



اثر سخت شونده گی جان مقاطع سی-شکل لبه دار فولادی سرد نورد شده در اعضای

خمشی

رشیدالدین چراغی*^۱

چکیده

در مطالعه حاضر، اثر سخت شونده گی جان مقاطع سی-شکل لبه دار فولادی سرد نورد شده موسوم مقطع سیگما در مقاومت اعضای خمشی مورد بررسی قرار گرفته و با مقطع سی-شکل لبه دار با جان سخت نشده مورد مقایسه قرار گرفته است. به منظور محاسبه بارهای کمانش بحرانی متناظر با هر مد کمانشی، روش نوار محدود استفاده شده است؛ به منظور جداسازی مدهای مشارکتی در هر بار کمانش بحرانی از روش نوار محدود مقید شده استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که سخت شدگی جان نسبت به حالت جان سخت نشده، به طور قابل ملاحظه ای از وقوع کمانش موضعی جلوگیری می کند و مقاومت کمانش اعوجاجی را افزایش می دهد؛ همچنین هر چه جداره مقطع نازک تر باشد، این افزایش مقاومت ناشی از سخت شونده گی، بیشتر می گردد.

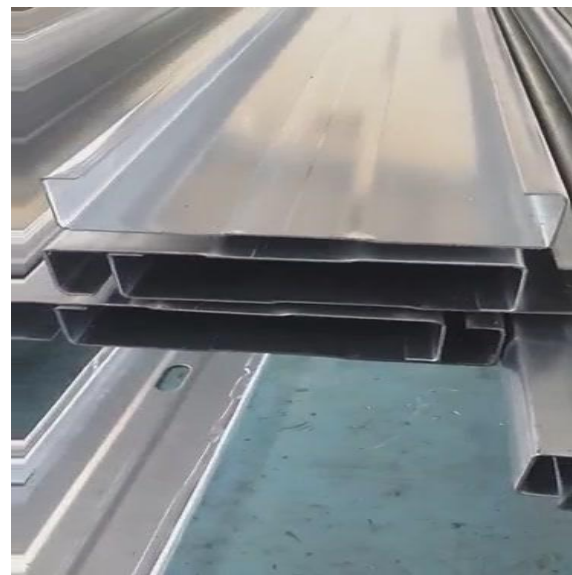
کلمات کلیدی

فولاد سرد نورد شده، مقاطع سی-شکل لبه دار، سخت شونده گی جان، اعضای خمشی، روش نوار محدود



۱. مقدمه

در مطالعه حاضر، اثر سخت شوندگی جان مقاطع سی-شکل لبه دار در اعضای خمشی بررسی شده است. اخیراً مقاطعی که به عنوان مقاطع سیگما شناخته می‌شوند به دلیل مزیت‌های سازه‌ای در صنعت فولاد سرد نورد شده استفاده آن‌ها رو به افزایش می‌باشد [1]. در این مقطع، با ایجاد خمکاری در مقطع در نقاطی مناسب، سعی بر بهبود رفتار سازه‌ای این مقاطع می‌شود. در این مطالعه، اثر این خمکاری‌ها در ظرفیت کمانشی مقاطع سی-شکل لبه دار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نوع سخت شوندگی که هدف این مطالعه می‌باشد، در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ تولید مقطع سیگما در داخل کشور

برای این منظور، ابتدا، دو مقطع سی-شکل لبه دار، $C305-50-19-2.5$ (mm)، یکی با جان سخت نشده و دیگری با جان سخت شده (مقطع سیگما)، انتخاب شدند. به منظور محاسبه مقاومت کمانشی اعضای خمشی سرد نورد شده از روش جدید آیین نامه [2] که از سال ۲۰۰۴ به آیین نامه AISI اضافه گردید، روش مقاومت مستقیم^۲ [5]–[3]، استفاده شده است. در این پژوهش، اثر سخت شوندگی جان روی بارهای کمانش بحرانی و شکل مد کمانشی متناظر با آن بررسی شده است. به منظور محاسبه بار کمانش بحرانی متناظر با هر مد کمانشی، روش نوار محدود^۳ [6] استفاده شده است. پلتفرمی که برای روش نوار محدود توسعه یافته است، نرم افزار CUFSM با دسترسی باز می‌باشد [7]. نکات جزئی درباره طراحی با نرم افزار CUFSM که از روش نوار محدود در تحلیل کمک می‌گیرد، در گزارشات فنی و راهنماها موجود می‌باشد [8]–[10]، [3]. اگرچه مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی تیرهای سرد نورد شده با جان سخت شده، یک سخت کننده در جان، انجام گرفته است [11]، در مطالعه حاضر نوع سخت کننده متفاوت بوده و از نوعی می‌باشد که در صنعت داخل استفاده می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد سخت شوندگی جان مقاطع فولادی سرد نورد شده در تیرها، از مشارکت مد کمانش موضعی جلوگیری می‌

^۲ Direct Strength Method

^۳ Finite Strip Method



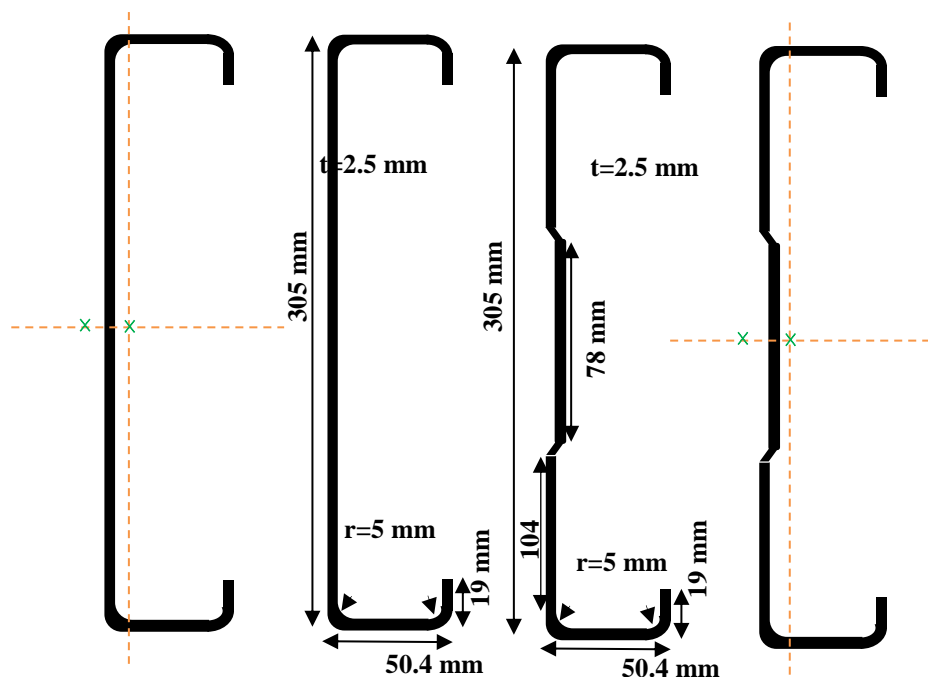
کند و مقاومت کمانش اعوجاجی را افزایش می دهد، اما این اثر روی مقاومت کمانش جانبی-پیچشی قابل توجه نمی باشد. در انتها، به منظور ارزیابی گسترده تر اثر سخت شونده گی جان، چندین مقطع سی-شکل لبه دار با همان سطح مقطع C305-50-19 ولی ضخامت جدار ها متفاوت انتخاب شده و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. نتایج گویا این مطلب می باشد که هر چه ضخامت مقطع نازک تر می شود، اثر سخت شونده گی در افزایش مقاومت مقطع بیشتر می باشد.

۲. مورد مطالعاتی

به عنوان یک مثال، دو تیر ۶ متری با تکیه گاه ساده با مقطع C305-50-19-2.5 (mm) یکی با مقطع سیگما (جان سخت شده) و دیگری با مقطع جان ساده که هر ۲ متر مهار جانبی شده اند مورد تحلیل قرار گرفته است.

۳. مشخصات مصالح و مقطع

مقطع هدف در این مطالعه، مقطع سی-شکل لبه دار C305-50-19-2.5 (ضخامت، عرض لبه، عرض بال، ارتفاع جان C) می باشد که در دو نوع جان سخت شده (مقطع سیگما) و جان سخت نشده مورد بررسی قرار گرفته است. همه ابعاد به میلیمتر می باشد. مشخصات ابعادی مقاطع هدف در شکل ۲ و مشخصات هندسی آن‌ها در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است و مشخصات مصالح در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ ابعاد و محورهای مختصات مقاطع سی-شکل لبه دار با جان سخت شده (سیگما) و جان سخت نشده (ابعاد: میلیمتر)

مقطع با جان سخت شده (مقطع سیگما) در این مطالعه، مشخصات ظاهری یکسانی با نوع جان سخت نشده دارد به جز اینکه قسمت میانی جان به طول ۷۸ میلیمتر به صورت مرکزی به اندازه ۲ میلیمتر به داخل مقطع خم شده است.



جدول ۱ مشخصات مقطع سی-شکل لبه دار با جان سخت نشده (C305-50-19-2.5(mm))

| Calculated Section Properties | |
|-------------------------------|------------------------|
| $J=2164.6581$ | $A=1039.0359$ |
| $Z_{cg}=149.9$ | $X_{cg}=8.199$ |
| $I_{zz}=239299.4173$ | $I_{xx}=11917109.2817$ |
| $\theta=0$ | $I_{xz}=0$ |
| $I_{22}=239299.4173$ | $I_{11}=11917109.2817$ |
| Open Section Properties | |
| $Z_s=149.9$ | $X_s=-15.9816$ |
| $C_w=4310926655.4966$ | |
| $\beta_2=426.1021$ | $\beta_1=0$ |

جدول ۲ مشخصات مقطع سی-شکل لبه دار با جان سخت شده (مقطع سیگما) (C305-50-19-2.5(mm))

| Calculated Section Properties | |
|-------------------------------|------------------------|
| $J=2177.3685$ | $A=1045.1369$ |
| $Z_{cg}=149.9452$ | $X_{cg}=8.6379$ |
| $I_{zz}=232547.4718$ | $I_{xx}=11926228.6161$ |
| $\theta=0.006982$ | $I_{xz}=-1424.9882$ |
| $I_{22}=232547.2982$ | $I_{11}=11926228.7898$ |
| Open Section Properties | |
| $Z_s=150.1237$ | $X_s=-14.3529$ |
| $C_w=4410456356.4002$ | |
| $\beta_2=412.232$ | $\beta_1=-0.49955$ |



جدول ۳ مشخصات مکانیکی فولاد سرد نورد شده

| Mechanical Material Properties of Applied Cold-formed Steel | | | |
|---|--------|-------|---------------------------|
| Mpa | 200000 | E | Modulus of Elasticity |
| Mpa | 76923 | G | Shear Modulus |
| - | 0.3 | ν | Poisson Ratio |
| Mpa | 230 | F_y | Yield Tensile Strength |
| Mpa | 300 | F_u | Ultimate Tensile Strength |

۴. طراحی اعضای خمشی سرد نورد شده بر اساس آیین نامه AISI2016

دو روش برای طراحی سازه های فولادی سرد نورده شده وجود دارد. روش متداول، روش عرض موثر، که با لحاظ کردن رفتار پس-کمانشی فولاد سرد نورد شده و ارائه فرمولاسیون هایی مشخصات موثر مقطع را محاسبه کرده و در نهایت با فرمول هایی مقاومت اسمی مقطع را محاسبه می کند. روش دوم، روش مقاومت مستقیم که مستقیماً با لحاظ کردن رفتار کمانشی مقطع و عضو، مقاومت مستقیم عضو را محاسبه می توان کرد. در این تحقیق از روش مقاومت مستقیم برای محاسبه مقاومت اسمی اعضا استفاده شده است.

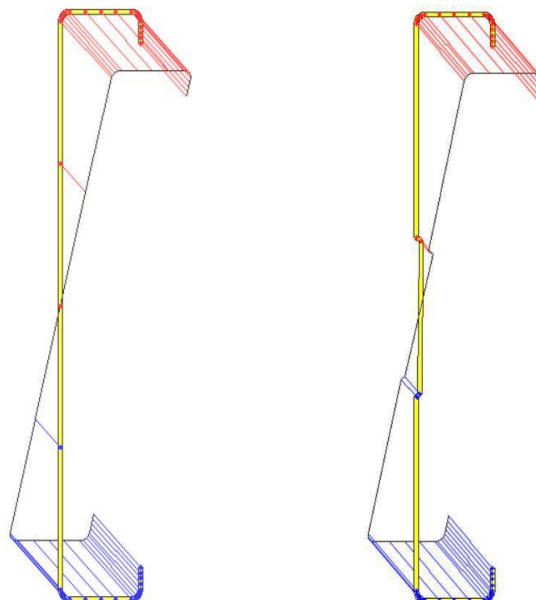
۴.۱. روش مقاومت مستقیم

وقتی مقاطع پیچیده تر یا بهینه تر می گردند به واسطه لبه اضافی و یا سخت کننده های میانی، محاسبه عرض موثر بیش از حد دشوار و زمانبر می گردد. علاوه بر این، روش فعلی آیین نامه، به جزء مقطع به صورت یک المان مستقل نگاه می کند، بنابراین اندرکنش بین اجزا لحاظ نمی گردد. به منظور غلبه بر این مسائل، یک روش جدید توسط شیفر و پکوز [4] توسعه یافت به نام روش مقامت مستقیم. این روش جدید از محاسبه عرض موثر اجتناب کرده و به جای آن از منحنی های مقاومت برای کل عضو استفاده می کند.

توسعه روش مقاومت مستقیم بر اساس فرضیات تجربی به کار رفته در روش عرض موثر می باشد، به طوری که مقاومت نهایی، تابعی از بارهای کمانش الاستیک و تنش تسلیم مصالح می باشد. منحنی های مقاومت برای روش مقاومت مستقیم توسط تعداد زیادی داده های آزمایشگاهی کالیبره شده است. روش مقاومت مستقیم از کل مقطع در تعیین کمانش الاستیک استفاده می کند و ضوابط خاصی برای مقاومت کمانش کلی، اعوجاجی و موضعی پیشنهاد می کند هم برای عضو خمشی و هم برای عضو فشاری [12].

در تحلیل یک مقطع با روش مقاومت مستقیم برای یک تیر یا ستون مشخص، همه مدهای کمانش می تواند رخ ندهد. در این حالت، مد ناموجود می بایست در محاسبات لحاظ نگردد. در نرم افزار CUFSM، لنگر تسلیم می بایست مطابق شکل ۳ به مقطع هدف تخصیص یابد تا بتوان ضرایب بار (M_{cr}/M_y) را محاسبه کرد. M_{cr} می تواند M_{cre} ، M_{crl} یا M_{crd} باشد. تعاریف مربوط به M_{cre} ، M_{crl} و M_{crd} در بخش بعد توضیح داده شده است.

‡ Load Factors



شکل ۳ تخصیص M_y به مقاطع هدف در نرم افزار CUFMS

۴.۱.۱. مقاومت کماتش جانبی-پیچشی اسمی

مقاومت خمشی اسمی، M_{ne} ، برای کماتش جانبی-پیچشی برابر است با:

$$\text{if } : M_{cre} > 2.78M_y; \quad M_{ne} = M_y \quad [1]$$

$$\text{if } : 0.56M_y \leq M_{cre} \leq 2.78M_y; \quad M_{ne} = \frac{10}{9} \cdot M_y \cdot \left(1 - \frac{10 \cdot M_y}{36 \cdot M_{cre}}\right) \quad [2]$$

$$\text{if } : M_{cre} < 0.56M_y \quad M_{ne} = M_{cre} \quad [3]$$

M_{cre} : لنگر کماتش جانبی-پیچشی الاستیک بحرانی

۴.۱.۲. مقاومت کماتش موضعی اسمی

مقاومت خمشی اسمی، M_{nl} ، برای کماتش موضعی برابر است با:

[4]

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crl}}}$$

$$\text{if } : \lambda_l \leq 0.776; \quad M_{nl} = M_{ne} \quad [5]$$



$$\text{if } \lambda_1 > 0.776; \quad M_{nl} = M_y \cdot \left(1 - 0.15 \cdot \left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0.4}\right) \cdot \left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0.4} \quad [6]$$

M_{crl} : لنگر کماتش موضعی الاستیک بحرانی

M_{ne} : مقاومت کماتش اسمی برای کماتش جانبی-پیچشی بر اساس بند ۴,۱,۱

۴,۱,۳. مقاومت کماتش اعوجاجی اسمی

مقاومت خمشی اسمی، M_{nd} ، برای کماتش اعوجاجی برابر است با:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad [7]$$

$$\text{if } \lambda_d \leq 0.673; \quad M_{nd} = M_y \quad [8]$$

$$\text{if } \lambda_d > 0.673; \quad M_{nd} = M_y \cdot \left(1 - 0.22 \frac{1}{\lambda_d}\right) \quad [9]$$

M_{crd} : لنگر کماتش اعوجاجی الاستیک بحرانی

۵. نتایج

در این بخش، نتایج تحلیل های کماتش الاستیک تیرهای ۶ متری در ۲ نوع مقطع هدف (C305-50-19-2.5(mm)، مقطع سیگما و مقطع با جان ساده که خمش حول محور قوی رخ داده است تشریح شده است.

برای هر مقطع هدف تحت لنگر خمشی تسلیم (M_y)، شکل های مد کماتش یافته، ضرایب بار متناظر (M_{cr}/M_y) و طولهای مهار نشده بحرانی به تصویر کشیده شده است. طول مهار نشده طولی است که یک مد کماتشی خاص در آن رخ می دهد. روش نوار محدود مقید شده^۵ به منظور جداسازی مدهای مشارکتی استفاده شده است؛ به منظور سهم مدهای کماتشی برای یک ضریب بار مشخص، ضرایب مشارکت مد براساس روش وکتور نرم^۶ محاسبه شده است.

در شکل های ۴-۷ و جداول ۴ و ۵، نتایج خروجی تحلیل کماتش الاستیک برای تیر ۶ متری سرد نورد شده فولادی با جان سخت نشده نمایش داده شده است.

همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، با یادآوری شرایط فیزیکی تیر هدف، وجود مهار جانبی در دو نقطه میانی تیر، کماتش جانبی-پیچشی، بحرانی ترین مد کماتشی می باشد. به منظور مشاهده این مد کماتشی در طول واقعی، مد سوم متناظر به نمایش در آمده است. در جدول ۴، ضریب بار متناظر برابر ۰,۸۸۲ می باشد که بیانگر این نکته هست که قبل از تسلیم در دورترین تار فشاری، مقطع دچار کماتش جانبی-پیچشی می گردد. همانگونه که نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده نشان می دهد (جدول ۴)، مد حاکم برای کماتش جانبی-پیچشی تیر، کماتش کلی با مشارکت ۹۴,۴٪ می باشد.

^۵ Constraint Finite Strip Method (C-FSM)

^۶ Vector Norm



در شکل ۵، روند کلی نسبت بار متناظر با طول‌های مختلف در مد اول و همچنین طیف مشارکت مدها به تصویر کشیده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در طول‌های بین ۲-۶ متر، کماتش جانبی-پیچشی، کاملاً مد حاکم کماتش می‌باشد و در طول‌های بین ۱-۲ متر، این کماتش، مد غالب کماتشی می‌باشد.

در شکل ۶، شکل مد کماتش اعوجاجی بحرانی برای مقطع با جان سخت نشده به نمایش در آمده است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کماتش اعوجاجی در طول ۴۰۰ میلیمتر و در ضریب بار ۱,۷۶ اتفاق می‌افتد. همچنین در شکل ۷، روند کلی نسبت بار کماتشی در مقابل طول‌های متناظر در مد اول به تصویر کشیده شده است و طیف مشارکت مدها نمایش داده شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر نسبت بارها در طول‌های کوچک و متوسط محور افقی در مقیاس نیمه لگاریتمی ترسیم شده است. کماتش اعوجاجی برای طول‌های بین ۱۰۰-۹۰۰ میلیمتر، مد کماتشی حاکم می‌باشد. میزان مشارکت مد کماتش اعوجاجی در نسبت بار بحرانی متناظر این کماتش ۸۵,۴٪ می‌باشد (جدول ۵).

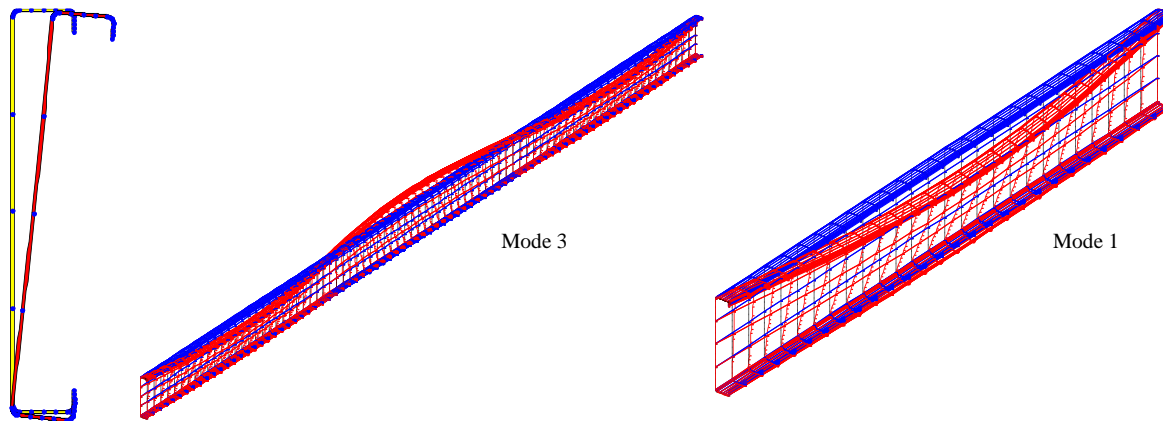
در شکل‌های ۸-۱۱ و جدول‌های ۶ و ۷، خروجی‌های تحلیل کماتش الاستیک برای تیر ۶ متری سرد نورد شده فولادی با جان سخت شده (مقطع سیگما) نمایش داده شده است.

همانگونه که در شکل ۸، نشان داده شده است، کماتش جانبی-پیچشی همانند مقطع با جان سخت نشده، بحرانی‌ترین مد کماتشی می‌باشد. به منظور دیدن شکل مد کماتشی متناظر در طول واقعی، مد متناظر سوم ترسیم شده است. ضریب بار متناظر با این کماتش ۰,۸۷۹ می‌باشد که نشان می‌دهد قبل از تسلیم مقطع، کماتش جانبی-پیچشی رخ می‌دهد.

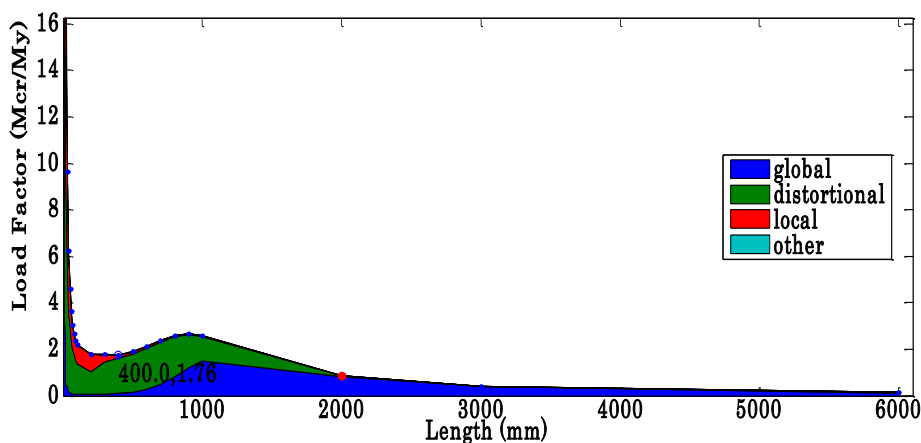
نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده برای کماتش جانبی-پیچشی در جدول ۶ نشان داده شده است؛ مد حاکم برای کماتش جانبی-پیچشی، مد کماتش کلی با مشارکت ۹۶,۲٪ می‌باشد.

در شکل ۹، روند کلی نسبت بار کماتش در مقابل طول‌های متناظر نشان داده شده است؛ مشابه با مقطع با جان سخت نشده، در طول‌های بین ۲-۶ متر، کماتش جانبی-پیچشی، مد حاکم می‌باشد و برای طول‌های بین ۱-۲ متر، این کماتش، مد غالب می‌باشد.

در شکل ۱۰، مد کماتش اعوجاجی برای مقطع سیگما به نمایش در آمده است. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، کماتش اعوجاجی در طول ۴۰۰ میلیمتر و در ضریب بار ۲,۰۵ اتفاق می‌افتد. همچنین در شکل ۱۱، روند کلی نسبت بار کماتشی در مقابل طول‌های متناظر در مد اول به تصویر کشیده شده است و طیف مشارکت مدها نمایش داده شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر نسبت بارها در طول‌های کوچک و متوسط، محور افقی در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است. کماتش اعوجاجی برای طول‌های بین ۱۰۰-۹۰۰ میلیمتر، مد کماتشی حاکم می‌باشد. میزان مشارکت مد کماتش اعوجاجی در نسبت بار بحرانی متناظر با این کماتش ۹۳٪ می‌باشد (جدول ۷).



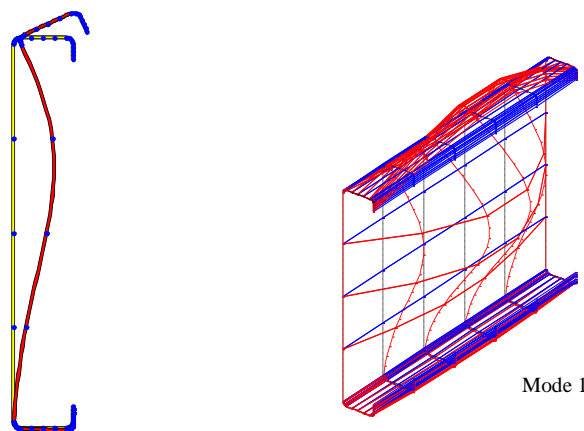
شکل ۴ شکل‌های کمانش یافته مد جانبی-پیچشی (مد کمانش کلی) تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده- $C305-50-19-2.5(mm)$



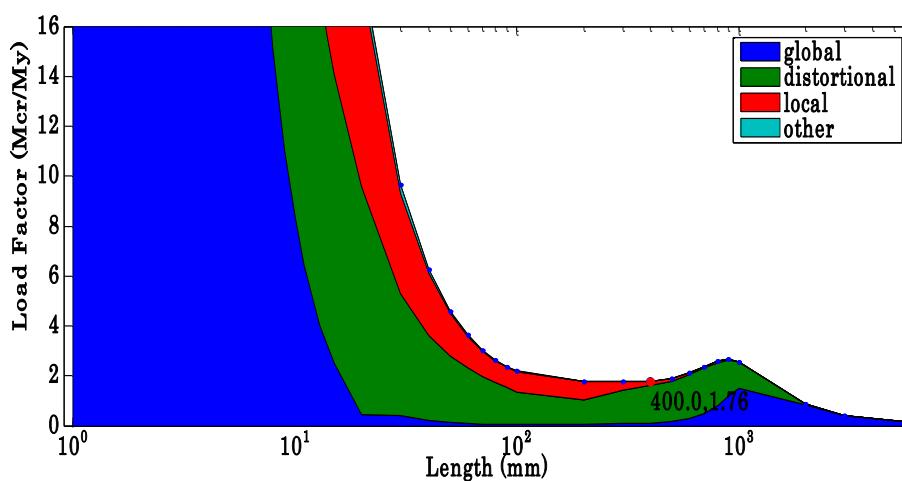
شکل ۵ منحنی پایداری تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده $C305-50-19-2.5(mm)$ در مد اول-مقیاس نرمال

جدول ۴ مقادیر نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده مرتبط با کمانش جانبی-پیچشی تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده- $C305-50-$

| 19-2.5(mm) | | | | |
|------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| Mode Number | Mode Number | Load Factor | Critical Unbraced Length (mm) | Buckling Mode |
| 3 In Length of 6000 mm | 1 In Length of 2000 mm | 0.88196 | 2000 | Lateral-Torsional Buckling |
| c-FSM Classification results | | | | |
| O=0.1% | L=0.9% | D=4.7% | G=94.4% | Vector Norm |



شکل ۶ شکل های کمانش یافته مد اعوجاجی تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده-C305-50-19-2.5(mm)

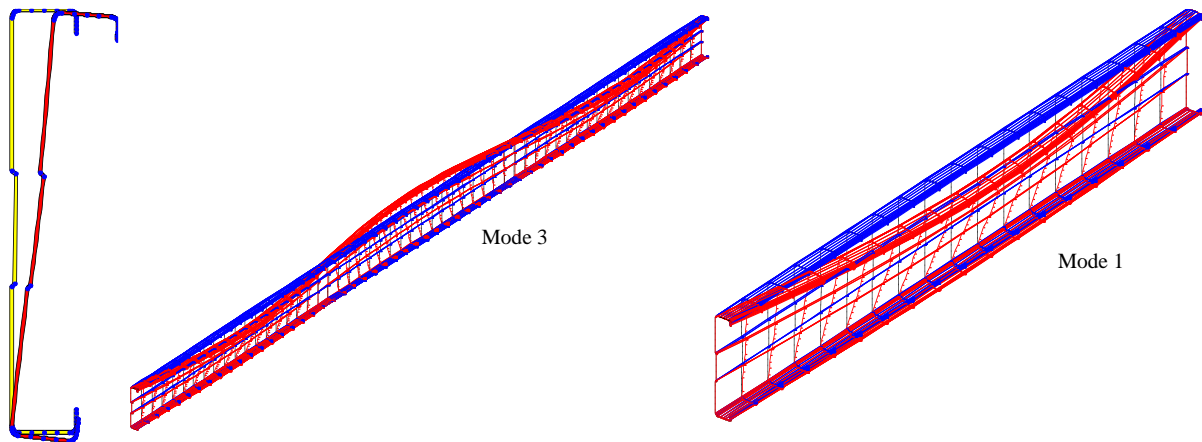


شکل ۷ منحنی پایداری تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده C305-50-19-2.5(mm) در مد اول-مقیاس نیمه لگاریتمی

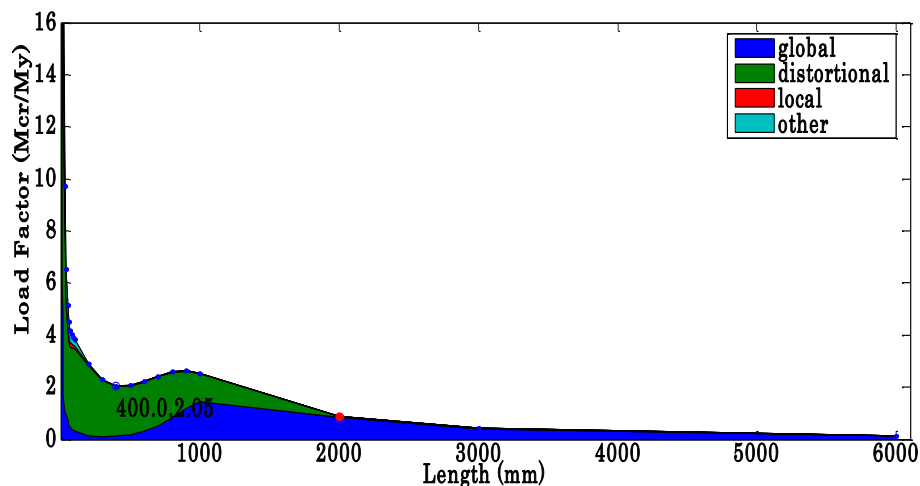
جدول ۵ مقادیر نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده مرتبط با کمانش جانبی-پیچشی تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده-

C305-50-19-2.5(mm)

| Mode Number | Load Factor | Critical Unbraced Length (mm) | Buckling Mode |
|------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 1.764 | 400 | Distortional Buckling |
| c-FSM Classification results | | | |
| O=0.3% | L=8.4% | D=85.4% | G=5.9% |
| Vector Norm | | | |



شکل ۸ شکل های کمانش یافته مد جانبی-پیچشی (مد کمانش کلی) تیر ۶ متری با مقطع سیگما-C305-50-19-2.5(mm)



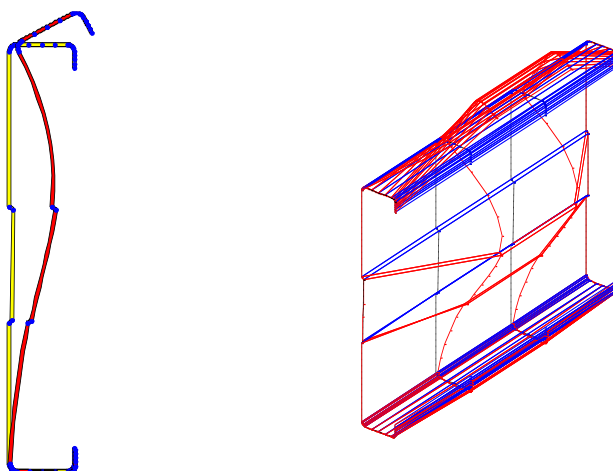
شکل ۹ منحنی پایداری تیر ۶ متری با مقطع سیگما C305-50-19-2.5(mm) در مد اول-مقیاس نرمال

جدول ۶ مقادیر نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده مرتبط با کمانش جانبی-پیچشی تیر ۶ متری با مقطع سیگما-C305-50-19-2.5(mm)

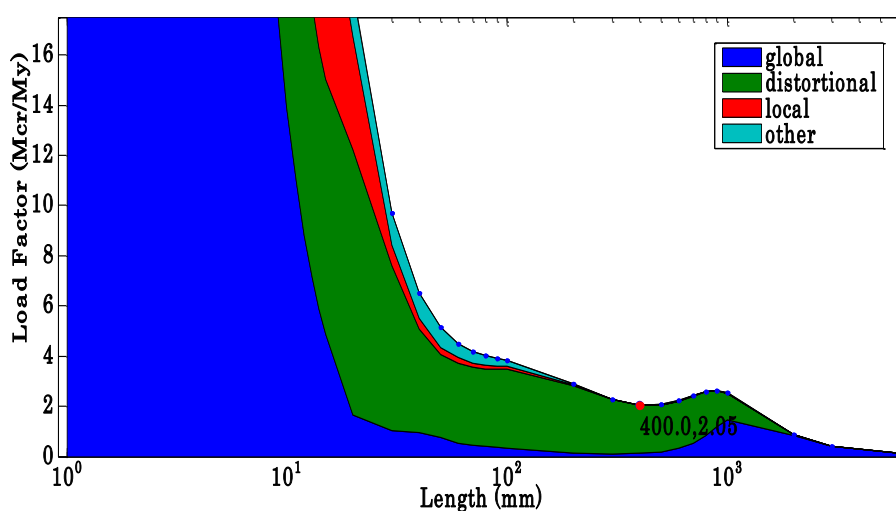
| Mode Number | Mode Number | Load Factor | Critical Unbraced Length (mm) | Buckling Mode |
|------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|
| 3 In Length of 6000 mm | 1 In Length of 2000 mm | 0.87933 | 2000 | Lateral-Torsional Buckling |

c-FSM Classification results

| | | | | |
|--------|--------|--------|---------|-------------|
| O=0.1% | L=0.2% | D=3.6% | G=96.2% | Vector Norm |
|--------|--------|--------|---------|-------------|



شکل ۱۰ شکل های کماتش یافته مد اعوجاجی تیر ۶ متری با مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده- $C305-50-19-2.5(mm)$



شکل ۱۱ منحنی پایداری تیر ۶ متری با مقطع سیگما $C305-50-19-2.5(mm)$ در مد اول-مقیاس نیمه لگاریتمی

جدول ۷ مقادیر نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده مرتبط با کماتش اعوجاجی تیر ۶ متری با مقطع سیگما- $C305-50-19-2.5(mm)$

| Mode Number | Load Factor | Critical Unbraced Length (mm) | Buckling Mode |
|-------------|-------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 | 2.045 | 400 | Distortional Buckling |

c-FSM Classification results

| | | | | |
|--------|--------|---------|--------|-------------|
| O=0.3% | L=0.7% | D=93.0% | G=6.1% | Vector Norm |
|--------|--------|---------|--------|-------------|



۶. مقایسه نتایج و بحث

مقایسه نتایج برای دو مقطع جان سخت نشده و جان سخت شده ی C305-50-19-2.5 که در قسمت قبل توضیح شد. در این بخش آورده شده است.

اختلاف بین نسبت بار برای این دو مقطع در کمانش جانبی-پیچشی (کمانش کلی)، برای مقطع سخت نشده، ۰,۸۸۲ و برای مقطع سخت شده ۰,۸۷۹ می باشد که البته این اختلاف ناچیز می باشد. با این حال کاهش در ممان اینرسی حول محور ضعیف برای مقطع سیگما نسبت به مقطع با جان سخت نشده دلیل این کاهش می باشد.

در کمانش اعوجاجی دو مقطع مذکور، ضریب بار برای مقطع سیگما ۲,۰۵ و برای مقطع جان سخت نشده ۱,۷۶ می باشد که نشان می دهد ۱۶,۵٪ افزایش در نسبت بار کمانشی مقطع سیگما ناشی از سخت شونده گی جان رخ داده است.

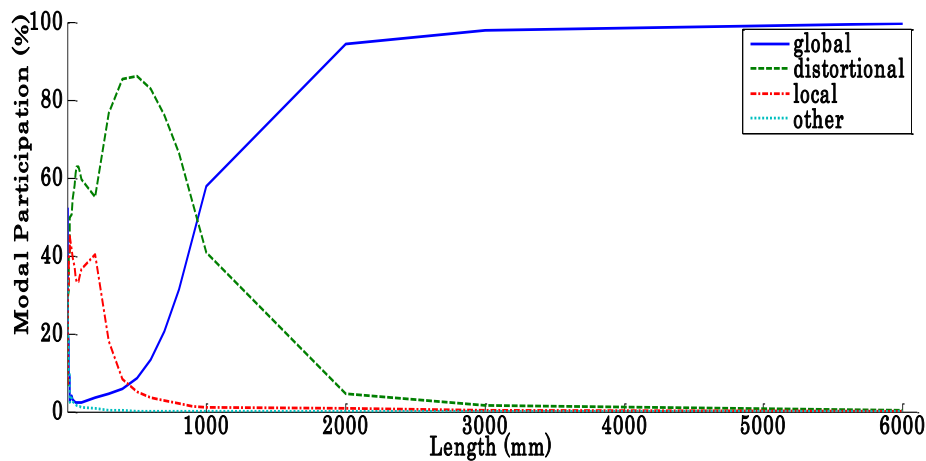
همانطور که در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، نتایج تحلیل نوار محدود مقید شده برای مقطع سیگما و جان سخت نشده که بر اساس روش نرم برداری^۷ انجام گرفته است، نشان می دهد که در طول های کوتاه (۰-۲۵۰ میلیمتر)، سخت شونده گی جان به طور قابل توجهی حضور مد کمانش موضعی را کاهش می دهد و این مد به مد کمانش اعوجاجی تبدیل می شود.

در شکل ۱۴، به منظور مقایسه روندهای کمانش اعوجاجی و موضعی در مقابل طولهای متناظر در دو مقطع مورد بررسی، نمودار پایداری هر دو مقطع با یکدیگر در مقیاس نیمه لگاریتمی به نمایش در آمده است. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، اثر سخت شونده گی جان در طول های کوتاه (۵۰-۴۰۰ میلیمتر)، قابل توجه می باشد و ضریب بار به طور قابل توجهی نسبت به مقطع سخت نشده افزایش یافته است؛ در طول های متوسط (۴۰۰-۱۰۰۰ میلیمتر)، اثر مثبت سخت شونده گی جان قابل مشاهده می باشد ولی قابل توجه نیست.

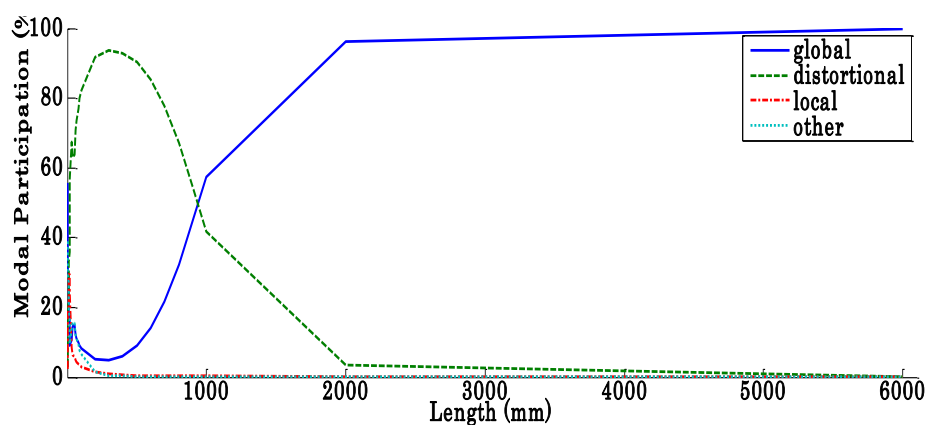
در شکل ۱۵ و در طول های بلند (۲۰۰۰-۶۰۰۰ میلیمتر)، اثر سخت شونده گی جان قابل توجه نمی باشد و ضریب بار مقادیر نزدیکی با معادل خود در مقطع با جان سخت نشده دارد.

مقاومت های کمانش خمشی اسمی برای مقطع سیگما و مقطع جان سخت نشده سی-شکل لبه دار C305-50-19-2.5 با روش مقاومت مستقیم محاسبه شده است و نتایج برای مقطع با جان سخت نشده و برای مقطع سیگما در جدول ۸ نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است، مقاومت کمانش اعوجاجی اسمی ۳,۷٪ افزایش یافته است وقتی که اثر سخت شونده گی جان در محاسبات لحاظ می گردد. از طرفی، مقاومت کمانش پیچشی-جانبی اسمی ناشی از سخت شونده گی اندکی کاسته شده است که علت آن کاهش لاغری اوپلری ناشی از سخت شونده گی جان می باشد.

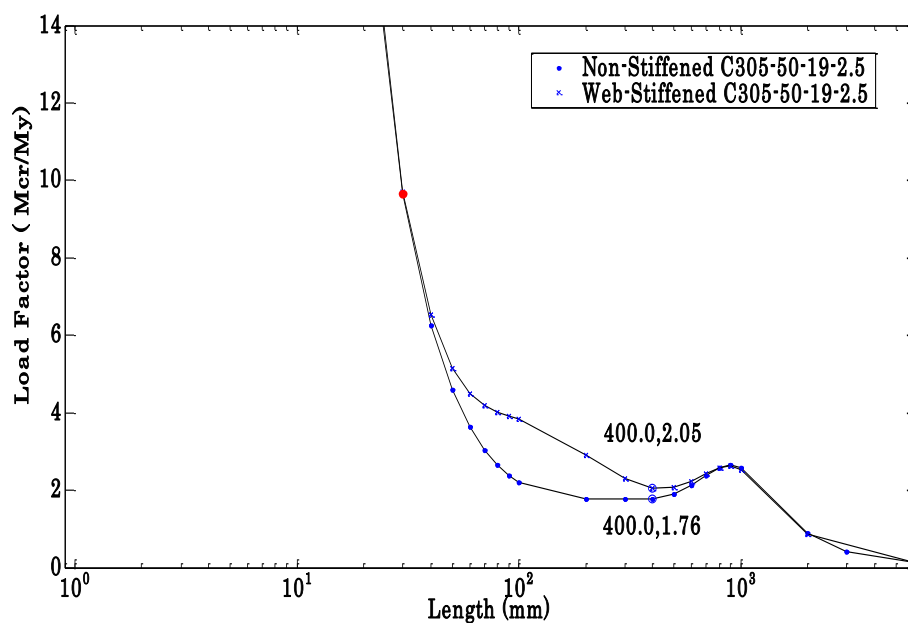
^۷ Vector Norm



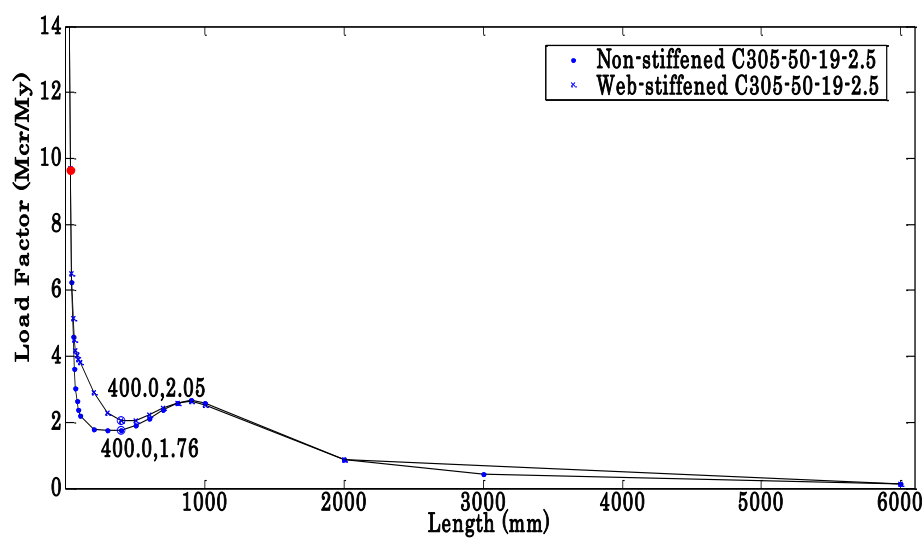
شکل ۱۲ مشارکت مد کمانشی در مقابل طول عضو برای مقاطع سی-شکل لبه دار با جان سخت نشده- (mm) 305-50-19-2.5



شکل ۱۳ مشارکت مد کمانشی در مقابل طول عضو برای مقطع سیگما- (mm) 305-50-19-2.5



شکل ۱۴ مقایسه منحنی پایداری مقطع سیگما و مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده برای ضخامت جدار ۲,۵ میلیمتر در مقیاس نیمه لگاریتمی



شکل ۱۵ مقایسه منحنی پایداری مقطع سیگما و مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده برای ضخامت جدار ۲,۵ میلیمتر در مقیاس نرمال

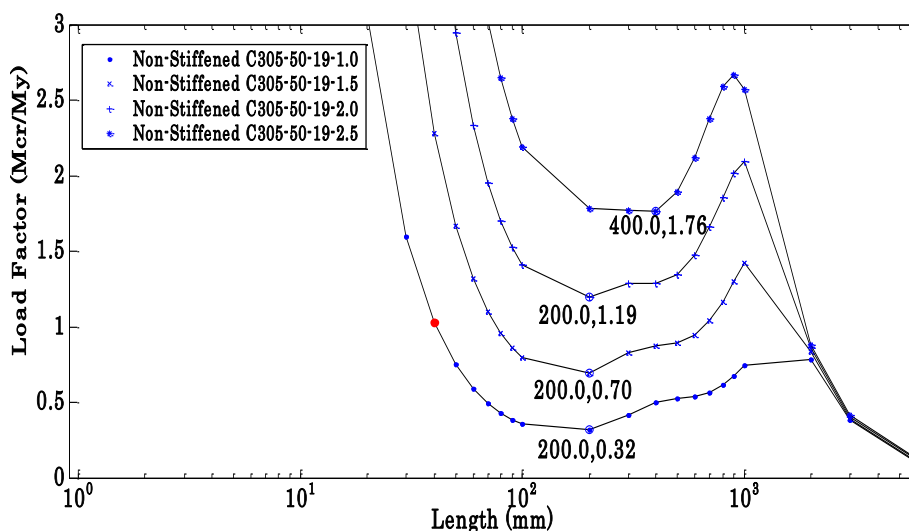


جدول ۸ مقایسه نتایج محاسبه مقاومت اسمی محاسبه شده از روش مقاومت مستقیم مقطع سیگما با مقطع با جان ساده

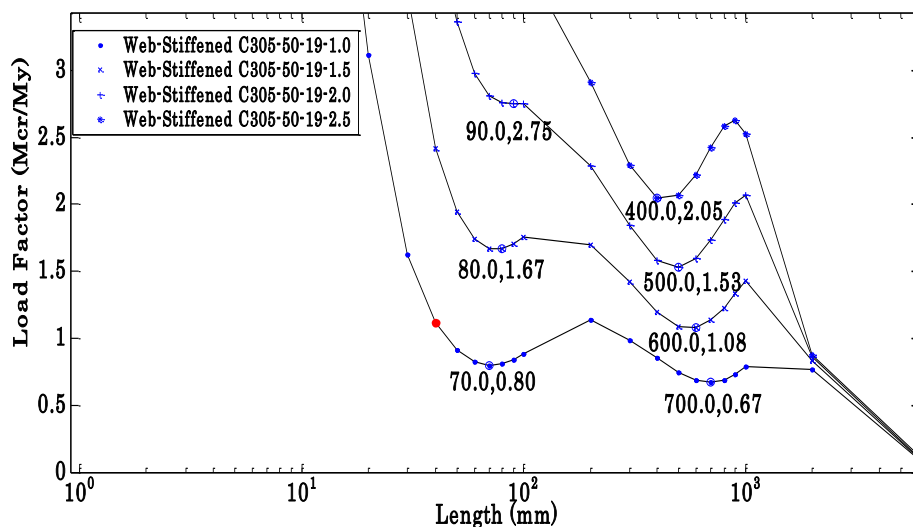
| Sigma Section-Web-Stiffened C305-50-19-2.5 | | | Non-Stiffened C305-50-19-2.5 | | |
|--|-----------|--|------------------------------|-----------|--|
| Lcr(mm) | Mn(kgf.m) | Nominal Flexural Strengths | Lcr(mm) | Mn(kgf.m) | Nominal Flexural Strengths |
| 2000 | 1367.3 | Nominal Flexural-Torsional Buckling Strength | 2000 | 1369 | Nominal Flexural-Torsional Buckling Strength |
| - | 1367.3 | Nominal Local Buckling Strength | - | 1369 | Nominal Local Buckling Strength |
| 400 | 1763 | Nominal Distortional Buckling Strength | 400 | 1697 | Nominal Distortional Buckling Strength |
| - | 1367.3 | Critical Nominal Flexural Strength | - | 1369 | Critical Nominal Flexural Strength |

به منظور نتیجه گیری جامع تر از بحث اثر سخت شوندگی جان در اعضای خمشی، مقاطع دیگری با همان ابعاد مقطع C305-50-19 ولی با ضخامت های دیگر، ۱،۰، ۱،۵ و ۲،۰ میلیمتر در دو حالت مقطع سیگما و مقطع با جان سخت نشده مورد تحلیل نوار محدود قرار گرفتند.

در شکل ۱۶، منحنی های پایداری برای مقاطع سی-شکل لبه دار با جان سخت نشده با ضخامت های مختلف به نمایش در آمده است. نتایج نشان می دهد که افزایش در ضخامت اثر قابل توجهی در مقاومت کمانش اعوجاجی دارد و ضریب بار این کمانش از ۰،۳۲ برای مقطع با ضخامت ۱ میلیمتر به ۱،۷۶ برای مقطع با ضخامت ۲،۵ میلیمتر افزایش می یابد. لازم به توجه می باشد که تغییر ضخامت اثر قابل توجهی روی کمانش جانبی-پیچشی مقطع ندارد و دلیل آن عدم تغییر شعاع ژیراسیون با تغییر در ضخامت مقطع می باشد.



شکل ۱۶ منحنی های پایداری برای مقاطع سی-شکل لبه دار با جان ساده در ضخامت های ۱-۱،۵-۲-۲،۵ میلیمتر

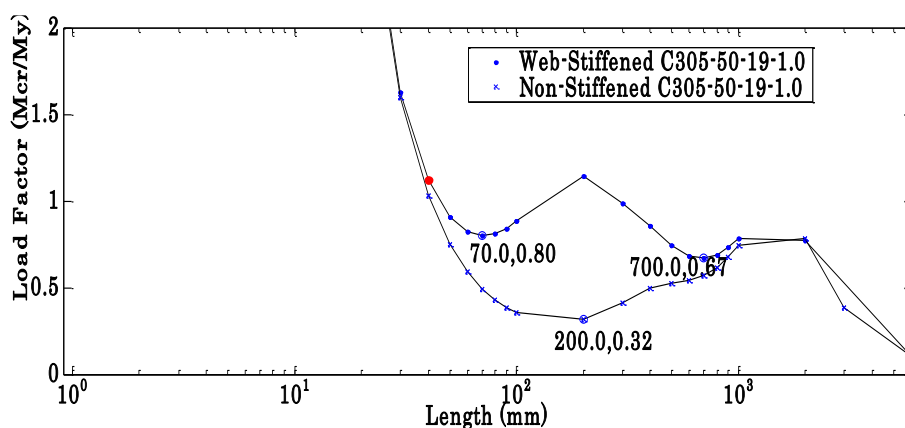


شکل ۱۷ منحنی‌های پایداری برای مقاطع سی-شکل لبه دار با جان سخت شده در ضخامت‌های ۱-۲-۲,۵ میلی‌متر

در شکل ۱۷، منحنی‌های پایداری برای مقاطع سی-شکل لبه دار با جان سخت شده به نمایش درآمده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش در ضخامت اثر قابل توجهی در مقاومت کمانش اعوجاجی دارد. یک افزایش در ضریب بار از ۰,۶۷ در مقطع به ضخامت ۱ میلی‌متر به ۲,۰۵ در مقطع با ضخامت ۲,۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. همچنین مشابه با مقطع با جان سخت نشده، تغییر در ضخامت تاثیر ناچیزی در ضریب بار کمانش جانبی-پیچشی دارد.

مقایسه نتایج در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهد، اثر سخت‌شدگی جان در افزایش مقاومت مقاطع لاغرتر قاب توجه‌تر می‌باشد. به منظور نمایش این افزایش ناگهانی، منحنی‌های پایداری برای مقطع سیگما و جان سخت نشده C305-50-19-1.0(mm) در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

یک افزایش در ضریب بار کمانش اعوجاجی از ۰,۳۲ به ۰,۶۷ در جداره با ضخامت ۱ میلی‌متر قابل مشاهده است. بنابراین ۱۰۹٪ افزایش در ضریب بار کمانش اعوجاجی مشهود است. این در حالی است که برای ضخامت ۲,۵ میلی‌متر (شکل ۱۴)، ضریب بار کمانش اعوجاجی از ۱,۷۶ به ۲,۰۵ برای افزایش یافت و این به معنی ۱۶,۵٪ افزایش در ضریب بار می‌باشد. پس اثر قابل توجه سخت‌شدگی جان در مقاطع لاغرتر بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۸ مقایسه منحنی پایداری مقطع سیگما و مقطع سی-شکل لبه دار با جان ساده برای ضخامت جدار ۱,۰ میلی‌متر در مقیاس نیمه لگاریتمی

۷. خلاصه و جمع بندی

اثر سخت شوندگی جان در مقاطع سرد نورد شده فولادی در اعضای خمشی در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت. اهم مطالب به شرح ذیل می باشند:

سخت شوندگی جان مقاومت کمانش اعوجاجی و موضعی را بهبود می بخشد و همچنین از رخداد کمانش موضعی جلوگیری می کند. سخت شوندگی جان مورد مطالعه در این پژوهش، اثر قابل توجهی روی کمانش جانبی-پیچشی ندارد. هر چه اجزای مقطع لاغرتر باشد، اثر سخت شوندگی در افزایش مقاومت اعوجاجی مقطع بیشتر می باشد. به عبارتی دیگر، سخت شوندگی جان به طور قابل توجهی مقاطع سی-شکل لبه دار را در برای کمانش موضعی مقاومتر می کند. در نتیجه سخت شوندگی جان نقشی کلیدی در افزایش مقاومت کمانش اعوجاجی ایفا می کند.

مراجع

- [1] B. W. Schafer, "Cold-formed steel structures around the world," *Steel Constr.*
- [2] AISI S100-16, *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.* 2016.
- [3] *Direct Strength Method (DSM) Design Guide Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.* 2006.
- [4] B. W. Schafer and T. Peköz, "Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions," in *Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*, 1998, pp. 69–76.



- B. W. Schafer, "Designing cold-formed steel using the direct strength method," in [5]
*Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures:
Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*,
2006, vol. 2006, pp. 475–488.
- Y. K. Cheung, *Finite strip method in structural analysis*. Pergamon Press, 1976. [6]
- CUFSM, "CUFSM v4.05." 2006. [7]
- B. W. Schafer and S. Ádány, "Buckling analysis of cold-formed steel members using [8]
CUFSM: conventional and constrained finite strip methods," in *18th International
Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures October 26-27, Orlando,
Florida*, 2006, pp. 17–31.
- B. W. Schafer, "Tutorials of CUFSM4," 2006. [Online]. Available: [9]
<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/index.htm>.
- Z. Li and B. W. Schafer, "Buckling analysis of cold-formed steel members with [10]
general boundary conditions using CUFSM: Conventional and constrained finite
strip methods," in *Proceedings Twentieth International Speciality Conference on
Cold-Formed Steel Structures*, 2010, pp. 17–31.
- C. H. Pham and G. J. Hancock, "Experimental Investigation and Direct Strength [11]
Design of High-Strength , Complex C-Sections in Pure Bending," 2013.
- C. Yu and B. W. Schafer, "Distortional Buckling Of Cold-Formed Steel Members In [12]
Bending, Technical Report," 2005.