



# بررسی ظرفیت فشاری مقاطع نبشی فولادی سرد نورد شده

مهران زینلیان<sup>۱\*</sup>، ستار بلخاری<sup>۲</sup>، پوریا رافعی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان

\* m.zeinalian@eng.ui.ac.ir، ۸۱۷۴۶۷۳۴۴۱، صندوق پستی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۱)

## چکیده

در این تحقیق ظرفیت فشاری مقاطع نبشی ساخته شده از فولاد سرد نورد شده با استفاده از روش‌های آیین‌نامه‌ای، روش‌های عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی عددی، ضمن بررسی حالت‌های کمانش اعضای فولادی سرد نورد شده، رفتار غیرخطی مواد، تغییر شکل‌های اولیه بررسی شده است. به همین منظور از نرم افزار انسیس استفاده شده و برای صحت سنجی، نمونه‌ای با ابعاد واقعی در محیط آزمایشگاه تحت فشار قرار گرفته است. علاوه بر این ظرفیت فشاری مقطع مورد نظر از روش‌های عرض موثر و مقاومت مستقیم نیز بدست آمده و با نتایج آزمایشگاهی و امان محدود مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های آیین‌نامه‌ای، نتایج محافظه کارانه‌ای را ارائه می‌دهند. همچنین با بررسی تاثیر سخت کننده و لبه بر روی مقاطع نبشی، نشان داده شد که با اضافه نمودن تنها یک سخت کننده در بال‌های نبشی می‌توان ظرفیت آن را ۲۴٪ افزایش داد.

## واژگان کلیدی

فولاد سرد نورد شده، ظرفیت فشاری، روش عرض موثر، روش مقاومت مستقیم، نبشی

## Compression Capacity of Cold Formed Steel Angle studs

M. Zeinalian, S. Bolkhari, P. Rafeei

### Abstract

In this study, an investigation on buckling modes of cold formed steel members, design methods and also behavior of angle studs are illustrated. ANSYS software is employed in order to analysis the sections taking into account geometry imperfection as well as materials nonlinearity. The materials properties are extracted from experimental coupon tests. The models are verified based on full-scale specimens which are tested the laboratory of the University of Isfahan. Of particular interest are the specimens' maximum compression capacity and general shape of failure modes of the samples which is local buckling in the angles. In addition, compression capacities of desired sections are evaluated using Effective Width Method and Direct Strength Method; and then compared with experimental results as well as Finite Element Method. Four different stiffened sections are also examined in order to evaluate the presence impact of stiffeners and lips in compression capacity of members. The results show that angles which include one stiffener in each leg, have higher compression capacity of 25% of a simple angle, whereas angles which include stiffener and lip simultaneously have promoted capacity of 47% of a simple angle. Among studied sections, angles with two stiffeners and one lip on each leg have the highest compression capacity by almost 60% of a simple section. The comparison between compression capacities obtained from different methods indicates that prescribed methods by the codes are conservative to some extent.

### Keywords

Cold formed steel, Compression capacity, Effective width method, Direct strength method, Angle



سیستم سازه‌های سبک فولادی (LSF) که از مقاطع سرد نورد شده فولادی (CFS) ساخته می‌شود در سال‌های اخیر به شکل گسترده در تولید صنعتی انواع ساختمان‌های اداری، تجاری و مسکونی به کار می‌رود و به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی ساخت، جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت و ساز کشورهای پیشرفته یافته است. برای طراحی و ساخت مقاطع CFS در سطح دنیا آیین‌نامه‌های مختلفی وجود دارد که از معتبرترین آنها می‌توان به آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا AISI<sup>[۱]</sup> و همچنین آیین‌نامه‌ی استرالیا AS/NZS4600<sup>[۲]</sup> اشاره نمود. آیین‌نامه‌ی AISI برای تعیین ظرفیت فشاری مقاطع فولادی سرد نورد شده دو روش مقاومت مستقیم و عرض موثر (EWM)<sup>[۳]</sup> را پیشنهاد داده است. همچنین در خلال سال‌های گذشته محققان زیادی به بررسی ظرفیت‌های باربری مقاطع سرد نورد شده فولادی با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی و مطالعات عددی پرداختند.

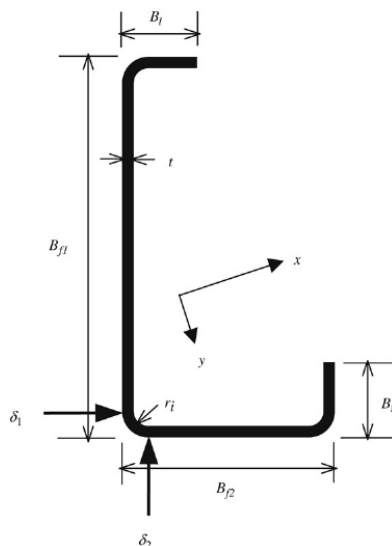
از آنجا که یکی از پرکاربردترین مقاطع سرد نورد شده فولادی در صنعت، مقطع نبشی می‌باشد، در این تحقیق به بررسی ظرفیت فشاری این مقاطع با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، آیین‌نامه‌ای و عددی پرداخته شده است؛ و ضمن مقایسه این روش‌ها میزان تاثیر سخت کننده‌ها بر افزایش ظرفیت این مقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق می‌تواند در باز طراحی بسیاری از سازه‌های موجود ساخته شده با فولاد معمولی مانند سازه تجهیزات ایستگاه‌های فوق توزیع و انتقال برق مورد استفاده قرار گیرد.

Ganesan و Moen<sup>[۳]</sup> در مطالعه‌ای اطلاعات آزمایشگاهی مربوط به ۶۷۵ ستونچه تحت بارگذاری فشاری با مقاطع مختلف از جمله C شکل مسطح و لبه‌دار و Z شکل مسطح و لبه‌دار و نبشی را جمع آوری نموده و برای هر نمونه از روش مقاومت مستقیم و روش عرض موثر ظرفیت فشاری آنها را محاسبه نمودند. آنها نشان دادند روش مقاومت مستقیم برای پیش بینی ظرفیت کماتش موضعی دقیق‌تر است و می‌تواند جایگزینی برای روش عرض موثر باشد ولی این دو روش برای تعیین ظرفیت ستون‌های با مقطع نبشی بیش از حد محافظه کارانه است.

Shanmugam و Dhanalakshmi<sup>[۴]</sup> در سال ۲۰۰۱ تحقیقی بر روی ظرفیت فشاری دو دسته ستونچه نبشی شکل با بال مساوی انجام دادند. دسته‌ی اول بدون سوراخ و دسته‌ی دوم دارای سوراخ بوده و تکیه‌گاه همه‌ی نمونه‌ها گیردار در نظر

گرفته شده است. آنها برای تعیین ظرفیت ستونچه‌ها هم از روش آزمایشگاهی و هم از روش عددی بهره بردند. نتایج نشان دهنده‌ی این بود که وجود خروج از مرکزیت در بار وارده به صورت محسوسی ظرفیت مقطع را کاهش می‌دهد و وقتی ضخامت افزایش یابد خروج از مرکزیت تاثیر کمتری در ظرفیت نهایی مقطع خواهد داشت. مقایسه‌ی نمونه‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ نشان می‌دهد که وجود سوراخ باعث کاهش ظرفیت نهایی مقطع می‌شود و این کاهش در ۶۰٪ نمونه‌ها حدود ۲۰٪ ظرفیت نهایی است.

Chen و Young<sup>[۵]</sup> در سال ۲۰۰۸ بر روی ظرفیت فشاری نبشی‌هایی با بال‌های نامساوی به ابعاد اسمی ۵۰ mm و ۸۰ mm مطالعه‌ای انجام دادند. این ستونچه‌ها دارای لبه‌هایی با طول اسمی ۱۶ mm و در سه ضخامت ۱ mm و ۱/۵ mm و ۱/۹ mm بوده که در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱- مقطع نبشی مورد آزمایش با بال‌های نامساوی [۵]

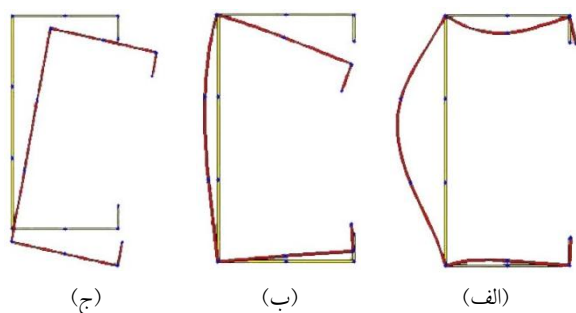
ظرفیت بدست آمده نمونه‌ها در آزمایشگاه با ظرفیت محاسبه شده از روش آیین‌نامه‌ی آمریکا مقایسه شد و نشان داد که ظرفیت‌های تعیین شده توسط آیین‌نامه‌ی آمریکا برای ستونچه‌های با این نوع مقطع کاملاً محافظه کارانه است. همچنین آنها برای صحت سنجی روابط موجود در آیین‌نامه‌ی آمریکا آنالیز عددی نیز برای نمونه‌ها انجام دادند و نشان دادند که این قوانین برای نمونه‌های با ضخامت ۱/۹ mm قابل اطمینان بوده ولی برای نمونه‌های با ضخامت ۱ mm و ۱/۵ mm قابل اطمینان نیستند. Young و Ellobody<sup>[۶]</sup> در مطالعه‌ای دیگر این نمونه‌ها را در نرم افزار ABAQUS مدل نمودند و باز نشان

که مطالعات عددی بخوبی می تواند با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد. همچنین نحوه اتصال مقاطع دابل نبشی تاثیر زیادی بر رفتار مرکب آنها دارد.

## ۲- حالت های کمانش عضو فولادی سرد نورد شده

بدلیل لاغری زیاد اعضای سرد نورد در مقایسه با عرض آنها، کمانش این اعضای لاغر تحت فشار، برش، خمش و لهیدگی در تنش هایی به مراتب کمتر از تنش تسلیم رخ می دهد. کمانش موضعی این اعضا از جمله مهمترین ملاحظات طراحی می باشد. لهیدگی جان نیز از جمله مشکلات بحرانی اعضای سرد نورد به شمار می رود و دو دلیل عمده دارد. دلیل اول استفاده از سخت کننده هایی است که به خاطر ماهیت پدید آمدن بوسیله غلتک های فشاری، تحت تمرکز تنش قرار می گیرند و دلیل دوم نسبت عمق به ضخامت زیاد این اعضا است که در مقایسه با فولاد گرم نورد شده عمدتاً مقادیر بیشتری را داراست [۱۰]. فولاد گرم نورد شده دارای نسبت عمق به ضخامت کمتری نسبت به فولاد سرد نورد شده است و از این رو در حالت های کمانش فولاد گرم نورد شده حالت کمانش اعوجاجی حاکم نمی باشد ولی فولاد سرد نورد شده دارای سه حالت کمانش می باشد:

۱- کمانش موضعی: نوعی کمانش است که در آن راستای خطوط متصل کننده صفحات مقطع ثابت می ماند و خود صفحه به تنهایی دچار کمانش می شود [۱۱]. نوع کمانش در شکل (۳-الف) قابل مشاهده است.



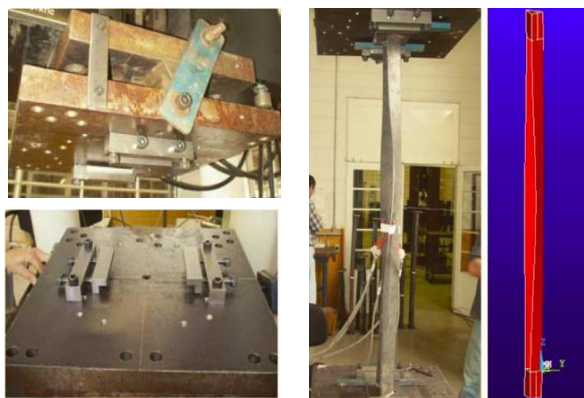
شکل ۳- حالت های کمانش: الف) کمانش موضعی، ب) کمانش اعوجاجی، ج) کمانش کلی [۱۱]

۲- کمانش اعوجاجی: نوعی کمانش است که در آن نقاط اتصال تغییر مکان دارد ولی سطح مقطع تغییر مکانی ندارد [۱۱]. این نوع کمانش در شکل (۳-ب) قابل مشاهده است.

۳- کمانش کلی: نوعی کمانش است که اعضای تحت فشار می توانند بدون تغییر در شکل مقطع عرضی دچار خمش یا

دادند که ظرفیت بدست آمده از روابط موجود در آیین نامه آمریکا برای نبشی های با بال های نامساوی به غیر از نمونه های با طول بلند محافظه کارانه است، از این رو آنها روابطی برای پیش بینی ظرفیت این نبشی ها پیشنهاد نمودند.

Chodraui و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۶ برای بدست آوردن ظرفیت نبشی های تک و دابل از روش های عددی و آزمایشگاهی و همچنین روش های آیین نامه ای که شامل روش مقاومت مستقیم و عرض موثر است، استفاده نمودند. شرایط تکیه گاهی در نظر گرفته شده گیردار و مفصلی بوده که در شکل (۲) شرایط تکیه گاه مفصلی قابل مشاهده است.



شکل ۲- طرز قرار گیری نمونه در تکیه گاه مفصلی [۷]

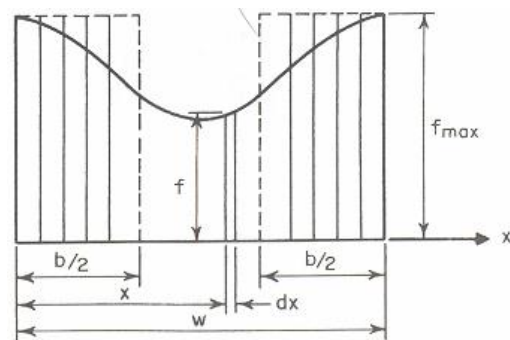
نتایج نشان می دهد چون در روابط طراحی کمانش پیچشی - خمشی در نظر گرفته نمی شود و فقط کمانش موضعی در نظر گرفته می شود ظرفیت بدست آمده ممکن است در بعضی شرایط بهینه نباشد. آنالیزهای غیرخطی المان محدود نیز این ادعا را تصدیق نمودند. Mesacasa و همکارانش [۸] نیز در سال ۲۰۱۳ بر روی نبشی های با بال های مساوی و تاثیر تغییر شکل های اولیه<sup>۹</sup> بر روی آنها تحقیقاتی انجام دادند. آنها نشان دادند با صرف نظر نمودن از طول نمونه ها و شرایط تکیه گاهی، تغییر شکل های اولیه تاثیر قابل ملاحظه ای در بار نهایی الاستیک و الاستیک-پلاستیک دارند. از طرفی با صرف نظر کردن از تغییر شکل های اولیه در تمامی ستون ها مشاهده می شود که با افزایش تنش تسلیم بیش از یک حد معین ظرفیت مقطع بهبود نمی یابد. آنها همچنین نشان دادند تغییر شکل های اولیه در شرایط تکیه گاهی مفصلی تاثیر بیشتری در ظرفیت مقطع نسبت به شرایط گیردار دارند. Maia و همکارانش [۹] یک مطالعه عددی و تجربی بر روی مقاطع دابل نبشی تحت بارهای محوری وارد شده بر مرکز سطح و خارج از آن انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند

پیش به صورت همزمان شوند [۱۱]. این نوع کمناش در شکل (۳-پ) قابل مشاهده است.

### ۳- روش‌های طراحی

۱- روش عرض موثر (EWM): المان‌های تحت فشار در مقاطع سرد نورد شده دارای تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند نورد سرد می‌باشند، از این رو مقاومت اسمی بیشتر از مقاومت واقعی است و باید کاهش یابد. در این روش برای بدست آوردن مقاومت واقعی به جای عرض مقطع تحت فشار از عرض موثر تحت فشار استفاده می‌شود [۱۲]. بر همین اساس مطابق شکل (۴) عرض  $b$  به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مساحت زیر نمودار توزیع تنش واقعی با مجموع مساحت دو قسمت مستطیلی معادل برابر شود (رابطه‌ی (۱)). عرض هر مستطیل  $b$  و طول آن برابر با تنش ماکزیمم است.

$$\int_0^w f dx = b f_{Max} \quad (1)$$



شکل ۴- توزیع تنش در روش عرض موثر [۱۲]

در یک ورق طویل مقدار  $b$  با فرض کمناش ورق در لحظه رسیدن به تنش تسلیم بر اساس روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه می‌شود:

$$f_{cr} = F_y = \frac{\pi^2 E}{3(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (2)$$

$$b = Ct \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.9t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3)$$

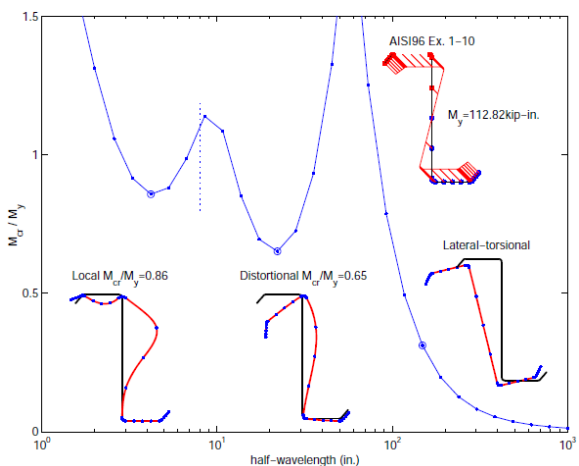
$$\mu = 0.3, \quad C = \frac{\pi}{\sqrt{3(1 - \mu^2)}} = 1.9 \quad (4)$$

۲- روش مقاومت مستقیم (DSM): در این روش به دانستن رفتار کمناش الاستیک اعضا احتیاج است، روند به گونه‌ای است که احتیاج به محاسبه عرض موثر و سعی و خطا نیست. به جای آن در این روش از مشخصات سطح مقطع کل و رفتار کمناش الاستیک مقطع برای پیش بینی مقاومت استفاده

می‌شود [۱۲]. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. پیشرفت و تکامل روز افزون این روش
۲. عدم نیاز به محاسبات اعضا
۳. عدم نیاز به سعی و خطا برای اعضای تحت خمش
۴. استفاده از مشخصات ناخالص اعضا برای محاسبات مقاومت

اساس محاسبات این روش بر مبنای ضرایب بار حاصل از نرم افزار CUFSM<sup>۱</sup> بوده که با توجه به حالت‌های کمناش موضعی، اعوجاجی و کلی بدست می‌آیند. شکل (۵) یک نمونه خروجی نرم افزار را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- یک نمونه خروجی از نرم افزار CUFSM [۱۳]

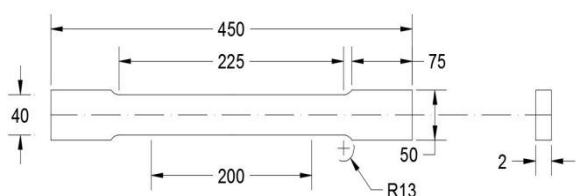
### ۴- تعیین ظرفیت فشاری ستونچه‌ی فولادی سرد نورد شده

#### ۴-۱- مشخصات ستونچه

یکی از مقاطع پرکاربرد در صنعت ساختمان و همچنین سازه‌های صنعتی مقاطع نبشی می‌باشند. به عنوان نمونه یکی از بخش‌های مهم صنعت کشور، ایستگاه‌های فوق توزیع برق می‌باشد که در سازه‌های تجهیزات این ایستگاه‌ها به صورت گسترده از مقاطع نبشی شکل فولادی گرم نورد شده استفاده می‌گردد. در شکل (۶) نمونه‌ای از این سازه‌ها را می‌توان مشاهده نمود.

با توجه به وزن زیاد این سازه‌ها و امکان سبک سازی آنها به کمک فولاد سرد نورد شده، ابتدا می‌بایست رفتار نبشی‌های ساخته شده از فولاد سرد نورد شده خصوصاً ظرفیت فشاری آن به خوبی مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور برای تعیین

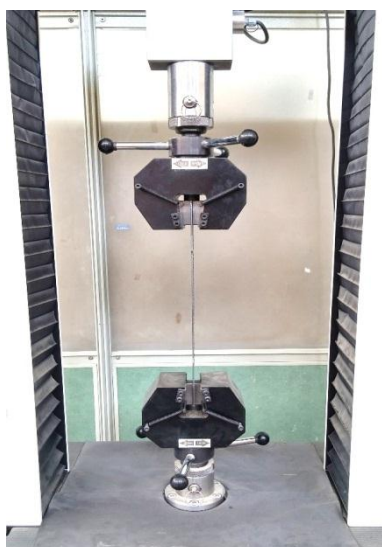




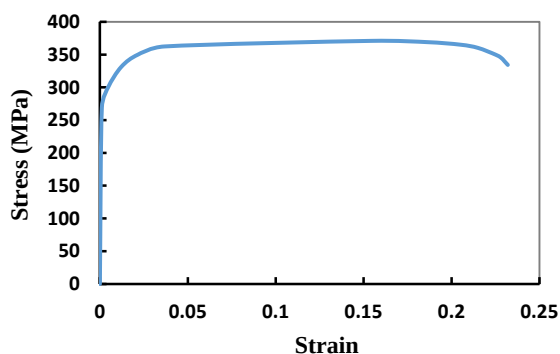
شکل ۸- ابعاد استاندارد (برحسب mm) طبق آیین نامه ASTM [۱۳]



شکل ۹- برش کاری ورق فولادی با دستگاه CNC



شکل ۱۰- آزمایش کشش بر روی نمونه‌ی استاندارد فولادی

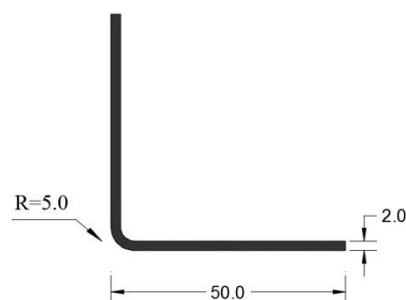


شکل ۱۱- نمودار تنش کرنش بدست آمده از آزمایش کشش

ظرفیت فشاری، ستونچه‌ای با مقطع نبشی و با ابعاد  $50 \times 50 \times 2$  mm و طول ۲۵۰ mm و شعاع خم نبشی ۵ mm در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی نبشی مورد نظر در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶- نمونه‌ای از سازه‌های موجود در ایستگاه‌های فوق توزیع برق ساخته شده از فولاد گرم نورد شده



شکل ۷- مشخصات هندسی مقطع ستونچه

#### ۲-۴- نوع فولاد مصرفی

برای بدست آوردن خصوصیات ماده‌ی ورق فولادی طبق استاندارد ASTM باید نمونه‌ای با ابعاد موجود در شکل (۸) ساخته شود و تحت کشش قرار گیرد [۱۴]. برای ایجاد این هندسه از دستگاه برشکاری CNC<sup>۱</sup> استفاده شده که در شکل (۹) قابل مشاهده است.

آزمایش کشش نمونه‌ی ساخته شده از دستگاه کشش در آزمایشگاه دانشگاه اصفهان استفاده شده است. دستگاه و نمونه‌ی تحت کشش در شکل (۱۰) و نمودار تنش کرنش بدست آمده از این آزمایش در شکل (۱۱) و مشخصات فولاد در جدول (۱) آورده شده است.



جدول ۱- نتایج آزمایش کشش بر روی نمونه‌ی فولادی

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| تنش تسلیم       | $F_y = 312 \text{ MPa}$  |
| کرنش تسلیم      | $\varepsilon_y = 0.014$  |
| تنش نهایی       | $F_u = 460 \text{ MPa}$  |
| کرنش نهایی      | $\varepsilon_u = 0.16$   |
| مدول الاستیسیته | $E = 211705 \text{ MPa}$ |

از این دو روش قابل ملاحظه است. لازم به ذکر است انتخاب طول ۲۵۰ mm به این دلیل می‌باشد که حداکثر دهانه‌ی دستگاه پرس دیجیتال در آزمایشگاه دانشگاه اصفهان این میزان بوده است.

جدول ۲- ظرفیت فشاری مقطع نبشی CFS با طول ۲۵۰ mm

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| روش مقاومت مستقیم | روش عرض موثر |
| ۲۱۰۲/۶۹ kg        | ۲۰۱۳/۳۳ kg   |

#### ۳-۴- تعیین ظرفیت ستونچه‌ی فولادی سرد نورد شده از

##### روش‌های آیین‌نامه‌ای

ظرفیت فشاری این مقطع از روش عرض موثر و روش مقاومت مستقیم بر اساس آیین‌نامه‌ی AISI محاسبه شده است. بدست آوردن ظرفیت مقطع از روش مقاومت مستقیم به این گونه است که مشخصات مقطع و همچنین خواص فولاد در نرم افزار CUFSM تعریف می‌شود و با توجه به نحوه‌ی تغییر شکل مقطع در طول‌های مختلف نرم افزار یک منحنی ضریب بار-نصف طول موج رسم می‌کند. و سپس از روی این منحنی می‌توان سه ضریب کماتش (Factor Load) موضعی، کماتش اعوجاجی و کماتش کلی را تعیین نمود [۱۵]. منحنی ضریب بار-نصف طول موج بدست آمده از نرم افزار CUFSM در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

#### ۴-۴- تعیین ظرفیت فشاری نبشی CFS با استفاده از آزمایش

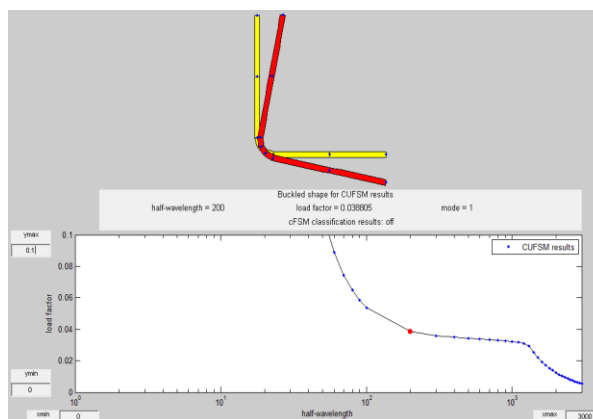
##### فشاری

برای صحت سنجی نتایج مربوط به روش‌های محاسبه‌ی ظرفیت فشاری، چهار نمونه نبشی با ابعاد ذکر شده ساخته شد، که در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- چهار نمونه مقطع فولادی سرد نورد شده با طول ۲۵۰ mm

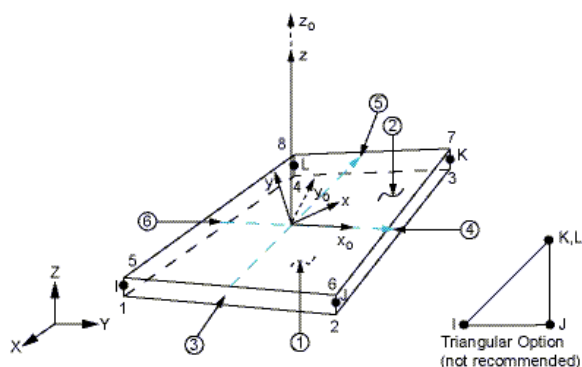
برای شبیه‌سازی تکیه‌گاه مفصلی، از یک ورق صلب آهنی ۱۰۰×۱۰۰ mm که در مرکز سطح آن یک نیم‌کره به شعاع ۵ mm خالی می‌باشد، استفاده شده است. برای ایجاد امکان دوران مناسب حول محورهای نبشی، گلوله‌ای فولادی با قطر ۱۰ mm در آن قرار گرفته شده است که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. همچنین برای افزایش ایمنی آزمایش و جلوگیری از حرکت احتمالی افقی نبشی بر روی ورق‌های تکیه‌گاهی، چهار پیچ با فاصله‌ی ۲ mm از هر طرف بال نبشی در نظر گرفته شده است. روش انجام آزمایش به گونه‌ای بود که در دو طرف عضو، این تکیه‌گاه قرار گرفته و در زیر دستگاه پرس دیجیتال تحت فشار قرار گرفت (شکل (۱۴)). نتایج حاصل از آزمایش‌های فوق در جدول (۳) ارائه شده‌اند. پس از اندازه‌گیری ظرفیت فشاری نمونه‌ها مشاهده گردید حالت کماتش تمامی نمونه‌ها، کماتش موضعی بوده و ظرفیت فشاری متوسط محاسبه شده نیز برابر ۲۴۲۵ kg بدست آمد.



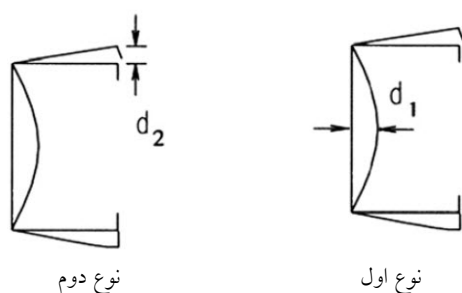
شکل ۱۲- منحنی ضریب بار-نصف طول موج

همچنین طبق خصوصیات ماده و شکل مقطع نرم افزار یک ظرفیت فشاری (P) تعیین می‌کند. در نهایت با دادن سه ضریب کماتش و مقدار P در یک فایل Excel ظرفیت فشاری مقطع محاسبه می‌گردد. همانطور که در مطالب فوق ذکر گردید روش دیگر محاسبه‌ی ظرفیت مقطع طبق آیین‌نامه‌ی AISI روش عرض موثر می‌باشد که محاسبه‌ی ظرفیت فشاری نبشی مورد نظر از این روش نیز محاسبه گردید. در جدول (۲) نتایج حاصل

تغییر شکل‌های اولیه استفاده شده است [۱۵]. همانطور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، بر اساس این روش هر تغییر شکل کلی به دو نوع اول و دوم تقسیم می‌شود. شرایط باید به گونه‌ای باشد که نسبت عرض به ضخامت در نوع اول کمتر از ۲۰۰ و در نوع دوم کمتر از ۱۰۰ باشد و ضخامت مقطع نیز نباید از ۳ mm تجاوز نماید.



شکل ۱۵- المان SHELL181 [۱۵]



شکل ۱۶- تغییر شکل‌های اولیه [۱۴]

مقادیر  $d_1$  و  $d_2$  از روابط (۵) و (۶) بدست می‌آید. در روابط ارائه شده  $t$  ضخامت و  $w$  عرض مقطع می‌باشد.

$$d_1 \approx \max\{0.006w \text{ \& } 6te^{-2t}\} \quad (5)$$

$$d_2 \approx t \quad (6)$$

با توجه به روش شیفر میزان تغییر شکل اولیه هندسی این مقطع از نوع دوم  $d_2$  محاسبه می‌شود که این مقدار برابر ۲ mm است.

با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی غلتکی و اعمال خصوصیات بدست آمده از آزمایش کشش فولاد سرد نورد شده، نبشی مورد نظر در نرم افزار انسیس مدل شده است. به دلیل اینکه حالت اول کمانش الاستیک بیشترین تاثیر را در تغییر شکل نهایی ستونچه دارد، حالت اول کمانش همان طور که در شکل (۱۷) قابل مشاهده می‌باشد، بدست آورده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۴- (الف) تکیه گاه غلتکی و نحوه‌ی قرارگیری نمونه، (ب) نحوه قرارگیری نمونه زیر دستگاه پرس دیجیتال

جدول ۳- ظرفیت فشاری بدست آمده از آزمایش (kg)

| انحراف معیار | میانگین | آزمایش ۱ | آزمایش ۲ | آزمایش ۳ | آزمایش ۴ |
|--------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| ۱۲۵/۸۳       | ۲۴۲۵    | ۲۴۰۰     | ۲۳۰۰     | ۲۶۰۰     | ۲۴۰۰     |

## ۵- تعیین ظرفیت فشاری ستونچه با استفاده از تحلیل عددی

به منظور ایجاد یک مدل مناسب و تحلیل غیرخطی نبشی فولادی سرد نورد شده در نرم افزار ANSYS [۱۶]، یک ستونچه تک با در نظر گرفتن خصوصیات فولاد مصرفی در نمونه‌ی آزمایشگاهی و تغییر شکل‌های اولیه مدل شد. با آنالیزهای متعدد انجام شده و مقایسه‌ی نتایج بدست آمده و همچنین زمان مناسب تحلیل توسط نرم افزار، مش‌بندی مناسب برای مقطع ستونچه ۱۰×۱۰ mm انتخاب گردید. در این مطالعه از المان SHELL181 استفاده شده است که برای تجزیه تحلیل ساختار پوسته‌هایی با ضخامت نازک تا متوسط مناسب می‌باشد. همان طور که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است این المان دارای ۴ گره و در هر گره ۶ درجه آزادی می‌باشد. این المان امکان در نظر گرفتن مشخصات ساختاری مثل تنش‌های پسماند، تغییر شکل‌های اولیه و مواد غیرخطی را می‌دهد.

تغییر شکل‌های اولیه به موج‌ها و قوس‌هایی می‌گویند که ممکن است پس از عملیات سرد نورد در مقطع عضو بوجود آید و هندسه‌ی مقطع را از حالت ایده‌آل خارج نماید و در مطالعات المان محدود باید این تغییر شکل‌ها در مقطع مورد نظر اعمال شود. در این پژوهش از روش شیفر برای محاسبه‌ی

مستقیم، عرض موثر، آزمایشگاهی و اجزا محدود محاسبه شده است. نتایج حاصل و اختلاف آنها با روش اجزا محدود در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول ۴- ظرفیت فشاری ستونچه از روش‌های مختلف و

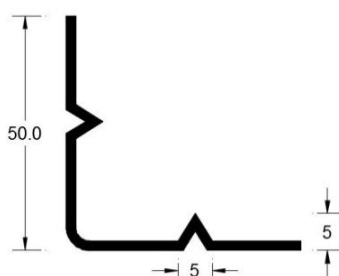
اختلاف آنها با روش عددی

| روش                | روش مقاومت مستقیم | روش عرض موثر | میانگین روش آزمایشگاهی | روش عددی |
|--------------------|-------------------|--------------|------------------------|----------|
| ظرفیت فشاری به kg  | ۲۱۰۲/۶۹           | ۲۰۱۳/۳۳      | ۲۴۲۵                   | ۲۴۹۷/۴۵  |
| اختلاف با روش عددی | ۱۵/۸٪             | ۲۴٪          | ۲/۹٪                   | -        |

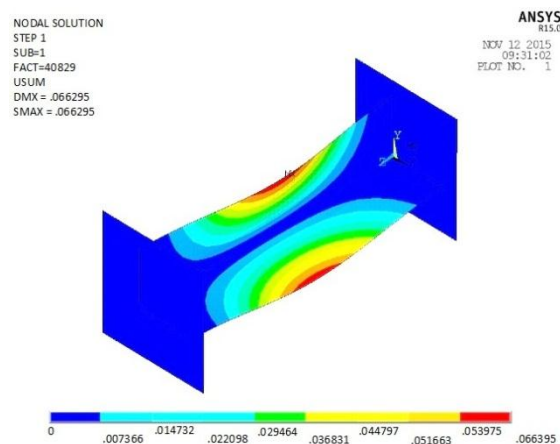
همان طور که در جدول ملاحظه می‌شود ظرفیت بدست آمده از روش عددی مطابقت خوبی با میانگین ظرفیت بدست آمده از روش آزمایشگاهی دارد. این در حالی است که اختلاف بین روش‌های آیین‌نامه‌ای و روش المان محدود بیشتر می‌باشد و بیان‌گر آن است که روش‌های آیین‌نامه‌ای برای بدست آوردن ظرفیت مقاطع نبشی شکل به صورت میانگین ۲۰٪ محافظه کارانه می‌باشند. از این رو بهتر است مطالعات بیشتری روی این دو روش آیین‌نامه‌ای صورت پذیرد.

#### ۷- تاثیر سخت کننده در ظرفیت فشاری مقطع

در این قسمت برای بدست آوردن ظرفیت بیشتر برای مقطع، از سخت کننده و لبه استفاده شده است. در ابتدا نبشی دارای یک سخت کننده با طول ۵ mm (L5) و عمق ۲ mm (D2) که آن را با A-L5-D2 نشان می‌دهیم، در هر بالای نبشی ۵۰×۵۰×۲ mm (شکل ۱۹)) بکار برده شد و با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی میزان ظرفیت آن محاسبه گردید. شکل (۲۰) توزیع تنش در این مقطع را نشان می‌دهد.

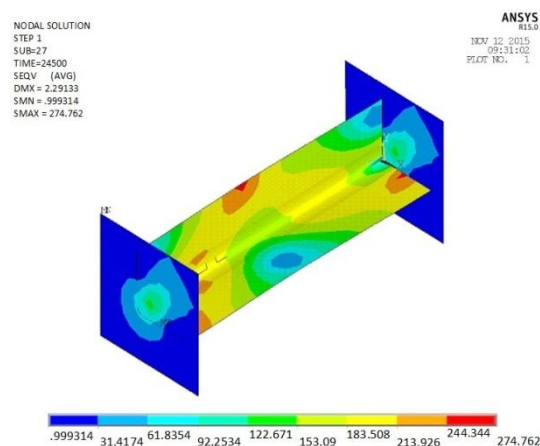


شکل ۱۹- نبشی دارای یک سخت کننده



شکل ۱۷- حالت اول کمانش برای ستونچه

برای اعمال تغییر شکل‌های اولیه، نیروهایی به گونه‌ای بر بال‌های نبشی وارد شد که طبق حالت اول کمانش میزان ۲ mm تغییر شکل اولیه محاسبه شده را شبیه سازی نماید. در نهایت با اعمال تغییر شکل‌های اولیه نبشی مورد نظر تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفت. طبق تحلیل صورت گرفته میزان ظرفیت فشاری مقطع kg ۲۴۹۷/۴۵ بدست آمده است (شکل ۱۸)). در تحلیل انجام شده اگر تغییر شکل‌های اولیه در نظر گرفته نشود ظرفیت مقطع به میزان kg ۳۱۵۹/۰۲ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸- توزیع تنش در ستونچه‌ی مورد نظر تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

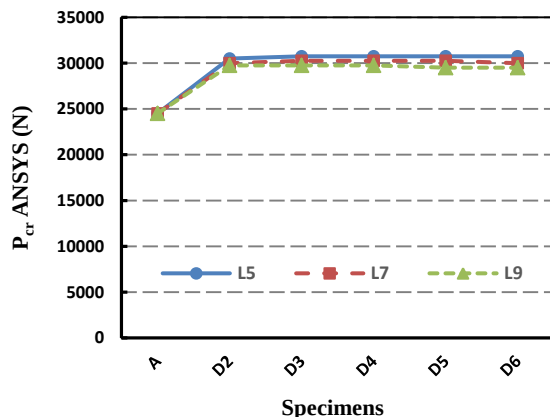
#### ۶- مقایسه‌ی ظرفیت‌های فشاری ستونچه‌ی CFS بدست

آمده از روش‌های مختلف

همان طور که در قسمت‌های قبلی ذکر شده است ظرفیت فشاری ستونچه‌ی فولادی سرد نورد شده با چهار روش مقاومت

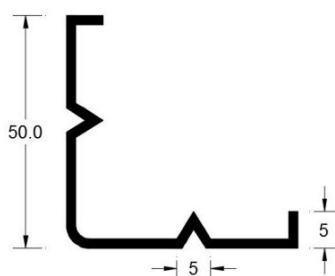


عضو می‌باشد. همچنین با افزایش طول سخت کننده از ۵ mm به ۷ mm و ۹ mm ظرفیت بخاطر کمتر شدن سطحی از مقطع که به تنش تسلیم می‌رسد، به میزان ناچیزی کاهش می‌یابد. نمودار شکل (۲۲) ظرفیت مقطع با وجود یک سخت کننده در هر بال با عمق و طول‌های مختلف را نشان می‌دهد.

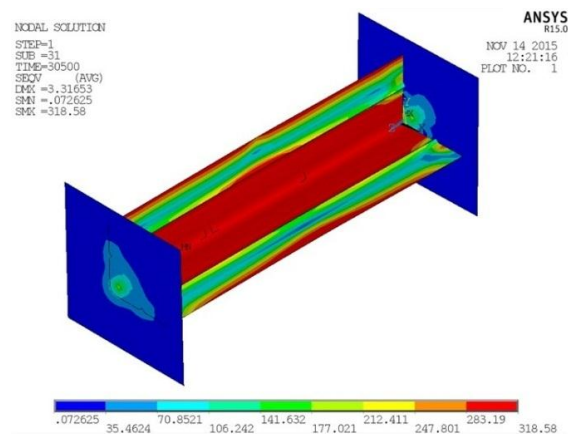


شکل ۲۲- نمودار مقایسه‌ی نبشی ۵۰×۵۰×۲ mm دارای یک سخت کننده با طول و عمق‌های مختلف

در ادامه به منظور بررسی تاثیر سخت کننده بیشتر و همچنین وجود لبه در بال‌های نبشی آنالیزهای بیشتری صورت گرفت. با فرض ثابت بودن طول و عمق سخت کننده به میزان ۵ mm به ترتیب ظرفیت مقطع در حالت‌های یک سخت کننده و یک لبه (B) مطابق شکل (۲۳)، دو سخت کننده (C) مطابق شکل (۲۴)، و دو سخت کننده و یک لبه (D) مطابق شکل (۲۵) محاسبه گردید و در نمودار شکل (۲۶) قابل مشاهده است. همچنین در شکل‌های (۲۷) و (۲۸) توزیع تنش در مقاطع C و D و روش نامگذاری مقاطع در جدول (۵) نشان داده شده است. بنابر نتایج حاصل مشاهده می‌شود اضافه نمودن سخت کننده و لبه در مقطع نبشی می‌تواند به میزان قابل توجهی ظرفیت را افزایش دهد و بیشترین ظرفیت فشاری در حالت نبشی دارای دو سخت کننده و یک لبه حاصل گردیده است.

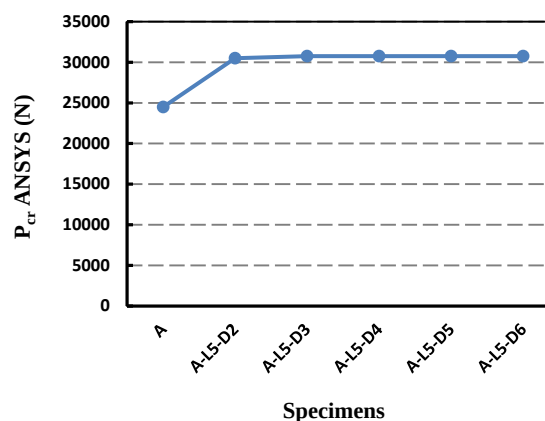


شکل ۲۳- نبشی دارای سخت کننده و لبه



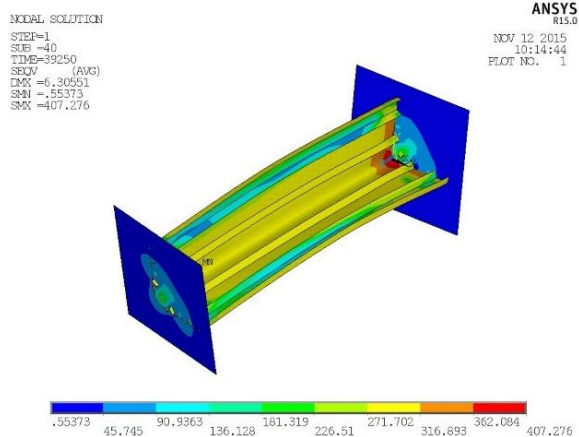
شکل ۲۰- توزیع تنش در نبشی ۵۰×۵۰×۲ mm دارای یک سخت کننده با طول ۵ mm و عمق ۲ mm

با اضافه شدن این سخت کننده ظرفیت مقطع نبشی از میزان ۲۴۵۰۰ N به مقدار ۳۰۵۰۰ N ارتقا پیدا نمود. با مقایسه شکل‌های ۱۸ و ۲۰ ملاحظه می‌شود وجود سخت کننده باعث شده است حالت شکست از شکست بخاطر تغییر شکل پلاستیک مقطع به شکست بخاطر رسیدن مقطع به تنش تسلیم تغییر یابد و ظرفیت به میزان ۲۴٪ افزایش پیدا کند. در ادامه پس از اعمال تغییرات در عمق سخت کننده‌ها ظرفیت مقاطع محاسبه گردید و در نمودار شکل (۲۱) نتایج حاصل قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۱- مقایسه‌ی ظرفیت فشاری نبشی ۵۰×۵۰×۲ mm دارای سخت کننده با طول ۵ mm و عمق ۲ mm تا ۶ mm

با بررسی این نمودار و همچنین شکل‌های ۱۸ و ۲۰ مشاهده می‌شود که وجود سخت کننده باعث تغییر حالت شکست و افزایش ظرفیت می‌شود ولی افزایش عمق آن باعث بوجود آمدن حالت جدید در شکست نمی‌شود؛ از این رو تاثیر ناچیزی در ظرفیت نهایی دارد و تغییرات ناچیز بخاطر تغییر در سطح مقطع



شکل ۲۸- توزیع تنش در نبشی D

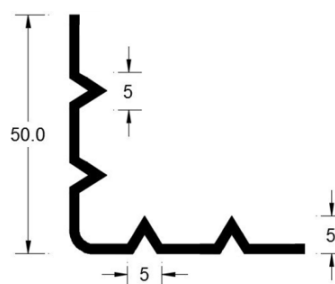
جدول ۵- نامگذاری نبشی‌ها در حالت های مختلف

| نامگذاری نبشی | نوع نبشی                      |
|---------------|-------------------------------|
| Angle         | نبشی ساده                     |
| A             | نبشی با یک سخت کننده          |
| B             | نبشی با یک سخت کننده و یک لبه |
| C             | نبشی با دو سخت کننده          |
| D             | نبشی با دو سخت کننده و یک لبه |

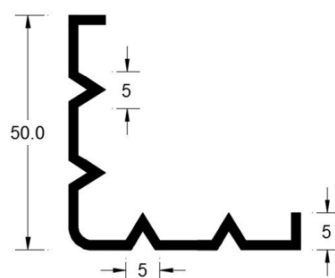
با توجه به نمودار شکل (۲۶) مشاهده می‌شود که ظرفیت فشاری نبشی دارای دو سخت کننده شبیه نبشی دارای یک سخت کننده و لبه می‌باشد و نشان می‌دهد که وجود لبه در بال‌های نبشی به اندازگی وجود سخت کننده تاثیرگذار در ظرفیت فشاری در مقاطع نبشی شکل فولادی سرد نورد شده می‌باشد. خاطرنشان می‌سازد این نتیجه، فقط بر اساس مطالعات انجام شده در این تحقیق می‌باشد؛ و به منظور امکان انجام نتیجه گیری‌های جامع‌تر، نیاز به انجام مطالعات بر روی مقاطع مختلف و با تعداد بالاتر می‌باشد.

## ۵- نتیجه گیری

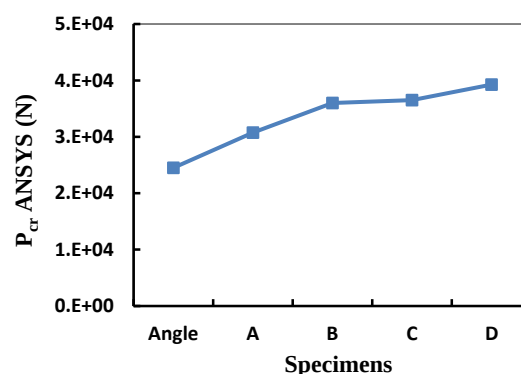
در این مطالعه ظرفیت فشاری یک ستونچه نبشی شکل با طول ۲۵۰ mm به کمک نرم افزار ANSYS بدست آمد و با نتایج بدست آمده از روش‌های آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌ای مقایسه شد. این پژوهش نشان داد که ظرفیت فشاری حاصل از آزمایش با نتیجه‌ی روش المان محدود همخوانی خوبی دارند و میزان اختلاف آنها ۳٪ می‌باشد. مقایسه‌ی ظرفیت فشاری بدست آمده از تحلیل و آزمایش یک ستونچه‌ی فولادی سرد نورد شده با نتایج حاصل از روش مقاومت مستقیم و عرض موثر نشان می‌دهد که روش‌های آیین‌نامه‌ای حدوداً به میزان ۱۶٪ و ۲۴٪



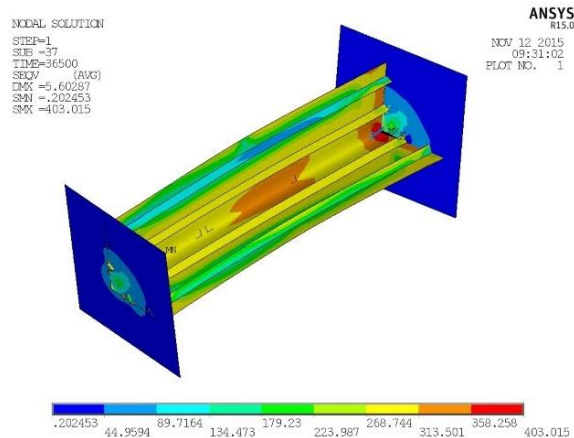
شکل ۲۴- نبشی دارای دو سخت کننده



شکل ۲۵- نبشی دارای دو سخت کننده و یک لبه



شکل ۲۶- نمودار مقایسه‌ی ظرفیت فشاری نبشی ساده (Angle) با حالت‌های A, B, C و D



شکل ۲۷- توزیع تنش در نبشی C



- [5] Young, B. and Chen, J. (2008), "Column Tests of Cold-Formed Steel Non-Symmetric Lipped Angle Sections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, pp. 808–815.
- [6] Young, B. and Ellobody, E. (2007), "Design of Cold-Formed Steel Unequal Angle Compression Members", *Thin-walled structures*, Vol. 45, pp. 330–338.
- [7] Chodraui, G., Shifferaw, Y., Malite, M. and Schafer, B. (2006), "Cold-Formed Steel Angles under Axial Compression", In *Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*, pp. 285–300.
- [8] Mesacasa, E., Dinis, P. B., Camotim, D. and Malite, M. (2014), "Mode Interaction in Thin-Walled Equal-Leg Angle Columns", *Thin-Walled Structures*, Vol. 81, pp. 138–149.
- [9] Maia, W.F., Vieira, L.C.M., Schafer, B.W. and Malite, M. (2016), "Experimental and Numerical Investigation of Cold-Formed Steel Double Angle Members under Compression", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 121, pp. 398–412.
- [10] Yu, W.-W. and LaBoube, R.A. (2010), "Cold-Formed Steel Design", John Wiley & Sons.
- [11] Schafer, B.W., Ádány, S. (2005), "Understanding and Classifying Local, Distortional and Global Buckling in Open Thin-Walled Members", *Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Stability Conference*, Montreal, Quebec, Canada, pp. 27–46.
- [12] Hancock, G.J. (1998), "Design of Cold-Formed Steel Structures: To Australian/New Zealand Standard AS/NZS 4600: 1996", Australian Institute of Steel Construction.
- [13] Yu, C. and Schafer, B.W. (2003), "Local Buckling Tests on Cold-Formed Steel Beams", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, pp. 1596–1606.
- [14] ASTM A370-05, (2005), *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] Schafer, B. and Peköz, T. (1998), "Computational Modeling of Cold-Formed Steel: Characterizing Geometric Imperfections and Residual Stresses", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 47, pp. 193–210.
- [16] ANSYS, (2015), *ANSYS 15 User's manual*, ed.

محافظه کارانه می‌باشند. وجود یک سخت کننده در بال‌های نبشی فولادی سرد نورد شده باعث شده است حالت شکست از شکست بخاطر تغییر شکل پلاستیک مقطع به شکست بخاطر رسیدن مقطع به تنش تسلیم تغییر یابد و ظرفیت به میزان ۲۴٪ افزایش پیدا کند. در بین حالت‌های بررسی شده بیشترین ظرفیت فشاری مربوط به نبشی دارای دو سخت کننده و یک لبه در هر بال می‌باشد. در پایان، ذکر این نکته ضروری است که اگرچه مطالعات انجام شده در این پژوهش، برداشتها و ایده های خوبی در زمینه ظرفیت فشاری مقاطع نبشی فولادی سرد نورد شده ارائه می نماید؛ اما انجام نتیجه گیری‌های کامل‌تر و جامع‌تر مستلزم بررسی و انجام آزمایش‌های متعدد و متنوع دیگری است که می‌بایست انجام پذیرند.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از شرکت برق منطقه ای اصفهان بدلیل حمایت از انجام این تحقیق و در اختیار قرار دادن برخی از اطلاعات مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی را می نمایند.

### ۶- مراجع

- [1] AISI Lateral Standard, (2004), *AISI Standard for Cold-Formed Steel Framing; (Lateral Design 2004 Edition)*, American Iron and Steel Institute, Washington, DC, USA.
- [2] AS/NZS4600, (2005), *Cold-formed steel structures*, Australian Building Codes Board.
- [3] Ganesan, K. and Moen, C.D. (2012), "LRFD Resistance Factor for Cold-Formed Steel Compression Members", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 72, pp. 261–266.
- [4] Dhanalakshmi, M. and Shanmugam, N. (2001), "Design for Openings in Equal-Angle Cold-Formed Steel Stub Columns", *Thin-walled structures*, Vol. 39, pp. 167–187.

### پی نوشت

- <sup>1</sup> Light Weight Steel Frame
- <sup>2</sup> Cold Formed Steel
- <sup>3</sup> American Iron and Steel Institute
- <sup>4</sup> Effective width method
- <sup>5</sup> Direct Strength Method
- <sup>6</sup> Cornell University Finite Strip Method
- <sup>7</sup> Computer Numerical Control Cutting Machine

