} &\geq 1.8 \left(1 - \frac{x}{10}\right) t_p^{2.5} b; \quad x > 1 \end{aligned} \quad (4)$$

در شرایطی که بازشو در صفحه وجود داشته باشد، همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده شد، بسته به آرایش سخت‌کننده‌ها، وجود بازشو می‌تواند بر هندسه و در نتیجه بر ظرفیت کماتشی برخی از زیرصفحات تأثیرگذار باشد. بنابراین، ظرفیت کماتشی زیرصفحات مختلف، لزوماً یکسان نخواهد بود. در این حالت، ظرفیت کماتشی صفحه سخت‌شده معادل با ظرفیت کماتشی زیرصفحه‌ای خواهد بود که حداقل ظرفیت کماتشی را دارد. این موضوع عمدتاً در زیرصفحاتی که در اطراف بازشو قرار ندارند، بیش‌تر مشاهده می‌شود؛ به‌خصوص زمانی که از سخت‌کننده‌های لبه‌ای در اطراف بازشو استفاده شده باشد. بار برشی بحرانی (P_{cr}) یک صفحه مستطیلی یا مربعی سخت‌شده از طریق رابطه کلاسیک (۳) قابل محاسبه است [۲۵]. به‌منظور تعیین ظرفیت کماتشی صفحه سخت‌شده در رابطه (۳)، از کم‌ترین تنش بحرانی کماتشی محاسبه‌شده برای زیرصفحات استفاده می‌شود. این تنش با تغییر ابعاد بهینه سخت‌کننده تغییر نمی‌کند.

به‌منظور دستیابی به حالت کماتشی موردنظر که شامل کماتش موضعی در زیرصفحات به‌جای کماتش کلی ورق است، برای هر صفحه سخت‌شده، ترکیباتی از سخت‌کننده‌های افقی/ قائم، به‌همراه ضخامت‌های متفاوت صفحه بررسی می‌شوند. در این فرآیند، ارتفاع سخت‌کننده‌ها به‌صورت نظام‌مند و با انجام سعی و خطا محاسبه می‌شود. شکل (۴) ابعاد بهینه سخت‌کننده‌ها برای صفحات مختلف مورد مطالعه در این تحقیق را برای نسبت بعد بازشو به عرض ورق $L/b=0.2$ نشان می‌دهد. این منحنی‌ها ارتباط بین ارتفاع بهینه سخت‌کننده و ضخامت آن را برای انواع مختلف آرایش‌های سخت‌کننده نشان می‌دهند. نتایج به‌صورت نسبت ارتفاع سخت‌کننده به عرض صفحه (h_s/a) و همچنین نسبت ضخامت سخت‌کننده بهینه به ضخامت اصلی (t_s/t_p) نمایش داده شده‌اند. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که بین ارتفاع و ضخامت سخت‌کننده بهینه در یک صفحه با بازشو، یک رابطه خطی برقرار نیست. به‌علاوه، منحنی‌های طراحی سخت‌کننده بهینه برای صفحات با نسبت‌های لاغری تقریباً مشابه یا نزدیک به هم، تطابق نزدیکی به یکدیگر دارند. همچنین، برای یک صفحه مشخص با آرایش معین سخت‌کننده، ویژگی‌های هندسی مختلف سخت‌کننده مانند سطح مقطع، ممان دوم سطح و ثابت پیچش، ثابت نمی‌مانند و با تغییر نسبت ضخامت سخت‌کننده دچار تغییر می‌شوند. این مطلب ثابت می‌کند که ممان دوم سطح، ثابت پیچش و به‌خصوص سطح مقطع سخت‌کننده‌ها، به‌عنوان عواملی که نقش مهمی در طراحی بهینه و اقتصادی صفحات سخت‌شده ایفا می‌کنند، نمی‌توانند به‌طور مجزا از یکدیگر طراحی شوند. این نتیجه همچنین در مورد صفحات سخت‌شده‌ای که فاقد بازشو هستند نیز پیش‌تر مشاهده شده بود [۱۲]. گرچه نتایج حاکی از آن است که برای هر نوع چیدمان سخت‌کننده، ارتباطات خاصی میان ضخامت و ارتفاع بهینه سخت‌کننده برقرار است.

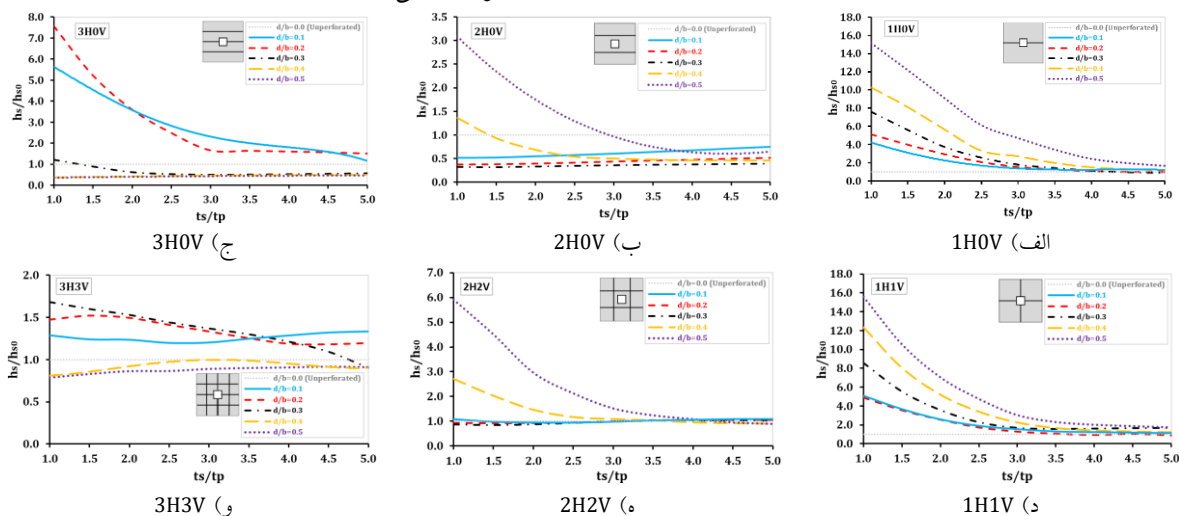


شکل ۴- ابعاد بهینه سخت‌کننده صفحات با بازشو با یک نسبت بازشوی مشخص ($L/b=0.2$) برای آرایش‌های مختلف سخت‌کننده



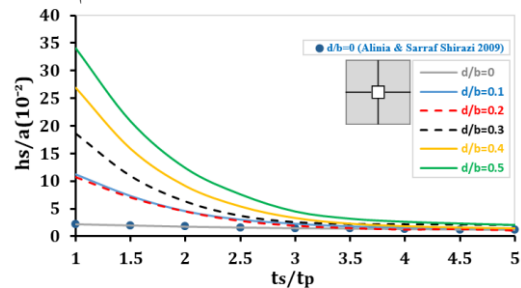
نسبت ارتفاع بهینه سخت کننده در مدل دارای بازشو (h_s) به مقدار آن در مدل بدون بازشو است (h_{s0}) (که می توان آن را از رابطه (۴) محاسبه کرد)؛ درحالی که محور افقی نسبت ضخامت سخت کننده (t_s) به ضخامت صفحه اصلی (t_p) را نمایش می دهد. شکل (۶)، به وضوح نشان می دهد که با توجه به آرایش سخت کننده ها و نسبت اندازه بازشو (موقعیت بازشوها و سخت کننده ها نسبت به هم)، برای یک ضخامت ثابت سخت کننده، ارتفاع بهینه سخت کننده در صفحه ای با بازشو در مقایسه با صفحه مشابه بدون بازشو می تواند بیش تر، کم تر یا حتی برابر باشد. همان طور که نتایج نشان می دهد، برای تغییرات ابعاد بازشو، بسته به نسبت اندازه بازشو و نسبت ضخامت ورق سخت کننده، نسبت ارتفاع سخت کننده در صفحه با بازشو به بدون بازشو می تواند بزرگ تر، کوچک تر یا معادل واحد باشد.

برای بهره برداری مطلوب از نتایج به دست آمده در این بخش به منظور طراحی بهینه سخت کننده ها در صفحات دارای بازشو، طراح می تواند با توجه به پارامترهای مختلف طراحی و محدودیت های موجود، یکی از الگوهای سخت کننده را انتخاب نماید؛ سپس با در نظر گرفتن نسبت ابعاد بازشوی مربعی مرکزی و انتخاب یکی از پارامترهای ضخامت یا ارتفاع ورق سخت کننده بر اساس موجودی بازار، از نمودارهای مربوطه برای تعیین پارامتر دیگر استفاده کند. باین حال، از منظر اقتصادی، اگر بتوان ضخامت یا هندسه سخت کننده را به گونه ای انتخاب کرد که وزن کلی طراحی شده به حداقل برسد، ارجحیت بیش تری دارد. توجه شود که برای یک آرایش مشخص از سخت کننده ها، ظرفیت کم ناشی صفحه سخت شده، مستقل از ابعاد بهینه سخت کننده باقی می ماند و دست خوش تغییر نمی شود. باین حال، وزن سخت کننده بهینه، مورد استفاده، ممکن است بسته به هندسه انتخاب شده برای آن، تغییر کند. اگرچه با افزایش یا کاهش ضخامت سخت کننده، ارتفاع آن نیز به ترتیب کاهش یا افزایش می یابد، اما همان طور که پیش تر مشاهده شد، تغییرات ارتفاع سخت کننده بهینه نسبت به ضخامت آن به صورت خطی نیست.



شکل ۶- نسبت ارتفاع سخت کننده بهینه در مدل های با بازشو به مدل بدون بازشو (h_s/h_{s0}) در مقابل نسبت ضخامت آن (t_s/t_p) برای آرایش های مختلف سخت کننده

شکل (۵) تأثیر تغییرات نسبت بازشوی مربعی مرکزی بر ابعاد بهینه سخت کننده در یک صفحه نمونه با ابعاد ($L/b=0\sim 0.5$) و آرایش سخت کننده ($1000 \times 1000 \times 1.25 \text{ mm}$) 1H1V را نشان می دهد. نتایج تقریباً مشابهی نیز برای سایر الگوهای سخت کننده حاصل شد که به منظور اختصار از ارائه جزئیات آن ها صرف نظر شده است. شکل (۵) نشان می دهد که برای حالت خاص $L/b=0$ (صفحه بدون بازشو)، تطابق بسیار نزدیکی بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج گزارش شده در تحقیق [۱۲] وجود دارد. در محدوده های سخت کننده لاغر (ضخامت کم) حضور بازشو تأثیر قابل توجهی در طراحی سخت کننده بهینه دارد. به طوری که ارتفاع سخت کننده بهینه در مدل با بازشو به میزان قابل توجهی بزرگ تر از ارتفاع آن در مدل بدون بازشو است (تأثیر منفی بازشو در رفتار کمناشی صفحه با بازشوی سخت شده)، درحالی که با نزدیک شدن برای محدوده سخت کننده به سخت کننده متوسط و چاق از اثرات حضور بازشو کم می شود.



شکل ۵- ابعاد بهینه سخت کننده صفحه با بازشو با آرایش سخت کننده 1H1V با ابعاد متغیر از بازشوی مربعی ($L/b=0\sim 0.5$)

از نتایج تحلیل مدل های مختلف مورد مطالعه در شکل (۶)، به منظور طراحی بهینه سخت کننده ها برای صفحات دارای بازشوی مرکزی مربعی با نسبت های مختلف اندازه بازشو ($L/b=0\sim 0.5$) و آرایش های مختلف سخت کننده (3HOV, 2HOV, 1HOV, 3H3V, 2H2V, 1H1V) استفاده می شود. محور قائم نشان دهنده

با این حال تحقیقات علی نیا و صراف شیرازی [۱۲] نشان داده است که استفاده از این رابطه برای تعیین ارتفاع سخت کننده‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی، به ویژه زمانی که سخت کننده‌ها دارای ضخامت‌های بزرگتر باشند، ممکن است تا حدودی حالت محافظه کارانه داشته باشد.

برای صفحات با سخت کننده‌های افقی و عمودی:

$$\frac{b_{subp}}{t_p} \leq 3.82 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 94.2$$

(۵) برای صفحات با سخت کننده‌های افقی یا عمودی:

$$\frac{b_{subp}}{t_p} \leq 2.88 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = 71.1$$

$$I_s \geq I_{s2} + (I_{s1} - I_{s2}) \rho_w$$

$$I_{s1} = \frac{b_{subp}^4 \rho_s^{1.3}}{40} \left(\frac{F_{yp}}{E} \right)^{1.5}$$

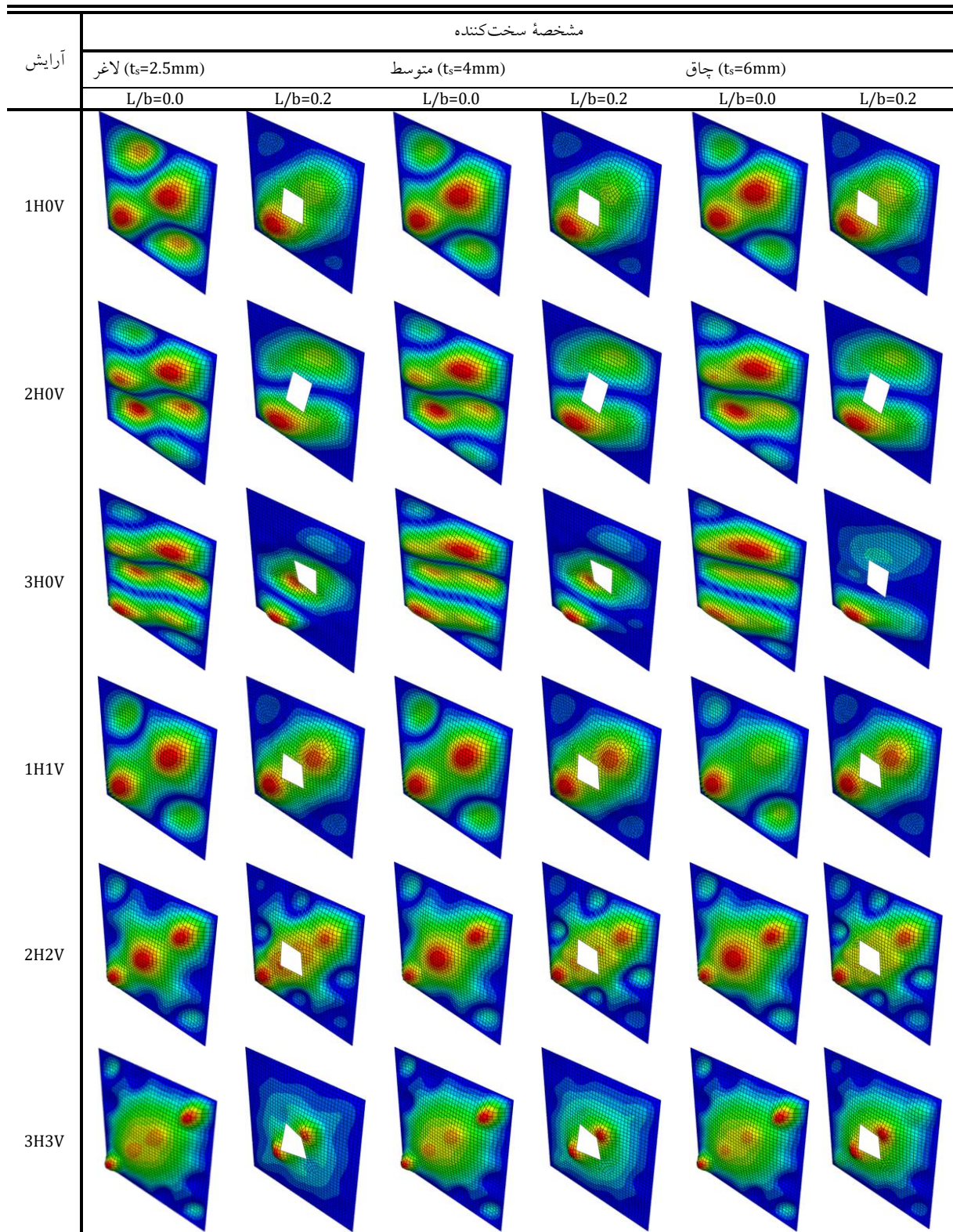
$$I_{s2} = \left[\frac{2.5}{\left(\frac{b}{b_{subn}} \right)^2} - 2 \right] s t_p^3 \geq 0.5 s t_p^3$$

(۶)

که (I_s) ممان اینرسی سخت کننده‌ها، (I_{s1}) حداقل ممان اینرسی سخت کننده‌ها که برای ایجاد مقاومت برشی کامل پس از کمانش صفحه سخت شده مورد نیاز است؛ (I_{s2}) حداقل ممان اینرسی سخت کننده‌های مورد نیاز برای ایجاد مقاومت کمانش برشی صفحه، (s) کوچک‌ترین اندازه a_{subp} و b_{subp} ، (ρ_s) بزرگ‌ترین F_{yp}/F_{ys} و $1/0$ و (ρ_w) حداکثر نسبت برشی است.

شکل (۷)، تأثیر استفاده از سخت کننده‌های بهینه با ابعاد مختلف (لاغر، متوسط و چاق) را بر توزیع تغییرشکل‌های مود اول کمانش در صفحات بدون بازشو و دارای بازشو بررسی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل استفاده از سخت کننده، مود کمانش غالب صفحات از حالت کلی به حالت موضعی تغییر یافته است. برای یک آرایش مشخص از سخت کننده‌ها، تغییر هندسه سخت کننده در صفحات با یا بدون بازشو تفاوت قابل توجهی در الگوی کلی توزیع تغییرشکل‌های کمانشی ایجاد نمی‌کند. هر چند که نسبت لاغری سخت کننده می‌تواند بر افزایش یا توسعه تغییرشکل‌های کمانشی در بعضی از بخش‌های صفحات در مقایسه با سایر بخش‌ها تأثیر بگذارد. علاوه بر این، همان‌طور که انتظار می‌رفت، حضور بازشو نیز تأثیر قابل توجهی بر توزیع تغییرشکل‌های عمود بر صفحه در صفحه دارد.

لازم به ذکر است که درخصوص استفاده از رابطه (۴) یا نتایج ارائه شده در شکل (۶) برای طراحی ابعاد سخت کننده‌ها در صفحات با یا بدون بازشو، لازم است به محدودیت‌های مرتبط با ضخامت و ارتفاع سخت کننده که در رابطه (۲) بیان شده‌اند، نیز توجه شود. برای اطمینان از تسلیم کامل زیرصفحات نیز، باید محدودیت‌های آیین‌نامه Steel desing guide 20 [۵] که در رابطه (۵) بیان شده است، در ارتباط با نسبت لاغری صفحات برای زیرصفحاتی بدون بازشو اعمال شوند. در مورد زیرصفحاتی که دارای بازشو هستند، این محدودیت‌ها در صورتی قابل اعمال است که در لبه‌های بازشو از سخت کننده استفاده شده باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود که ضوابط بخش G از آیین‌نامه AISI360-22 [۲۴]، طبق رابطه (۶)، برای کنترل ممان اینرسی سخت کننده در محل تقاطع آن با ورق به کار گرفته شود.



شکل ۷- تأثیر هندسه سخت کننده بهینه بر میزان و الگوی توسعه تغییر شکل های کمناشی صفحات با یا بدون بازشو ($L/b=0, 0.2$) برای آرایش های مختلف سخت کننده

جدول ۲- تأثیر حضور بازشو و آرایش سخت‌کننده بر ظرفیت کمانشی صفحات

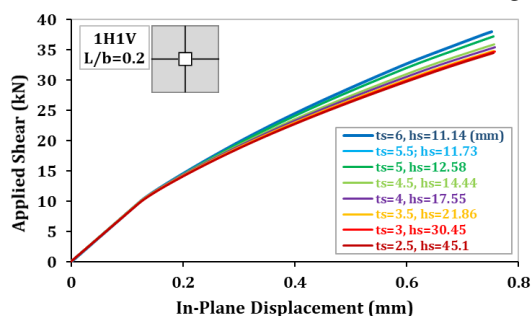
| ابعاد صفحه (mm) | لاغری | بار برشی بحرانی (kN) | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------------------|------|---------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | صفحه اصلی | | | صفحه سخت‌شده (FE) | | | | | |
| | | L/b=0 | | L/b=0.2 | (L/b=0.2) | | | | | |
| | | Eq. (4) | FE | FE | 1H0V | 2H0V | 3H0V | 1H1V | 2H2V | 3H3V |
| 1000 × 1000 × 1.25 | 800 | 3.5 | 3.5 | 2.31 | 8.05 | 9.91 | 29.6 | 10.26 | 26.3 | 56.7 |
| 1000 × 1000 × 1.7 | 588 | 8.7 | 8.7 | 5.82 | 16.54 | 25.28 | 75.9 | 25.6 | 65.9 | 142.1 |
| 1000 × 1000 × 2.0 | 500 | 14.2 | 14.2 | 9.68 | 36.7 | 41.48 | 112.6 | 45.4 | 110.8 | 238.8 |
| 1000 × 1000 × 2.5 | 400 | 27.7 | 27.7 | 18.49 | 69 | 90.29 | 230.9 | 79.6 | 204.9 | 441.6 |
| 3000 × 3000 × 4.0 | 750 | 37.9 | 37.7 | 25.29 | 90 | 110.22 | 321.2 | 109.6 | 282.3 | 608.3 |
| 3000 × 3000 × 5.0 | 600 | 73.9 | 73.8 | 49.32 | 172.7 | 217.35 | 557.7 | 210.6 | 452.6 | 976.4 |

۲-۳ مطالعات پیش‌تر: تحلیل استاتیکی غیرخطی (پس از

کمانش) و چرخه‌های شبه‌استاتیکی

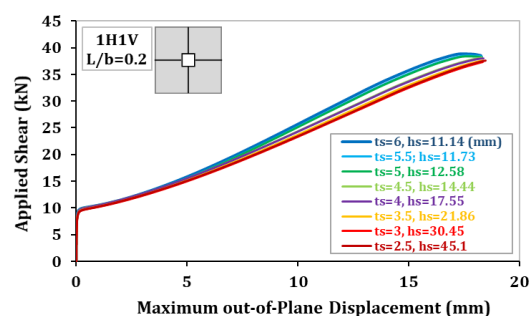
نتایج بخش قبل به طراحان این امکان را می‌دهد که برای آرایش مشخصی از سخت‌کننده‌ها در یک صفحه دارای بازشوی مربعی مرکزی با ابعاد بازشوی مختلف، ابعاد بهینه سخت‌کننده را انتخاب نمایند. در تحلیل‌های غیرخطی، یک صفحه فولادی با ابعاد $1000 \times 1000 \times 1.25 \text{ mm}$ با یک بازشوی مربعی در مرکز که دارای بعد نسبی $L/b=0.2$ است، همراه با سخت‌کننده‌های بهینه و آرایش‌های مختلف سخت‌کننده که هندسه آن‌ها از مطالعات بخش قبل استخراج شده است، در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۸)، منحنی بار-جاب‌جایی درون و برون صفحه را برای سخت‌کننده‌های بهینه مختلف با آرایش سخت‌کننده 1H1V نمایش می‌دهد. منحنی‌های مشابهی نیز برای سایر آرایش‌های سخت‌کننده حاصل شدند که به‌منظور اختصار، از ارائه آن صرف‌نظر شده است. با اینکه ابعاد سخت‌کننده‌های بهینه بر اساس تحلیل کمانشی خطی تعیین شده‌اند، تمامی مدل‌های با بازشو از نظر رفتار کلی درون و برون صفحه، ظرفیت‌های بحرانی کمانشی و نهایی و جابه‌جایی‌های متناظر، رفتار نسبتاً مشابهی نشان می‌دهند.



ب) درون صفحه

جدول (۲)، تأثیر حضور بازشو و استفاده از سخت‌کننده را بر ظرفیت کمانشی صفحات مورد توجه قرار می‌دهد. این ظرفیت‌ها با استفاده از نتایج تحلیل‌های المان محدود و بر اساس وقوع اولین کمانش موضعی در زیرصفحات محاسبه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های صفحه نظیر با یا بدون بازشو، بدون سخت‌کننده، که از طریق نتایج تحلیل‌های المان محدود یا فرمول تئوری کلاسیک (معادله (۳)) تعیین شده، مقایسه شده است. نتایج ارائه‌شده در جدول (۲)، حاکی از آن است که برای صفحات بدون بازشو، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل المان محدود و رابطه تئوریک کمانش وجود دارد. این امر بار دیگر دقت نتایج تحلیل المان محدود و جزئیات مرتبط با مش‌بندی و مدل‌سازی را تأیید می‌کند. در مقابل، حضور بازشو بر ظرفیت کمانش صفحات، تأثیر گذاشته و کاهش قابل‌توجهی را سبب شده است. با این حال، اگر از سخت‌کننده‌هایی در سطح صفحات و لبه‌های بازشو به‌طور هم‌زمان استفاده شود، بسته به نوع آرایش سخت‌کننده‌ها، می‌توان این کاهش ظرفیت را نه تنها جبران نمود، بلکه تا حد قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به حالت صفحه بدون بازشو بهبود داد.

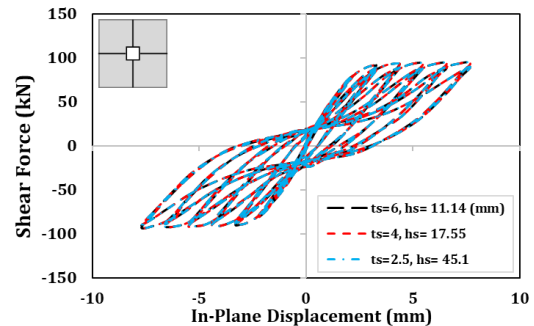


الف) خارج از صفحه

شکل ۸- منحنی‌های نیروی برشی-جاب‌جایی برای صفحه نوعی سخت‌شده برای سخت‌کننده بهینه ($1000 \times 1000 \times 1.25 \text{ mm}$) با مشخصات هندسی مختلف و آرایش سخت‌کننده 1H1V

تحلیل‌های متعدد المان محدود، گراف‌هایی برای تخمین ابعاد بهینه سخت‌کننده‌ها ارائه شد که نشان می‌دهد ضخامت و ارتفاع بهینه سخت‌کننده‌ها، دارای ارتباط مستقیمی با یکدیگر و همچنین با ابعاد (نسبت لاغری) صفحه هستند. نتایج تحلیل‌های غیرخطی و تحلیل‌های چرخه‌ای (شکل‌های ۸) و (۹) نشان داد که برای یک آرایش مشخص از سخت‌کننده، رفتار کمانشی و پس از کمانش و همچنین قابلیت جذب انرژی صفحات سخت‌شده با سخت‌کننده‌های بهینه‌شده، تحت تأثیر مشخصات هندسی سخت‌کننده نیست.

شکل (۹) نیز منحنی‌های هیستریزس صفحات سخت‌شده را برای سه هندسه مختلف از سخت‌کننده بهینه (لاغر، متوسط و چاق) و آرایش سخت‌کننده 1H1V ارائه می‌دهد. نتایج بهروشنی نشان می‌دهد که مشابه با نتایج شکل (۸)، تغییر مشخصات هندسی سخت‌کننده بهینه، تأثیری بر خصوصیات رفتار چرخه‌ای صفحات سخت‌شده و در نتیجه ظرفیت جذب انرژی صفحات سخت‌شده با یک آرایش مشخص ندارد.



شکل ۹- منحنی‌های هیستریزس صفحه

هندسه مختلف از سخت‌کننده (لاغر، متوسط و چاق) با آرایش سخت‌کننده 1H1V برای سه $1000 \times 1000 \times 1.25 \text{ mm}$

۴- نتیجه‌گیری

صفحات نازک برشی فولادی فاقد سخت‌کننده، دارای رفتار شکل‌پذیری هستند و بسته به نسبت لاغری، در بارهای نسبتاً کوچک دچار کمانش می‌شوند. در شرایطی که یک بازشوی مربعی در مرکز صفحه قرار گیرد، این بازشو به دلیل کاهش سطح مقطع ورق، ایجاد اختلال در مسیر توزیع تنش‌ها و تأثیرگذاری بر ظرفیت‌های کمانشی و نهایی صفحه و همچنین تغییر شکل‌های عمود بر صفحه، می‌تواند تغییرات قابل توجهی در رفتار کلی صفحه ایجاد نماید. سخت‌کننده‌ها در صورتی که دارای مشخصات هندسی مناسب باشند، می‌توانند برای نقش سخت‌کننده‌ها در ایجاد خطوط تکیه‌گاهی و در نتیجه تقسیم صفحات به زیرصفحات کوچک‌تر، از کمانش کلی صفحات برشی جلوگیری کرده و جابه‌جایی خارج از صفحه آن‌ها را محدود نمایند. کمانش موضعی در زیرصفحات، ظرفیت کمانشی را ارتقا داده و سرعت زوال سختی تحت بارگذاری را کاهش می‌دهد. همچنین به دلیل تأخیر در کمانش، ظرفیت جذب انرژی در صفحات برشی افزایش می‌یابد. به‌طورکلی با افزایش تعداد سخت‌کننده و یا انتخاب آرایش مناسب سخت‌کننده‌ها، طراح می‌تواند ظرفیت‌های کمانشی و تسلیمی صفحات را به‌نحو مناسبی بهبود دهد. برای یک آرایش بهینه سخت‌کننده، تنش بحرانی صفحات سخت‌شده با تنش بحرانی زیرصفحات جداگانه برابر خواهد شد. بر اساس

- [15] Hosseinzadeh, S.A.A., and Seddighi, M. (2024), "Wall-frame interactive behavior in GFRP-reinforced steel plate shear walls with circular cutout openings", In Structures, 61, pp.106061.
- [16] Kordzangeneh, G., Showkati, H., Rezaeian, A., and Yekrangnia, M. (2021), "Experimental cyclic performance of steel shear walls with single rectangular opening", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 30(2), pp.1821.
- [17] Hagen, N.C., and Larsen, P.K. (2009), "Shear capacity of steel plate girders with large web openings, part II: design guidelines", Journal of Constructional Steel Research, 65(1), pp.151-158.
- [18] Hosseinzadeh, S.A.A., and Tehranizadeh, M. (2012), "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", Journal of Constructional Steel Research, 77, pp.180-192.
- [19] Paslar, N., Farzampour, A., and Hatami, F. (2020), "Investigation of the infill plate boundary condition effects on the overall performance of the steel plate shear walls with circular openings", In Structures, 27, pp.824-836.
- [20] Bahrebar, M., Kabir, M.Z., Zirkalian, T., Hajsadeghi, M., and Lim, J.B. (2016), "Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls", Journal of Constructional Steel Research, 122, pp.584-594.
- [21] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2024), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 10th ed., AASHTO, Washington, D.C.
- [22] ABAQUS/ Standard theory manual, Version 6.20 (2020), Hibbitt, Karlsson, Sorenson Inc, (HKS).
- [23] Amani, M., Alinia, M.M., and Fadakar, M. (2013), "Imperfection sensitivity of slender/stocky metal plates", Thin-Walled Structures, 73, pp.207-215.
- [24] ANSI/AISC 360-22, (2022), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- [25] Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N. (1970), "Two-dimensional problems in polar coordinates", Theory of Elasticity, p.68.
- [1] Alinia, M.M., Habashi, H.R., and Khorram, A. (2009), "Nonlinearity in the postbuckling behaviour of thin steel shear panels", Thin-Walled Structures, 47(4), pp.412-420.
- [2] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L., and Elwi, A.E. (1996), "Seismic performance of steel plate shear walls based on a large-scale multi-storey test", Proceedings on CD-ROM.
- [3] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.L., and Elwi, A.E. (1998), "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", Journal of Structural Engineering, 124(2), pp.112-120.
- [4] Ghobadi, F., and Ghaffarzadeh, H. (2023), "Finite element model evolution of perforated steel plate shear walls under cyclic loading", In Structures, 52, pp.286-298.
- [5] A.I.S.C. Steel design guide 20, (2007), steel plate shear walls. Chicago (IL), American Institute of Steel Construction.
- [6] Driver, R.G., Kulak, G.L., Elwi, A.E., and Kennedy, D.L. (1998), "FE and simplified models of steel plate shear wall", Journal of Structural Engineering, 124(2), pp.121-130.
- [7] Rahmzadeh, A., Ghassemieh, M., Park, Y., and Abolmaali, A. (2016), "Effect of stiffeners on steel plate shear wall systems", Steel and Composite Structures, 20(3), pp.545-569.
- [8] Berman, J.W., and Bruneau, M. (2004), "Steel plate shear walls are not plate girders", Engineering Journal, 41(3), pp.95-106.
- [9] Chen, X., and Yuan, H. (2023), "Local buckling behaviour of longitudinally stiffened stainless steel plate girders under combined bending and shear", Thin-Walled Structures, 184, pp.110541.
- [10] Dos Santos, G.B., and Gardner, L. (2019), "Testing and numerical analysis of stainless steel I-sections under concentrated end-one-flange loading", Journal of Constructional Steel Research, 157, pp.271-281.
- [11] Alinia, M.M., and Dastfan, M. (2007), "Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels", Journal of Constructional Steel Research, 63(4), pp.554-563.
- [12] Alinia, M.M., and Shirazi, R.S. (2009), "On the design of stiffeners in steel plate shear walls", Journal of Constructional Steel Research, 65(10-11), pp.2069-2077.
- [13] Sabouri-Ghomi, S., and Sajjadi, S.R.A. (2012), "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", Journal of Constructional Steel Research, 75, pp.152-159.
- [14] Es'haghioskui, F., Asl, M.H., Hosseinzadeh, Y., and Gallego, E. (2023), "Experimental and numerical investigation of a new type of steel plate shear wall with diagonal tension field guiding stiffeners", Journal of Building Engineering, 76, pp.107181.