

ظرفیت برشگیرهای نبشی

مرضیه خلیلیان^۱، شروین ملکی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲. استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

smaleki@sharif.edu

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۹/۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۰/۲۴]

چکیده - دانش کنونی مهندسی در ارتباط با رفتار و ظرفیت برشگیرها بیشتر به اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های برون رانی و آزمایش تیر مختلط محدود می‌شود. با در نظر گرفتن این موضوع که آزمایش‌های عملی وقت‌گیر و هزینه‌بر است، تهیه‌ی مدلی کامپیوتری که بتواند رفتار و ظرفیت برشگیر را پیش‌بینی کند لازم و ضروری است. با توجه به این که تاکنون رفتار برشگیر نبشی مدفون شده در بتن به شکل جدی مورد بررسی قرار نگرفته است، در این مقاله یک مدل کامپیوتری به منظور تعیین ظرفیت برشی برشگیر نبشی تحت بارهای مونوتونیک ارایه شده است. برای این منظور، چند آزمایش برون رانی برشی در مورد برشگیر نبشی در نرم‌افزار آباکوس شبیه سازی شد. نتایج به دست آمده از مدل عناصر محدود با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که مدل با تقریب خوبی می‌تواند نتایج آزمایش برون رانی نبشی را پیش‌بینی کند. با استفاده از مدل به دست آمده، یک مطالعه پارامتری بر روی برشگیر نبشی انجام گرفت. در این مطالعه اثر پارامترهایی مانند مقاومت بتن، ارتفاع، ضخامت، عرض بال و طول برشگیر بر رفتار و ظرفیت برشگیر نبشی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به منظور کارایی بهتر برشگیر نبشی، رابطه‌ای برای محدود کردن طول برشگیر نبشی پیشنهاد شد. در پایان با استفاده از نتایج مطالعه پارامتری انجام شده و آزمایش‌های عملی موجود، رابطه‌ای برای پیش‌بینی ظرفیت برشگیر نبشی ارایه شده است.

واژگان کلیدی: برشگیر، نبشی، تیر مختلط، روش عناصر محدود.

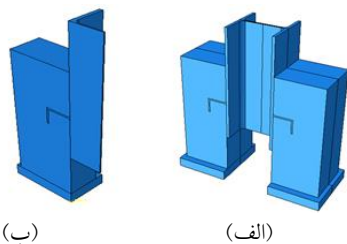
۱ - مقدمه

موارد معدودی تیر مختلط^۱ می‌شود. با در نظر گرفتن این موضوع که آزمایش‌های عملی وقت‌گیر و هزینه‌بر است، تهیه‌ی مدلی کامپیوتری که بتواند رفتار و ظرفیت برشگیر را پیش‌بینی کند لازم و ضروری است. تاکنون بیشتر مطالعات انجام گرفته روی برشگیرهای گلمیخ و ناودانی است [۱-۷]. در سال ۱۹۸۷ یک مطالعه تجربی به وسیله‌ی یوکوتا و همکاران [۸] روی انواع برشگیر از جمله نبشی شکل گرفت. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها یک رابطه بر اساس ضخامت و طول برشگیر و مقاومت بتن برای

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های مختلط بتن و فولاد در پل‌سازی و صنعت رو به افزایش است. برای این که بتن و فولاد به صورت یکپارچه با هم کار کنند، باید اتصال برشی بین آنها برقرار شود. برای برقراری این اتصال از برشگیرهای مکانیکی استفاده می‌شود.

دانش کنونی مهندسی در مورد رفتار و ظرفیت برشگیرها به اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های عملی محدود می‌شود. این آزمایش‌ها بیشتر شامل آزمایش برون رانی^۱ و در

محدود، باید تمام اجزای اتصال برشی به درستی مدل شوند. این مدل دارای چهار بخش بلوک بتنی، تیر فولادی، برشگیر و تکیه‌گاه صلب است. در شکل ۱(الف) کل نمونه در آزمایش برون رانی نشان داده شده است. با توجه به تقارن نمونه تنها یک چهارم نمونه مطابق شکل ۱(ب) مدل می‌شود.



شکل ۱. نمایی از نمونه آزمایش برون رانی. شکل ۱(الف): نمایی از کل نمونه آزمایش برون رانی. شکل ۱(ب): یک چهارم نمونه آزمایش برون رانی.

در این مطالعه چسبندگی بین بتن و فولاد مدل نشده است. بر اساس پژوهشی که نگوین و همکاران [۳] انجام دادند لایه چسبنده روی سختی اولیه نمونه اثر می‌گذارد ولی روی ظرفیت نهایی و تغییر شکل بیشینه که در این مطالعه مورد نظر است اثر قابل توجهی نمی‌گذارد، در صورتی که زمان تحلیل را طولانی‌تر می‌کند. بنابر این در این پژوهش از مدل کردن چسبندگی بین بتن و فولاد چشم‌پوشی شده است.

۲-۲- مش بندی

برای مش بندی نمونه از المان‌های C3D8R استفاده شده است. این نوع المان یک المان سه بعدی شش وجهی خطی با ۸ گره و با سختی کاهش یافته است. در مواردی که بر اثر پیچیدگی تنش‌ها، ممکن است مشکل قفل شدگی برشی برای المان‌های C3D8 اتفاق بیفتد از این المان استفاده می‌شود. برای تحلیل‌های غیر خطی سه بعدی شامل مسائل تماسی، تغییر شکل‌های بزرگ و مسائل شکست کاربرد دارد. برای مش بندی جسم صلب، از المان‌های ویژه جسم صلب R3D4 استفاده شده است. به منظور کاهش زمان تحلیل از مش‌های درشت برای مش بندی کلی و برای رسیدن به جواب‌های دقیق از مش ریز در قسمت تماس برشگیر و بتن که تمرکز تنش وجود دارد و شکست از آن قسمت اتفاق

پیش‌بینی مقاومت برشگیرها ارایه شد.

در سال ۲۰۱۱، مطالعاتی به وسیله سوتی و همکاران [۹] روی رفتار برشگیر نبشی انجام گرفت. سوتی آزمایش تیر مختلفی را برای تعیین ظرفیت برشگیرها پیشنهاد کرد و با استفاده از آن مطالعاتی روی برشگیر نبشی انجام و رابطه‌ای برای پیش‌بینی نیروی برشی بیشینه برشگیر نبشی ارایه داد که تابع عرض، ارتفاع، نسبت ضخامت به ارتفاع برشگیر و مقاومت بتن است. سوتی در سال ۲۰۱۳ [۱۵] مطالعات قبلی خود را کامل و رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی نیروی برشی بیشینه برشگیر نبشی را اصلاح کرد. در سال ۲۰۱۲، شریعتی و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای روی رفتار برشگیرهای نبشی تحت بارهای مونوتونیک و سیکلیک انجام دادند. همچنین شریعتی [۱۱] در سال ۲۰۱۳، مقایسه‌ای بین رفتار برشگیر ناودانی و نبشی انجام داد. نتایج نشان داد که برشگیر نبشی ظرفیت و شکل‌پذیری کمتری نسبت به برشگیر ناودانی دارد. لیکن این مطالعات محدود بوده و تمامی اندازه‌های نبشی و پارامترهای موثر دیگر را در بر نمی‌گیرد.

با توجه به این که تا پیش از این ساخت مدل عناصر محدود در مورد آزمایش برون رانی برشگیر نبشی مدفون در بتن ساده تحت بار استاتیکی انجام نشده است، در این مطالعه یک مدل سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس [۱۲] برای شبیه سازی آزمایش یاد شده در مورد برشگیر نبشی، شکل می‌گیرد. نتایج به دست آمده از مدل کامپیوتری با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه می‌شود. یک مطالعه پارامتری به منظور ارزیابی اثر پارامترهای مختلف روی رفتار و ظرفیت برشگیر انجام و در پایان با استفاده از نتایج مطالعه پارامتری رابطه‌ای برای پیش‌بینی ظرفیت برشگیر نبشی ارایه می‌شود.

۲- مدل سازی

برای مدل سازی آزمایش برون رانی برشی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت تحلیل‌های غیر خطی سه بعدی را با روش عناصر محدود دارد.

۲-۱- ساخت مدل هندسی

به منظور به دست آوردن جواب‌های دقیق از مدل عناصر

می‌افتد، استفاده شده است.

۲-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

در این مطالعه بار به صورت تغییر مکان به میزان ۱۰ میلی‌متر رو به پایین به سطح بالای تیر فولادی وارد می‌شود. بار به صورت خطی از صفر تا مقدار بیشینه بیشتر در طول ۲۰ ثانیه افزایش می‌یابد. به دلیل تقارن^۶ نمونه، شرایط مرزی تقارن در صفحه عمود بر محور Z اعمال شده است. که در اثر آن تغییر مکان در راستای محور Z و چرخش حول محورهای X و Y بسته شده است.

همچنین شرایط مرزی تقارن، در صفحه عمود بر محور X اعمال شده است. که در اثر آن تغییر مکان در راستای محور X و چرخش‌ها حول محورهای Z و Y بسته شده است. در مورد تکیه‌گاه صلب فرض شده است که در هیچ یک از نقاط آن حرکتی وجود ندارد، بنابراین این تمام درجات آزادی نقطه مرجع^۷ آن بسته شده است.

۲-۵- تعیین نوع تحلیل

در این مطالعه یک تحلیل غیرخطی استاتیکی مورد نظر است و تنها یک Step تعریف شده است که از نوع Static General است و آثار غیر خطی هندسه که مربوط به تغییر شکل‌های بزرگ است، در نظر گرفته شده است. در این تحلیل بارگذاری به صورت استاتیکی صورت گرفته است. بار به صورت تغییر مکان ۱۰mm در بازه زمانی ۲۰ ثانیه اعمال می‌شود. بنابراین این بازه زمانی Step تعریف شده ۲۰ ثانیه است. بار در این ۲۰ ثانیه به صورت خطی افزایش می‌یابد تا به میزان بیشینه خود برسد.

۲-۶- تعریف مواد

۲-۶-۱- تعریف ویژگی‌های مکانیکی فولاد

رابطه تنش- کرنش فولاد مشابه کار ملکی و همکاران [۱] به وسیله‌ی منحنی دو خطی نشان داده شده در شکل ۲ مدل شده است. رفتار فولاد در کشش و فشار مشابه فرض شده است. در این پژوهش مدول الاستیسیته فولاد ۲۰۸GPa، نسبت پویسان و چگالی آن ۰٫۳ و ۷۸۰۰ kg/m^3 است.

۲-۳- تماس

چگونگی برهم‌کنش اعضا بسیار مهم است و تاثیر زیادی در نتایج دارد. در تماس بین برشگیر و بتن در عمل، تنها نیروی فشاری بین برشگیر و بتن منتقل می‌شود و به محض ایجاد نیروی کششی دو سطح از یکدیگر جدا می‌شوند. بنابراین در مدلسازی باید از رفتار تماسی استفاده شود که بتواند این رفتار را مدل کند. در این مدل از تماس سطح به سطح^۱ بین بلوک بتنی و برشگیر استفاده شده است. تمام سطوح برشگیر که در تماس با بتن است با استفاده از این نوع تماس به سطوح بلوک بتنی ارتباط داده شده‌اند. مشخصات تماس به شکلی تعریف شده است که توانایی انتقال نیروی افقی و عمودی بین سطوح را دارد. تماس عمودی از نوع سخت^۲ تعریف شده است که این نوع تماس اجازه فرو رفتن سطوح در یکدیگر را نمی‌دهد. تماس افقی به صورت پینالتی^۳ با ضریب اصطکاک ۰/۲ و سطوح بلوک بتنی به عنوان سطح اصلی^۴ تعریف شده است.

در عمل برای کاهش آثار اصطکاک بین بتن و تیر فولادی سطح بال تیر فولادی که در تماس با بتن است را به روغن آغشته می‌کنند. بنابراین این سطح بین بتن و تیر فولادی از نوع بدون اصطکاک^۵ با تماس عمودی از نوع سخت است. سطح تیر فولادی به عنوان سطح اصلی تعریف شده است. برای جلوگیری از لغزش تیر فولادی و برشگیر، گره‌های سطح برشگیر در تماس با تیر فولادی به وسیله‌ی قید Tie کاملاً به تیر فولادی متصل شده‌اند که اتصال جوشی بین برشگیر و تیر را شبیه سازی می‌کند. تماس بین بلوک بتنی و تکیه‌گاه صلب مانند تماس برشگیر و بلوک بتنی است، با این تفاوت که ضریب اصطکاک آن مطابق کار نگوین و همکاران [۳] ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است.

1 surface to surface

2 hard contact

3 penalty

4 master

5 frictionless

6 symmetric

7 reference node

حالت دومحوره به مقاومت فشاری در حالت تک محوره،
(f_{b0}/f_{c0})، مطابق مقادیر پیش فرض به ترتیب برابر ۰/۶۶۶،
۰/۱ و ۱/۱۶ اختیار شده است.

۲-۶-۳- رفتار فشاری بتن

منحنی تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی تنش- کرنش بتن در حالت فشار به دو قسمت مجزا تقسیم می‌شود. بخش اول به صورت الاستیک خطی است. که از تنش صفر شروع می‌شود و تا حد تناسب ادامه دارد. تنش مربوط به حد تناسب مطابق EC2 [۱۳]، (f_{ck}) در نظر گرفته شده است.

قسمت دوم منحنی تنش-کرنش فشاری بتن، بخش غیرخطی سهموی است که از حد تناسب شروع می‌شود و تا مقاومت فشاری بتن (f_{ck}) در کرنش ϵ_{c1} به صورت صعودی بالا می‌رود و در ادامه به (σ_{cu}) کاهش می‌یابد. که رابطه بین تنش فشاری بتن با کرنش معادل آن به وسیله روابط (۲) تا (۴) داده شده در EC2 به دست می‌آید. کرنش ϵ_{c1} متناظر با تنش f_{ck} مطابق EC2 برابر ۰/۰۰۲۲ است.

$$\sigma_c = \left(\frac{kn-n^2}{1+(k-2)n} \right) f_{ck} \quad (2)$$

$$k = 1.1E_{cm} \times \frac{\epsilon_{c1}}{f_{ck}} \quad (3)$$

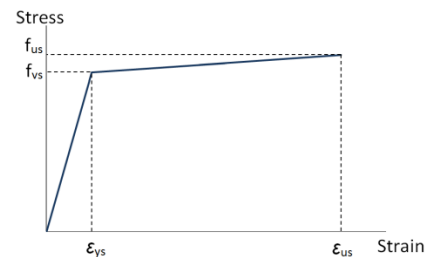
$$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad (4)$$

کرنش نهایی (ϵ_{cu}) بتن در شکست مطابق EC2 برابر ۰/۰۰۳۵ است.

۲-۶-۴- رفتار کششی بتن

در حالت کشش، فرض شده است که تنش کششی به صورت خطی تا رسیدن به نقطه تنش کششی حداکثر با افزایش کرنش افزایش یابد. پس از آن تا رسیدن به تنش صفر به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

در آباکوس در مورد تعریف رفتار کششی بتن، وقتی درصد آرماتور در بتن کم باشد یا اصلاً آرماتوری وجود نداشته باشد، استفاده از نمودار تنش-کرنش حساسیت شدیدی به مش بندی ایجاد می‌کند. بنابر در این مدل از معیار انرژی



شکل ۲ نمودار تنش-کرنش فولاد [۱].

۲-۶-۲- تعریف ویژگی‌های مکانیکی بتن

برای مدل کردن بتن از مدل خرابی پلاستیک بتن^۱ (CDP) موجود در آباکوس استفاده شده است. این مدل بر پایه دو سازوکار خرابی ترک کششی و خرد شدن بتن در فشار است و برای مدل کردن موادی که رفتار کششی و فشاری آنها متفاوت است، مناسب است.

۲-۶-۱- ویژگی‌های الاستیک بتن

مدول یانگ اولیه از رابطه داده شده در EC2 [۱۳]، رابطه (۱)، به دست آورده شده است. نسبت پویسان بتن برابر ۰/۲ و چگالی بتن معمولی برابر 2400 kg/m^3 در نظر گرفته شده است.

$$E_{cm} = 9.5(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (1)$$

که در آن E_{cm} بر حسب گیگا پاسکال و f_{ck} بر حسب مگا پاسکال است.

f_{ck} مقاومت فشاری استوانه بتنی و f_{cu} مقاومت فشاری نمونه مکعبی شکل ($f_{ck} \approx 0.8f_{cu}$) است.

۲-۲-۶-۲- پارامترهای پلاستیک بتن

در این مطالعه زاویه اتساع^۲ مشابه کار قرشی^۳ و همکاران [۱۴] برابر 40° اختیار شده است. زاویه اتساع، کرنش پلاستیک بر اثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می‌نمایند. پارامترهای k (ضرب محصورشدگی)، eccentricity (خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک) و نسبت مقاومت فشاری در

1 concrete damaged plasticity model (CDP)

2 dilation angle

3 Qureshi

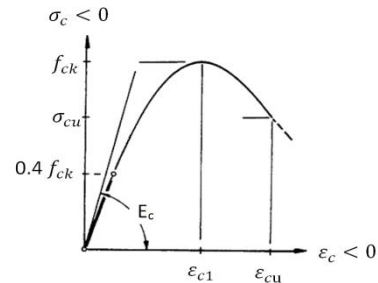
کند. میانگین P_{FEM}/P_{test} برابر ۰,۹۷۹ و ضریب تغییرات^۱ آن ۰,۱۱۳ می‌باشد.

چگونگی توزیع تنش‌های فون مایسز که از تحلیل عناصر محدود در آباکوس به دست آمده است در مورد یکی از نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود تنش‌های بیشینه در برشگیر نبشی در قسمت اتصال برشگیر به تیر فولادی اتفاق می‌افتد. در شکل ۹ و ۱۰ چگونگی توزیع تنش فون مایسز در برشگیر نشان داده شده است. با توجه به این که تنها یک چهارم نمونه آزمایش برون رانی مدل شده است، این شکل‌ها نمایانگر نصف برشگیر نبشی در یکی از بلوک‌های بتنی است. مشاهده می‌شود که در قسمت اتصال نبشی به تیر فولادی تنش‌های برشگیر در وسط برشگیر بیشتر از لبه‌های آن است. شکل ۱۰ برای نیمه سمت راست برشگیر رسم شده است. مشاهده می‌شود که تا فاصله مشخصی از مرکز برشگیر تنش در طول آن تقریباً ثابت، ولی در بیرون این فاصله هر چه به لبه‌های برشگیر نزدیک می‌شویم، تنش در طول برشگیر شروع به کاهش می‌کند. بنابر این برای کارایی بهتر برشگیر نبشی باید محدودیت طولی برای آن در نظر گرفته شود.

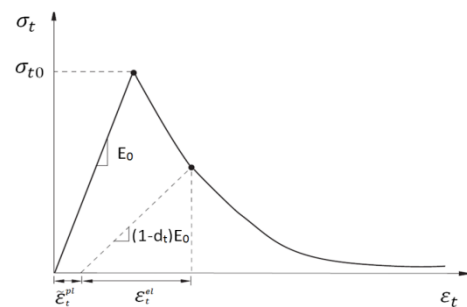
۴- مطالعه پارامتری

با استفاده از مدل پیشنهاد شده به مطالعه پارامتری روی برشگیر نبشی پرداخته می‌شود تا اثر پارامترهای گوناگون در رفتار و مقاومت نبشی بررسی شود. در این مطالعه اثر پارامترهای گوناگون مانند مقاومت فشاری بتن، ارتفاع، عرض بال، طول و ضخامت برشگیر به کار رفته مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این کار حدود ۲۶ نمونه آزمایش برون رانی مدل و نتایج حاصل از تحلیل مقایسه شده است. از بلوک بتنی با ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ابعاد مقطع ۱۵۰×۲۵۰/۲ میلی‌متر استفاده شده است. ابعاد نمونه‌های مدل شده و مقاومت بتن و فولاد و مقاومت و لغزش بیشینه برشگیر و مود شکست در جدول ۵ نمایش داده شده است. جدول مشخصات مکانیکی فولاد.

شکست استفاده شده است و رفتار بتن بر اساس رابطه تنش-جابجایی تعریف شده است که وابستگی آن را به مش بندی کم می‌کند.



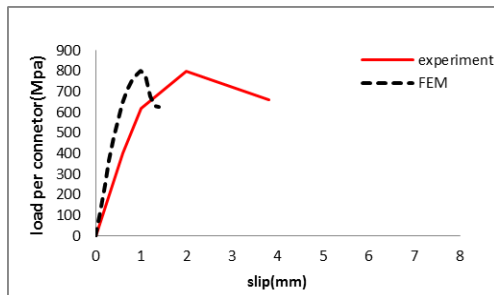
شکل ۳ منحنی تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن [۱۳].



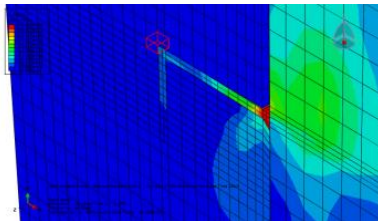
شکل ۴ نمودار تنش-کرنش رفتار کششی بتن [۱۲].

۳- مقایسه نتایج مدل کامپیوتری و آزمایش‌های عملی

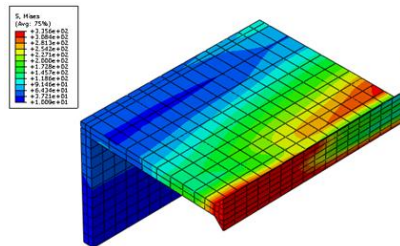
به منظور مقایسه نتایج مدل کامپیوتری از نتایج آزمایش‌های یوکوتا [۸] استفاده شده است. ۲۰ نمونه برای مقایسه بین آزمایش عملی و مدل کامپیوتری انتخاب شده است. بلوک بتنی دارای ابعاد ۲۵۰×۲۵۰×۶۰۰ میلی‌متر و تیر فولادی یک تیر H شکل با ابعاد ۲۵۰×۲۵۰×۹×۱۴ میلی‌متر است. ابعاد مقطع برشگیرها در جدول ۲ گفته شده است و طول همه برشگیرها ۲۵۰ میلی‌متر است. مقاومت فشاری بتن هر نمونه هم در جدول ۲ گفته شده است. ویژگی‌های مکانیکی فولاد در جداول ۱ و ۳ خلاصه شده است. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نتایج آزمایش عملی با مدل عناصر محدود مقایسه شده است. نتایج سایر نمونه‌های مدل کامپیوتری برای مقایسه با نتایج آزمایش‌های عملی در جدول ۴ آورده شده. مشاهده می‌شود که مدل عناصر محدود با تقریب خوبی می‌تواند بیشترین بار برشگیر را پیش‌بینی



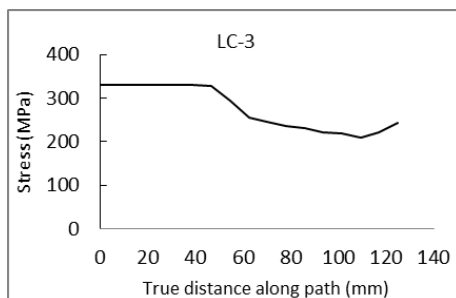
شکل ۷ نمودار بار- لغزش در مورد نمونه آزمایش LC-2



شکل ۸ نمایی از توزیع تنش‌ها در نمونه LC-2 در مدل تحلیل شده.



شکل ۹ چگونگی توزیع تنش فون مایسز در برشگیر نبشی.



شکل ۱۰ نمودار تنش (MPa) در امتداد طول (mm) برای نیمه سمت راست طول نبشی در نمونه LC-3.

۴-۱- بررسی اثر مقاومت فشاری بتن

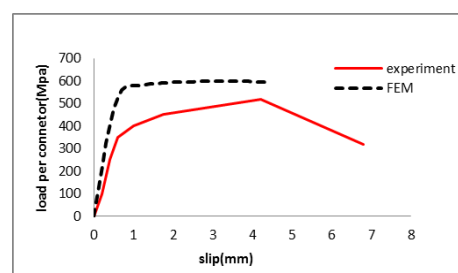
برای بررسی اثر مقاومت بتن از ۴ نمونه LE-1 تا LE-4 با بتن با مقاومت‌های ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ مگا پاسگال استفاده شده است.

در شکل ۱۱ منحنی‌های بار-جابجایی برای بتن با مقاومت‌های مختلف برای مقایسه روی یک نمودار رسم شده است. از روی شکل مشاهده می‌شود نمودارهای نمونه-

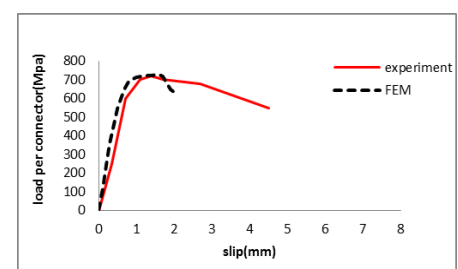
E_s (GPa)	ν	ρ (kgf/m ³)
۲۰۸	۰/۳	۷۸۰۰

جدول ۲ ویژگی‌های هندسه و مقاومت بتن نمونه آزمایش عملی

ردیف	نام نمونه	ابعاد (میلی متر)	مقاومت بتن (kgf/cm ²)
۱	LA-1	L40x40x3	۳۵۰
۲	LA-2	L40x40x5	۳۵۰
۳	LA-4	L40x40x5	۴۵۰
۴	LA-5	L50x50x4	۳۵۰
۵	LA-6	L50x50x4	۲۵۰
۶	LA-7	L50x50x4	۴۵۰
۷	LA-8	L50x50x6	۳۵۰
۸	LA-9	L50x50x6	۲۵۰
۹	LA-10	L50x50x6	۴۵۰
۱۰	LA-12	L65x65x6	۳۵۰
۱۱	LA-13	L75x75x6	۳۵۰
۱۲	LA-14	L75x75x9	۳۵۰
۱۳	LC-1	L90x75x9	۳۵۰
۱۴	LC-2	L100x75x7	۳۵۰
۱۵	LC-3	L100x75x10	۳۵۰
۱۶	LC-4	L125x75x7	۳۵۰
۱۷	LC-5	L125x75x10	۳۵۰
۱۸	LD-1	L90x75x9	۳۵۰
۱۹	LD-2	L100x75x7	۳۵۰
۲۰	LD-3	L100x75x10	۳۵۰



شکل ۵ نمودار بار- لغزش در مورد نمونه آزمایش LA-5.



شکل ۶ نمودار بار- لغزش در مورد نمونه آزمایش LD-2.

در این بررسی از نبشی‌های LE-6 تا LE-8 استفاده شده است. همان گونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، اندازه بال برشگیر تأثیری در مقاومت و رفتار برشگیر نمی‌گذارد.

هایی که در آن‌ها مقاومت بتن کمتر است، در زیر نمودارهایی که بتن مقاومت بیشتری دارد قرار می‌گیرند. بنابراین با افزایش مقاومت بتن ظرفیت برشگیر افزایش می‌یابد.

جدول ۳ خصوصیات مکانیکی فولاد به کار رفته.

ابعاد (میلیمتر)	تنش تسلیم (kgf/mm ²)	تنش نهایی (kgf/mm ²)	افزایش طول (%)
L40x40x3	۳۳	۴۸	۳۹
L40x40x5	۳۴	۵۰	۳۸
L50x50x4	۳۷	۵۲	۳۳
L50x50x6	۳۴	۴۶	۲۴
L65x65x6	۳۳	۴۵	۲۸
L75x75x6	۳۵	۴۹	۲۸
L75x75x9	۳۱	۴۷	۳۰
L90x75x9	۳۳	۴۵	۳۱
L100x75x7	۳۳	۴۸	۲۹
L100x75x10	۳۳	۴۸	۲۹
L125x75x7	۳۱	۴۳	۳۰
L125x75x10	۳۳	۴۶	۲۷

۴-۳- بررسی اثر ارتفاع برشگیر

در این بررسی از برشگیر با ضخامت ۴ و عرض بال ۴۰ میلی‌متر با ارتفاع‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلی‌متر (برشگیرهای LE-3، LE-9 تا LE-12) استفاده شده است. مشاهدات نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع برشگیر از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ میلی‌متر ظرفیت نبشی کمی افزوده می‌شود. این افزایش ظرفیت در ارتفاع‌های بزرگتر دیده نمی‌شود. بنابراین این وقتی ارتفاع برشگیر نبشی تا حدی افزایش می‌یابد دیگر با اضافه شدن ارتفاع، مقاومت برشی نبشی تغییر نمی‌کند. همچنین ارتفاع برشگیر تأثیر چندانی بر لغزش بیشینه و رفتار بار جابه‌جایی برشگیر نمی‌گذارد. نمودار بار-جابه‌جایی برای برشگیر با ارتفاع‌های مختلف در شکل ۱۳ رسم شده است.

۴-۲- بررسی اثر عرض بال برشگیر

جدول ۴ مقایسه نتایج آزمایش عملی و تحلیل عناصر محدود.

Specimen	Test results			FEM results			P _{FEM} /P _{test}	Error (%)
	P _{test} (kN) (Load for two connectors)	Max slip at fail (mm)	Mode of failure	P _{FEM} (kN) (Load for two connectors)	Max slip at fail (mm)	Mode of failure		
LA-1	۴۶۰	۲/۸	SF	۵۲۰	۲/۳	CC	۱/۱۳	-۱۳/۰۴
LA-2	۵۴۰	۲/۱	SF	۵۴۱/۷	۲/۴	CC	۱/۰۰	-۳۱,۰
LA-4	۷۰۰	۱/۵	SF	۵۷۶	۰/۸	CC	۰/۸۲	۱۷/۷۱
LA-5	۵۲۰	۴/۲	SF	۶۰۰	۳/۳	CC	۱/۱۵	-۱۵/۳۸
LA-6	۵۲۰	۳/۲	SF	۵۰۰/۲	۳/۱	CC	۰/۹۶	۳/۸۱
LA-7	۶۳۰	۱/۵	TF	۶۵۴	۰/۹	SF	۱/۰۴	-۳/۸۱
LA-8	۶۲۰	۱/۶	SF	۶۰۵	۳/۴	SF	۰/۹۸	۲/۴۲
LA-9	۵۰۰	۱/۶	SF	۵۰۳/۶	۳/۱	SF	۱/۰۱	-۰/۷۲
LA-10	۹۲۰	۱/۸	SF	۶۶۶/۵	۰/۸	CC	۰/۷۲	۲۷/۵۵
LA-12	۶۷۰	۱/۲	SF	۷۰۳	۵/۵	SF	۱/۰۵	-۴/۹۳
LA-13	۶۰۰	۱/۹	SF	۷۱۶	۱	SF	۱/۱۹	-۱۹/۳۳
LA-14	۸۲۰	۱/۹	SF	۷۴۷	۲/۸	SF	۰/۹۱	۸/۹۰
LC-1	۸۴۰	۱/۴	SF	۷۹۱/۷	۱/۱	SF	۰/۹۴	۵/۷۵
LC-2	۸۰۰	۴	SF	۸۰۰/۶	۱	SF	۱/۰۰	-۰/۰۸
LC-3	۸۰۰	۱/۶	SF	۸۲۹	۱	SF	۱/۰۴	-۲/۶۳
LC-4	۸۵۰	۱/۲	SF	۸۰۳	۰/۹	SF	۰/۹۴	۵/۵۳
LC-5	۸۸۰	۱/۵	SF	۸۶۱	۱	SF	۰/۹۸	۲/۱۶
LD-1	۸۸۰	۱/۷	SF	۷۷۸/۵	۴	SF	۰/۸۸	۱۱/۵۳
LD-2	۷۲۰	۱/۴	SF	۷۲۷	۲	CC	۱/۰۱	-۰/۹۷
LD-3	۹۸۰	۱/۸	SF	۷۹۹	۳/۲	SF	۰/۸۲	۱۸/۴۷
Mean	-	-	-	-	-	-	۰/۹۷۹	-
CV	-	-	-	-	-	-	۰/۱۱۳	-

۴-۴- بررسی اثر ضخامت نبشی

آن کاهش می‌یابد و برشگیر رفتاری با صلبیت بیشتر را از خود نشان می‌دهد.

اثر ضخامت نبشی برای برشگیرهایی با ارتفاع ۸۰، عرض بال ۴۰، طول ۵۰ و ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر بررسی شده است. در نمودار شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت نبشی ظرفیت برشی آن افزایش در حالی که لغزش بیشینه آن کاهش می‌یابد و برشگیر رفتاری با صلبیت بیشتر را از خود نشان می‌دهد.

۴-۵- بررسی اثر طول نبشی**۴-۶- محاسبه طول موثر برای برشگیر نبشی**

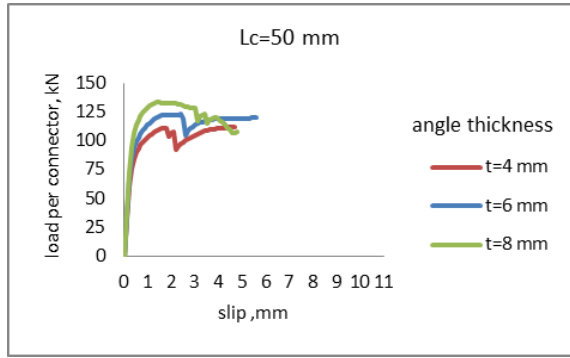
ابعاد و ویژگی‌های نمونه‌هایی که از آن‌ها برای به دست آوردن رابطه‌ای برای طول موثر استفاده شده است در جدول ۶ خلاصه شده است. اثر پارامترهای ارتفاع، ضخامت و مقاومت فولاد، در طول موثر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که از بین آن‌ها پارامترهای موثر، ضخامت نبشی و مقاومت فولاد بوده است. طول موثر از راه سعی و خطا برای برشگیرهای مختلف به دست آمده است.

برای به دست آوردن رابطه بین پارامترهای مختلف، یک تحلیل رگرسیون انجام و رابطه (۵) برای تعیین طول موثر پیشنهاد شده است.

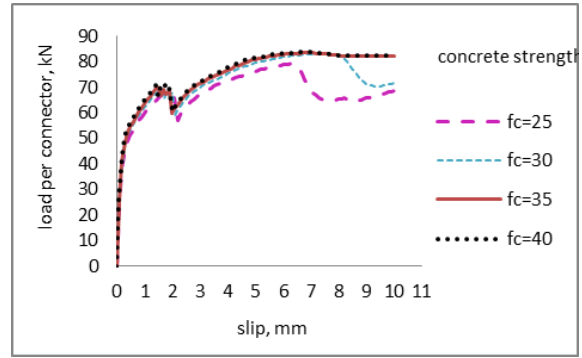
برای بررسی اثر طول نبشی بر رفتار آن، از برشگیر با ابعاد ۴×۴۰×۸۰ میلی‌متر با طول‌های ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. بررسی توزیع تنش در طول تمام این برشگیرها نشان داد که تنش در طول این برشگیرها تقریباً یکنواخت است. اثر طول برشگیر بر رفتار بار-جابجایی آن برای برشگیرهایی که توزیع تنش در طول آن یکنواخت است در شکل ۱۵ رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش طول مقاومت برشگیر افزایش و لغزش بیشینه

جدول ۵ ویژگی‌های مواد و ابعاد نمونه‌ها و نتایج به دست آمده از تحلیل در مطالعه پارامتری.

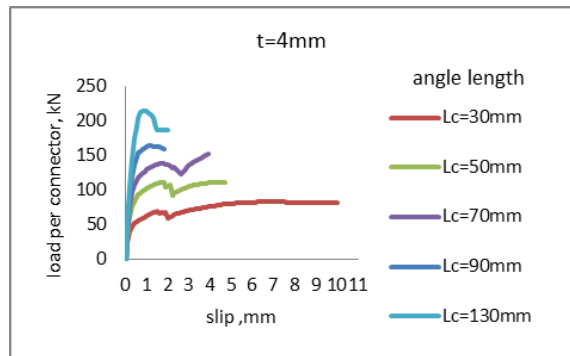
Specimen	Angle dimension (mm)	Length of connector (mm)	Concrete strength (MPa)	Steel strength		Steel beam section	Max slip (mm)	Connector capacity (kN)	Modes of failure
				F_y (MPa)	F_u (MPa)				
LE-1	80x40x4	۳۰	۲۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۶/۳	۷۹/۱۶	TF
LE-2	80x40x4	۳۰	۳۰	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۷/۲	۸۳/۰۴	TF
LE-3	80x40x4	۳۰	۳۲	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۶/۹	۸۳/۳۷	CC
LE-4	80x40x4	۳۰	۴۰	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۶/۹	۸۳/۶۴	CC
LE-6	60x40x6	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۸/۶	۹۱/۱۵	CC
LE-7	60x60x6	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۸/۸	۹۱/۵۴	CC
LE-8	60x80x6	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۹	۹۱/۹۵	CC
LE-9	40x40x4	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۶/۹	۸۴/۰۱	SF
LE-10	50x40x4	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۷/۳	۸۳/۱۱	CC
LE-11	60x40x4	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۶/۹	۸۳/۸۲	CC
LE-12	70x40x4	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۶/۹	۸۴/۰۷	CC
LE-14	80x40x4	۵۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۴/۶	۱۱۱/۸۲	CC
LE-15	80x40x6	۵۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۴/۳	۱۱۹/۴۲	CC
LE-16	80x40x8	۵۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۱/۴	۱۳۳/۶۰	CC
LE-17	80x40x4	۷۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۳/۹	۱۵۱/۷۹	CC
LE-18	80x40x6	۷۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۱/۴	۱۵۰/۸۴	CC
LE-19	80x40x8	۷۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۱/۳	۱۶۴/۰۹	CC
LE-20	80x40x4	۱۳	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۰/۸	۲۱۴/۶۸	CC
LE-21	80x40x6	۱۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۰/۸	۲۳۲/۸۹	CC
LE-22	80x40x8	۱۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۰/۸	۲۴۱/۵۶	CC
LE-23	80x40x4	۹۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۱/۱	۱۶۳/۵۷	CC
LE-24	80x40x6	۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	IPE270	۷/۲	۹۷/۵۴	TF



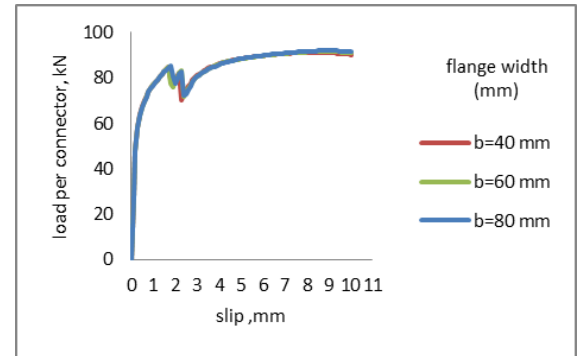
شکل ۱۴ تاثیر ضخامت برشگیر نبشی بر رفتار بار- جابه جایی برای نبشی با طول ۵۰ میلی متر.



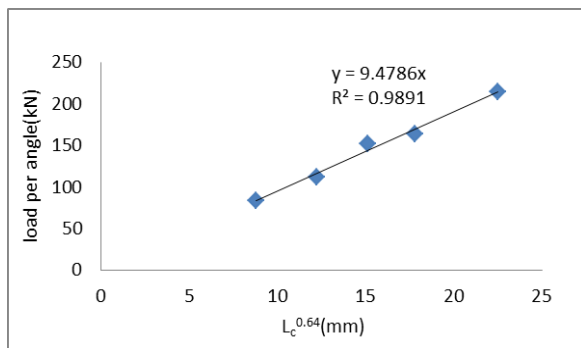
شکل ۱۱ تاثیر مقاومت بتن بر رفتار بار- جابه جایی.



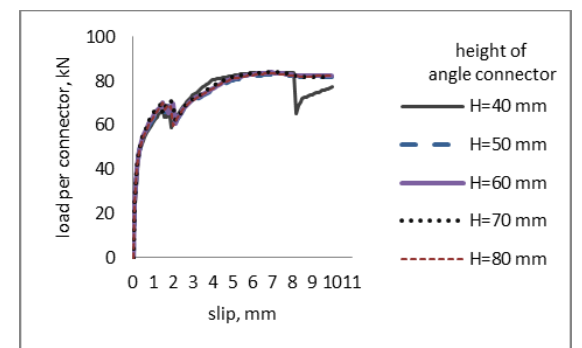
شکل ۱۵ اثر طول برشگیر بر رفتار بار- جابه جایی در برشگیر با ابعاد ۸۰×۴۰×۴ میلی متر.



شکل ۱۲ تاثیر اندازه بال برشگیر نبشی بر رفتار بار- جابه جایی.



شکل ۱۶ نمودار ظرفیت برشگیر نبشی بر حسب مناسب ترین توان طول نبشی.



شکل ۱۳ تاثیر ارتفاع برشگیر نبشی بر رفتار بار- جابه جایی.

جدول ۶ طول موثر، ابعاد و ویژگی های نمونه ها.

Angle Dimension (mm)	L _c obtain from FEM (mm)	Concrete strength (MPa)	Steel strength		Steel beam dimension (mm)	L _c obtain from (6) (mm)	Percent of error (%)
			F _y (MPa)	F _u (MPa)			
80x40x8	۱۳۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	250x250x9x14	۱۳۲/۹۲	-۲/۲۴
80x40x4	۱۷۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	250x250x9x14	۱۷۲/۵۱	-۱/۴۸
80x40x6	۱۵۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	250x250x9x14	۱۴۸/۱۱	۱/۲۶
80x40x6	۱۱۰	۳۵	۳۲۰	۴۴۰	250x250x9x14	۱۱۱/۰۸	-۰/۹۸
80x40x6	۹۰	۳۵	۴۰۰	۵۲۰	250x250x9x14	۸۸/۸۷	۱/۲۶
60x40x6	۱۵۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	250x250x9x14	۱۴۸/۱۱	۱/۲۶
100x40x6	۱۱۵۰	۳۵	۲۴۰	۳۶۰	250x250x9x14	۱۴۸/۱۱	۱/۲۶

ضریب تغییرات آن ۰/۰۳ است. همان گونه که مشاهده می-شود، رابطه پیشنهاد شده به خوبی با نتایج به دست آمده از مدل عناصر محدود هماهنگی دارد.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف این پژوهش تعیین مقاومت و بررسی رفتار برشگیرهای نبشی مدفون شده در دال بتنی تحت بارهای مونوتونیک بوده است. برای این کار مدلی کامپیوتری از آزمایش برون رانی برشی ساخته شد و نتایج حاصل از تحلیل مدل عناصر محدود با نتایج آزمایش های عملی موجود مقایسه شد. با استفاده از مدل موجود اثر پارامترهای گوناگون مانند مقاومت فشاری بتن، ارتفاع، عرض بال، طول و ضخامت برشگیر بر رفتار آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج زیر ارائه می شود:

با افزایش مقاومت بتن ظرفیت برشگیر افزایش در حالی که لغزش بیشینه آن کاهش می یابد. اندازه بال برشگیر نبشی تاثیری در مقاومت و رفتار آن نمی گذارد.

با افزایش ارتفاع برشگیر از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ میلی متر ظرفیت نبشی کمی افزوده می شود. این افزایش ظرفیت در ارتفاع های بزرگتر دیده نمی شود. بنا بر این وقتی ارتفاع برشگیر نبشی تا حدی افزایش می یابد دیگر با اضافه شدن ارتفاع، مقاومت برشی نبشی تغییر نمی کند. همچنین ارتفاع برشگیر تاثیر چندانی بر لغزش بیشینه و رفتار بار جابه جایی برشگیر نمی گذارد. با افزایش ضخامت نبشی ظرفیت برشی آن افزایش در حالی که لغزش بیشینه آن کاهش می یابد.

با افزایش طول برشگیر، مقاومت افزایش و لغزش بیشینه کاهش می یابد. در بررسی اثر طول نبشی بر رفتار آن، اگر طول نبشی از حد مشخصی کمتر باشد، تنش در تمام طول برشگیر ثابت می ماند. در برشگیرها با طول های زیاد تنش در سراسر طول ثابت نیست، بنابراین مناسب است برای اقتصادی شدن و بهتر عمل کردن برشگیرها محدودیت طولی برای آنها در نظر گرفته شود.

برای در نظر گرفتن محدودیت طولی برای برشگیر نبشی و به دست آوردن طول بحرانی، اثر پارامترهای ارتفاع،

$$L_c = 69748 / F_y t^{0.3762} \quad (5)$$

L_c : طول بحرانی بر حسب mm

F_y : تنش تسلیم فولاد بر حسب MPa

t : ضخامت برشگیر نبشی بر حسب mm

۵- ارایه رابطه مقاومت نهایی نبشی

با استفاده از نتایج به دست آمده از مطالعه پارامتری به استخراج رابطه ای برای به دست آوردن ظرفیت برشی برشگیر نبشی می پردازیم. همان گونه که در مطالعه پارامتری دیده شد، عوامل موثر در ظرفیت نبشی عبارت است از: ضخامت و طول نبشی و مقاومت فشاری بتن. در اینجا بررسی می شود که مقاومت برشگیر نبشی با چه توانی از این پارامترها رابطه خطی دارد. برای این کار در هر مورد همه پارامترها ثابت نگه داشته شده اند و تنها پارامتر مورد نظر تغییر داده شده است. در شکل ۱۶ محور قائم مقاومت برشگیر و محور افقی $L_c^{0.64}$ است. عدد ۰/۶۴ بهترین توانی است که خط عبور داده شده از داده ها به گونه ای که از مبدا مختصات نیز بگذرد، کمترین خطا را می دهد. این توان از راه سعی و خطا به دست آمده است. به همین ترتیب رابطه ظرفیت برشگیر با پارامترهای t و f_c به دست می آید و رابطه (۶) برای پیش بینی مقاومت نهایی برشگیر پیشنهاد می شود:

$$Q = 4.3 L_c^{0.64} t^{0.27} f_c^{0.11} \quad (6)$$

t = ضخامت نبشی (mm)

L_c = طول نبشی (mm)

f_c = مقاومت فشاری بتن (MPa)

Q = ظرفیت برشگیر بر حسب (kN)

در جدول ۷ درصد خطای مقادیر به دست آمده برای ظرفیت برشگیر از مدل عناصر محدود و مقادیر به آمده از رابطه (۶) مقایسه شده است. درصد خطای مثبت نشان دهنده ایمن بودن و درصد خطای منفی نشان دهنده غیر ایمن بودن رابطه است. از روی جدول مشاهده می شود که بیشینه درصد خطای مثبت ۷،۶۴٪ و بیشینه خطای منفی ۴٪ است. میانگین نسبت ظرفیت برشگیر به دست آمده از مدل عناصر محدود به مقدار نظیر به دست آمده از رابطه پیشنهادی ۱/۰۱ و

4. Lam, D.; El-Lobody, E.; "Behavior of headed stud shear connectors in composite beam"; Journal of Structural Engineering; 131(1), 2005, p. 96-107.
5. Nakajima, A.; Saiki, I.; Kokai, M.; Doi, K.; Takabayashi, Y.; Ooe, H.; "Cyclic shear force-slip behavior of studs under alternating and pulsating load condition"; Engineering Structures; 25(5), 2003, p. 537-545.
6. Shariati, M.; Ramli Sulong, NH.; Arabnejad Khanouki, MM; "Experimental assessment of channel shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading in high strength concrete"; Materials & Design; 34(0), 2012, p. 325-331.
7. Baran, E.; Topkaya, C.; "An experimental study on channel type shear connectors"; Journal of Constructional Steel Research; 74(0), 2012, p. 108-117.
8. Yokota, H.; Kiyomiya, O.; "Load carrying capacity of shear connectors made of shape steel in steel-concrete composite members"; Technical note of the port and harbor research institute ministry of transport, JAPAN; 595, 1987, p. 1-24.
9. Soty, R.; Shima, H.; "Formulation for Maximum Shear Force on L-Shape Shear Connector Subjected to Strut Compressive Force at Splitting Crack Occurrence in Steel-Concrete Composite Structures"; Procedia Engineering; 14(0), 2011, p. 2420-2428.
10. Shariati, M.; Ramli Sulong, NH.; Suhatri, M.; Shariati, A.; Arabnejad Khanouki, MM.; Sinaei, H.; "Behaviour of C-shaped angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading: An experimental study"; Materials & Design; 41(0), 2012, p. 67-73.
11. Shariati, M.; Ramli Sulong, NH.; Suhatri, M.; Shariati, A.; Arabnejad Khanouki, MM.; Sinaei, H.; "Comparison of behaviour between channel and angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading"; Construction and Building Materials; 38(0), 2013, p. 582-593.
12. ABAQUS standard user's manual, Version 6.9, USA, 2009.
13. Eurocode-2: Design of concrete structures, in Part1: General rules and rules for building, 1992.
14. Qureshi, J.; Lam, D.; Ye, J.; "Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams"; Journal of Constructional Steel Research; 67(4), 2011, p. 706-719.
15. Soty, R.; Shima, H.; "Formulation for shear force-relative displacement relationship of L-shape shear connector in steel-concrete composite structures", Engineering Structures; 46(0), 2013, p. 581-592.

ضخامت و مقاومت فولاد مورد ارزیابی قرار گرفت. از بین آنها ضخامت نبشی و مقاومت فولاد، پارامترهای موثر در طول بحرانی نبشی بوده است.

با انجام این مطالعه مشخص شد پارامترهای مؤثر در مقاومت برشگیر نبشی عبارتند از: مقاومت فشاری بتن، طول و ضخامت برشگیر به کار رفته. در پایان رابطه‌ای برای پیش-بینی مقاومت برشگیر نبشی پیشنهاد شد.

جدول ۷ مقایسه نتایج مطالعه پارامتری و رابطه پیشنهادی.

Sample	Load per connector for FEM (kN) (1)	$4.3f_c^{0.11} t^{0.27} L_c^{0.64}$ (kN) (2)	Ratio of (1)/(2)	Percentage of error (%)
LE-1	۷۹/۱۶	۷۸/۵۵	۱/۰۱	۰/۷۷
LE-2	۸۳/۰۴	۸۰/۱۴	۱/۰۴	۳/۴۹
LE-3	۸۳/۳۷	۸۱/۵۱	۱/۰۲	۲/۲۳
LE-4	۸۳/۶۴	۸۲/۷۲	۱/۰۱	۱/۱۱
LE-6	۹۱/۱۵	۹۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۲۳
LE-7	۹۱/۵۴	۹۰/۹۴	۱/۰۱	۰/۶۶
LE-8	۹۱/۹۴	۹۰/۹۴	۱/۰۱	۱/۰۹
LE-9	۸۴/۰۰	۸۱/۵۱	۱/۰۳	۲/۹۷
LE-10	۸۳/۱۱	۸۱/۵۱	۱/۰۲	۱/۹۳
LE-11	۸۳/۸۲	۸۱/۵۱	۱/۰۳	۲/۷۵
LE-12	۸۴/۰۷	۸۱/۵۱	۱/۰۳	۳/۰۵
LE-14	۱۱۱/۸۲	۱۱۳/۰۴	۰/۹۹	-۱/۰۹
LE-15	۱۲۲/۸۳	۱۲۶/۱۱	۰/۹۷	-۲/۶۷
LE-16	۱۳۳/۶۰	۱۳۶/۳۰	۰/۹۸	-۲/۰۲
LE-17	۱۵۱/۷۸	۱۴۰/۲۰	۱/۰۸	۷/۶۴
LE-18	۱۵۰/۸۴	۱۵۶/۴۲	۰/۹۶	-۳/۶۹
LE-19	۱۶۴/۰۹	۱۶۹/۰۵	۰/۹۷	-۳/۰۲
LE-20	۲۱۴/۶۷	۲۰۸/۳۵	۱/۰۳	۲/۹۵
LE-21	۲۳۲/۸۹	۲۳۲/۴۶	۱/۰۰	۰/۱۹
LE-22	۲۴۱/۵۶	۲۵۱/۲۳	۰/۹۶	-۴/۰۰
LE-23	۱۶۳/۵۶	۱۶۴/۶۶	۰/۹۹	-۰/۶۷
LE-24	۹۷/۵۳	۹۰/۹۴	۱/۰۷	۶/۷۶
mean			۱/۰۱	
CV			۰/۰۳	

۷- مراجع

1. Maleki, S.; Bagheri, S.; "Behavior of channel shear connectors, Part II: Analytical study"; Journal of Constructional Steel Research; 64(12), 2008, p. 1341-1348.
2. Maleki, S.; Mahoutian, M.; "Experimental and analytical study on channel shear connectors in fiber-reinforced concrete. Journal of Constructional Steel Research"; 65(8-9), 2009, p. 1787-1793.
3. Nguyen, HT.; Kim, SE.; "Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors"; Journal of Constructional Steel Research; 65(10-11), 2009, p. 1909-1920.

