

## ارائه رابطه پیش بینی مقاومت برشی بین لایه‌ای پانل‌های SCS با اتصال دهنده‌های برشی نواری گسسته با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژنی (GEP)

سید هاشم خطیبی

گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

حامد قوهانی عرب \*

گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

محمود میری

گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

### چکیده

ساخت و ساز سازه‌های بزرگ، به سرعت در حال توسعه است. به همین خاطر یافتن مصالحی با وزن نسبتاً کم و مقاومت بالا امری ضروری است. در همین راستا سازه‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد (SCS) پیشنهاد شد، سازه‌های فولاد-بتن-فولاد، متشکل از دو لایه فولادی و یک لایه بتنی می‌باشد. این سازه‌ها به دلیل وزن کم و در عین حال مقاومت و انعطاف بالا، در بین مهندسان محبوب واقع شدند. در این پژوهش ابتدا سه نمونه پانل آزمایش فشار خارج اتصال دهنده برشی نواری، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، مدل‌سازی و سپس صحت‌سنجی شد. در ادامه با توجه به اینکه، روابط موجود برای پیش‌بینی مقاومت برشی اتصال دهنده‌های برشی نواری، دارای شکل پیچیده و دقت نه چندان بالا بوده است، نویسندگان به دنبال پیشنهاد رابطه‌ای با در نظر گرفتن اثرات پارامترهای مختلف هندسی و همچنین مقاومت فشاری بتن، بودند. در همین راستا با استفاده از طراحی آزمایش، 17 نمونه پانل طراحی و مدل‌سازی شد. سپس با استفاده از الگوریتم بیان ژنی (GEP) رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقاومت برشی این سیستم پیشنهاد گردید. در انتها با استفاده از پارامترهای ارزیابی خطا، کارایی رابطه پیشنهادی ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی، اتصال دهنده‌ی برشی نواری، GEP، سازه‌های فولاد-بتن-فولاد، الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژنی.

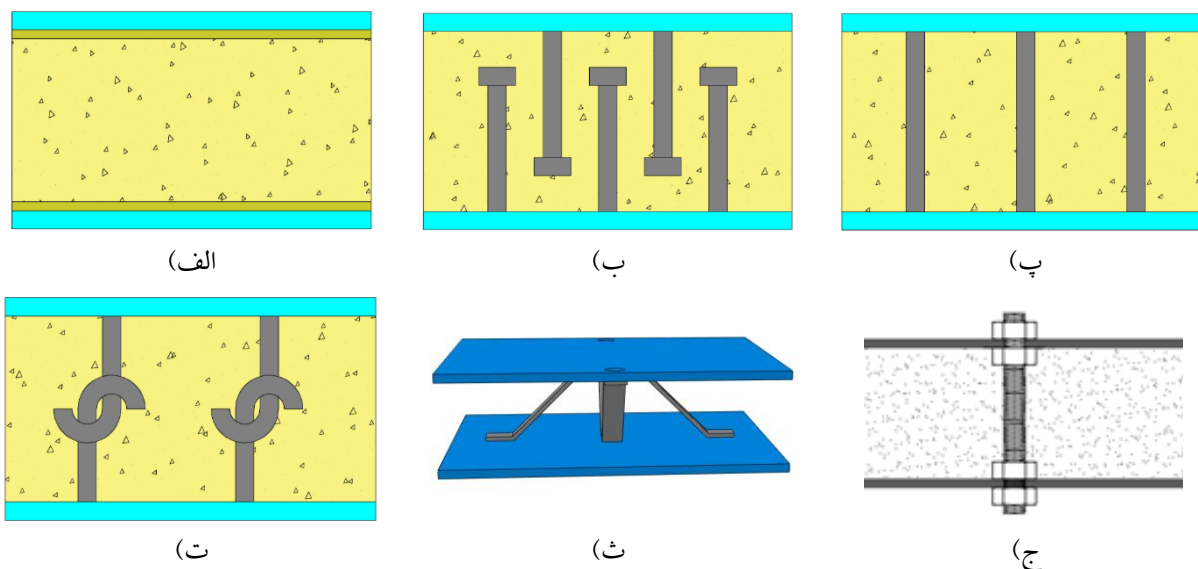
\* نویسنده مسئول: ghohani@eng.usb.ac.ir

## ۱- مقدمه

میله ای با دو انتهای جوش اصطکاکی در ساختار (Bi-steel) مطابق شکل (1-ب) [3]، اتصال دهنده‌های برشی قلاب شکل (J-hook) مطابق شکل (1-ت) [4]، اتصال دهنده‌های برشی نواری موجدار گسسته (CSC) [5][6] مطابق شکل (1-ث) و اتصالات برشی پیچ میله مطابق شکل (1-ج) [7]، نمونه‌هایی از آنها می‌باشند.

سازه‌های SCS به خاطر داشتن انعطاف در وزن و ضخامت مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌اند. به همین خاطر در ساخت سازه‌های تونل‌های مستغرق، موج شکن‌های شناور، مخازن مایع، بدنه کشتی، سازه‌های عرشه‌ای فراساحلی و پناهگاه‌ها مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفتند [8]. در ادامه، مختصری از تحقیقات اخیر آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی ارائه می‌گردد.

سازه‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد (SCS<sup>1</sup>)، از دلایه فولادی و یک هسته بتنی تشکیل شده‌اند. اولین بار Solomon و همکاران در دهه 1980 جهت استفاده در ساخت پل‌ها این سیستم را پیشنهاد نمودند و آن‌را کامپوزیت ساندویچی فولاد-بتن-فولاد نامیدند [1]. در ابتدا ورق‌های فولادی طبق شکل (1-الف) توسط چسب اپوکسی به هسته بتنی متصل می‌شدند. از آنجا که چسب اپوکسی از نظر مقاومت برشی عملکرد ضعیفی داشت، جهت بهبود رفتار کامپوزیتی سیستم‌های SCS، اتصال دهنده‌های برشی مکانیکی مختلفی پیشنهاد شد. اتصال دهنده‌های برشی در اشکال مختلف پیشنهاد شده‌اند که گل‌میخ‌های همپوشان در ساختار دو پوسته (DSC) مطابق شکل (1-ب) [2]، اتصال دهنده‌های برشی



شکل ۱- اتصال دهنده‌های برشی در ساندویچ‌های SCS، (الف) اتصال با مواد چسبنده، (ب) اتصال دهنده‌های برشی گلمیخی همپوشان در سیستم DSC، (پ) اتصال دهنده‌های برشی دو سر جوش در سیستم (Bi-steel)، (ت) اتصال دهنده‌های برشی قلاب شکل (J-hook)، (ث) اتصال دهنده‌های برشی نواری موجدار گسسته (CSC) و (ج) اتصال دهنده برشی پیچ میله.

روابطی جهت پیش‌بینی مقاومت برشی بین لایه‌ای اتصال دهنده-های گلمیخی ارائه نمودند [9].  
یان<sup>۴</sup> و همکاران در سال 2020 اتصال دهنده‌های ناودانی اصلاح شده را مطرح و سپس به بررسی مقاومت برشی آن پرداختند. ایشان اتصال دهنده‌های ناودانی را از یک انتها توسط جوش و انتهای دیگر را با پیچ و مهره به رویه فولادی متصل نمودند. نتایج

لیو تانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال 2020 به مطالعه بر روی مقاومت برشی بین لایه‌ای پانل‌های SCS با اتصال دهنده‌های گلمیخی همپوشان پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش قطر گلمیخ موجب بالارفتن مقاومت برشی پانل‌های SCS خواهد شد، همچنین با جایگزین نمودن بتن فوق توانمند به جای بتن معمولی، مقاومت برشی به میزان چشم‌گیری افزایش یافت. در انتها ایشان

<sup>3</sup> Lewei tong  
<sup>4</sup> Yan

<sup>1</sup> Steel-concrete-steel  
<sup>2</sup> corrugated-strip connectors

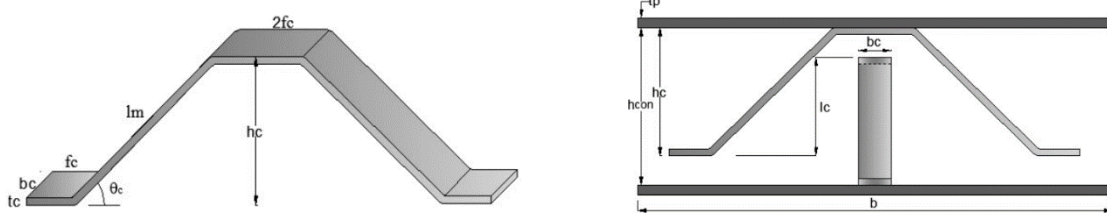
مدلسازی شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم بیان ژنی GEP، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقاومت برشی اتصال‌دهنده‌های برشی CSC پیشنهاد شد.

## ۲- آزمایش فشار خارج<sup>۱</sup>

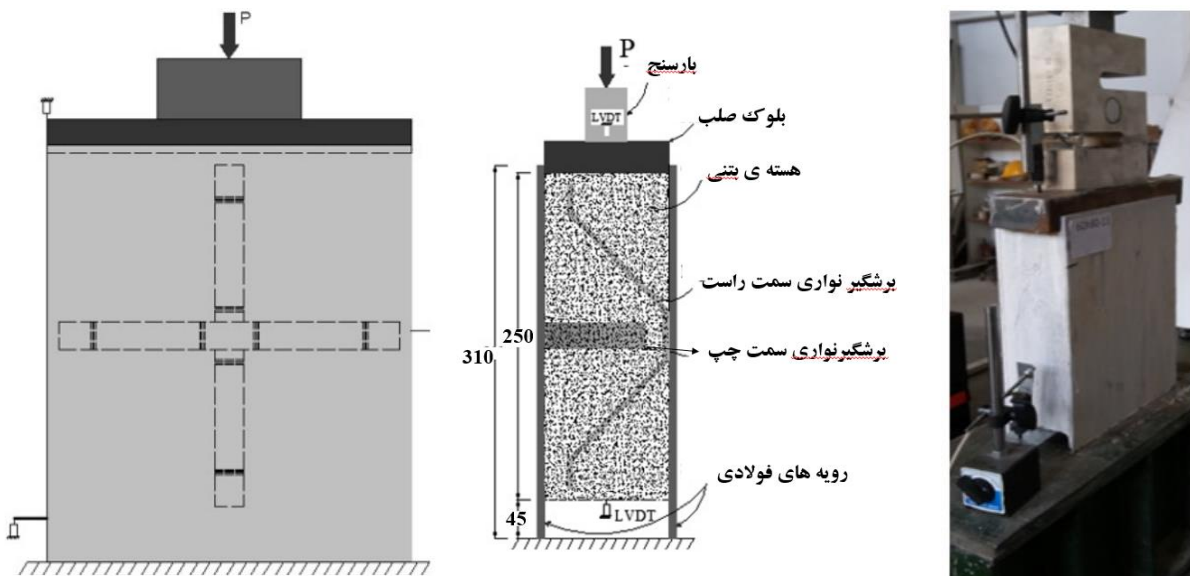
در این مطالعه ۳ نمونه از آزمایشات فشار خارج اتصال‌دهنده‌ی برشی CSC که توسط یوسفی و قلعه‌نوی انجام شده بود [5]، مدلسازی و سپس صحت‌سنجی شد. شکل 2، ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش و اتصال‌دهنده‌های برشی CSC را نشان می‌دهد که مشخصات متناظر آنها در جدول 1 لیست شده است. در شکل 3، آزمایش فشار خارج نشان داده می‌شود. مطابق شکل ۳، بار از نوع شبه استاتیکی از طریق بارسنج به قطعه صلب اعمال گردیده و سپس به هسته بتنی و اتصال‌دهنده‌های برشی نواری انتقال می‌یابد. جابجایی سنج‌های خطی (LVDTs) برای ثبت لغزش بین بتن و رویه‌های فولادی به کار گرفته شده‌اند. در نهایت، نیروی برشی در مقابل لغزش هر کدام از نمونه‌ها توسط سیستم پردازش داده‌ها، ثبت گردیده است.

گویای آن است که اتصال‌دهنده‌های ناودانی اصلاح شده از اتصال‌دهنده‌های قلاب شکل و گلیمخ همپوشان مقاومت برشی بیشتری داشته است [10].

یوسفی و خطیبی [11] به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار خمشی تیرهای SCS با اتصال‌دهنده‌های برشی نواری موج‌دار (CSC) پرداختند. در این مطالعه برای دو سر جوش نمودن CSCها در یک انتها از جوش انگشتانه برای ایجاد اتصال جزئی استفاده گردید. نتایج حاکی از آن بود که با دو انتها جوش نمودن CSCها حتی به صورت جزئی به رویه‌های فولادی، مقاومت خمشی حدود 30% افزایش می‌یابد. همچنین در انتها روابطی جهت پیش‌بینی مقاومت خمشی این سیستم ارائه گردید. با توجه به اینکه روابط موجود برای پیش‌بینی مقاومت اتصالات برشی سازه‌های SCS، دارای شکل پیچیده و همچنین دقت نه چندان بالا می‌باشد، در این پژوهش ابتدا، 3 نمونه‌ی آزمایش فشار خارج اتصال‌دهنده‌ی برشی CSC، مدلسازی و صحت‌سنجی شد. سپس با استفاده از طراحی آزمایش، ۱۷ نمونه‌ی عددی، طراحی و



شکل ۲- نام‌گذاری ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش و اتصال‌دهنده‌های برشی نواری [5].



شکل ۳- تجهیزات آزمایش فشار خارج [5].

<sup>۱</sup> Push-out

جدول ۱- مشخصات ابعاد نمونه‌ها برای آزمایش فشار خارج [5].

نمونه‌ها	$t_p$ (mm)	$b_c$ (mm)	$f_c$ (mm)	$h_{con}$ (mm)	$\theta^\circ$	$h_{cc}(\frac{h_c}{h_{con}})$
10-D3	10	20	27.9	100	45	0.79
6Dh100- 9	6	20	26.2	100	55	1
6Dh65- 15	6	20	26	60	55	0.9

### ۳- مدل اجزای محدود

$(C3D4)^2$  مدل‌سازی شده است. جهت تحلیل حساسیت هر نمونه با ۴ اندازه‌ی مش 10، 12، 15 و 18 میلی‌متر مدل‌سازی شده است، در نهایت مش با اندازه‌ی 10 میلی‌متر با توجه به همگرایی روند نمودارها برگزیده شده است.

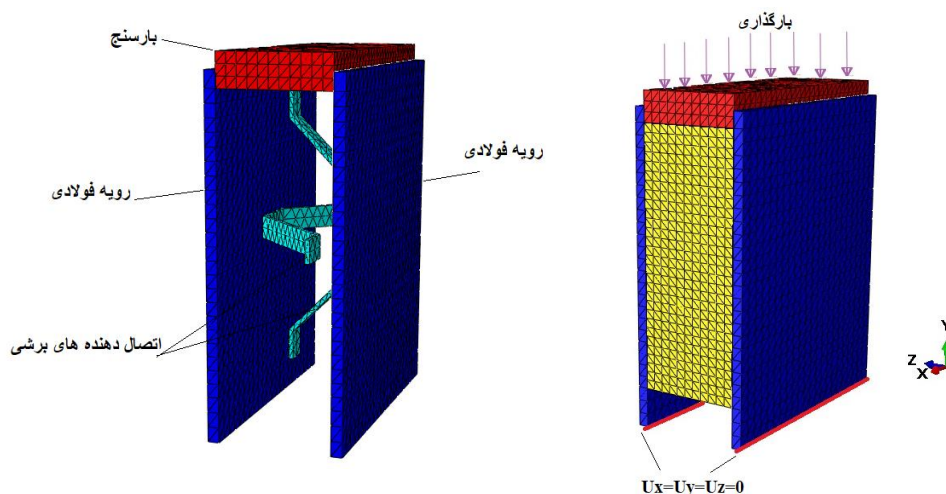
در این پژوهش ۳ نمونه از آزمایشات فشار خارج سازه‌های SCS با اتصال دهنده‌های برشی CSC، صحت سنجی شده است. جهت ساخت مدل اجزای محدود نمونه‌های SCS از نرم افزار ABAQUS CAE و حلگر Explicit استفاده گردیده است.

### ۳-۲- مدل‌سازی مصالح فولاد و بتن

برای مدل‌سازی مصالح فولادی، از قاعده سخت شوندگی کرنشی ایزوتروپیک و مدل الاستوپلاستیک با معیار تسلیم فون مایسز مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مصالح فولادی جهت مدل‌سازی، در جدول 2 لیست شده است [5].

### ۳-۱- مدل اجزای محدود برای آزمایش فشار خارج

مطابق شکل ۴، اجزای تشکیل دهنده آزمایش فشار خارج شامل دو رویه فولادی، هسته ی بتنی، اتصال دهنده‌های برشی CSC و بارسنج<sup>۱</sup> می باشد که توسط المان پیوسته 4 گرهی سه‌بعدی



شکل ۴- مدل اجزای محدود آزمایش فشار خارج

جدول ۲- خصوصیات مصالح فولادی آزمایش فشار خارج یوسفی و قلعه نوی [۵]

ضخامت	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مقدار کرنش در تنش نهایی	مدول الاستیسیته (Gpa)
4	250	380	0.3	207
6	285	495	0.23	202
8	411	615	0.176	205

<sup>2</sup> 3D four-node continuum element<sup>1</sup> load cell

همچنین بارگذاری به صورت شبه استاتیکی بر قطعه صلب اعمال گردیده‌است. تماس بین بتن و رویه‌های فولادی، همچنین CSCها و هسته بتنی، از نوع Surface to surface با فرمول بندی Hard contact در جهت عمود و Penalty friction در جهت مماسی، شبیه‌سازی گردیده‌است. همچنین جهت جلوگیری از پیچیدگی مدل‌سازی از شبیه‌سازی اتصال جوشی صرف‌نظر شده و با استفاده از قید tie، اتصال دهنده‌ها به رویه‌ی فولادی متصل شده‌اند. مقدار Friction coefficient برای اتصالات برشی و رویه‌ی فولادی در حال تماس با بتن، مقدار 0.2 در نظر گرفته شده‌است. با توجه به پیچیدگی مدل هندسی CSCها در هسته بتنی، برای کاهش زمان تحلیل عددی از تحلیل شبه استاتیکی با استفاده از حلگر Explicit و اعمال مقیاس جرمی (Mass-scaling) استفاده گردید.

### ۳-۴- صحت‌سنجی مدل‌های عددی

از آنجا که بارگذاری در آزمایش‌های انجام شده به صورت شبه استاتیکی اعمال شده‌است، برای مدل‌سازی صحیح این رفتار می‌بایست مقدار انرژی جنبشی به انرژی داخلی بررسی گردد، در تمامی نمونه‌ها نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی، کم‌تر از 10% بدست آمد که حاکی از مدل‌سازی صحیح رفتار شبه استاتیکی می‌باشد. شکل ۵، منحنی نیرو-لغزش حاصل از نتایج آزمایش فشار خارج و مدل‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهد. براساس شکل 5 می‌توان گفت نمودار نیرو-لغزش اجزای محدود از نظر سختی الاستیک اولیه، آستانه شروع رفتار پلاستیک و مقاومت نهایی تطابق قابل قبولی با نمودار آزمایش دارد. یکی از دلایل مهم خطای موجود در مقایسه نمودارها را می‌توان ساده‌سازی در مدل‌سازی دانست. جدول 4، به مقایسه‌ی نمونه‌های تحت آزمایش و مدل‌سازی عددی پرداخته‌است. از آنجا که مقدار میانگین و کواریانس نسبت بار نهایی مدل‌سازی به بار نهایی آزمایش به ترتیب 1.018 و 0.0007 بدست آمده‌است، می‌توان ادعا نمود که مقدار خطای عددی کم بوده و مقدار مقاومت نهایی حاصل از تحلیل عددی با دقت قابل ملاحظه‌ای قابل قبول می‌باشد.

هسته‌ی بتنی با مدل پلاستیک آسیب دیده بتنی<sup>1</sup> از کتابخانه مصالح ABAQUS مدل‌سازی گردید [12]. در این مدل از مفهوم رفتار پلاستیک ایزوتروپیک با آسیب ایزوتروپیک استفاده می‌شود تا رفتار سازه‌ای غیرالاستیک بتن شبیه‌سازی شود. جهت پیش‌بینی رفتار فشاری بتن از معادله‌ی تنش کرنش فشاری، مطابق روابط (1الی 3) استفاده شده‌است [13].

$$\sigma_c = \frac{nf_c \varepsilon_c}{\varepsilon_0 \left( n - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^{nk} \right)} \quad (1)$$

$$n = 0.8 + \frac{f_c}{17} \quad (2)$$

$$\begin{cases} k = 0.67 + \left( \frac{f_c}{62} \right) & \varepsilon_c > \varepsilon_0 \\ k = 1 & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \end{cases} \quad (3)$$

که  $f_c$ ،  $\varepsilon_0$  و  $\sigma_c$  به ترتیب مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای بتن، کرنش متناظر  $f_c$ ، تنش فشاری و کرنش فشاری می‌باشد. همچنین برای مدل‌سازی رفتار بتن، بعد از ترک خوردگی، از مدل ترک خوردگی انرژی شکست ( $G_F$ )، مطابق رابطه‌ی ۴ استفاده شده‌است [14].

$$G_F = 0.97f_c + 41.8 \quad (4)$$

در این رابطه،  $G_F$ ، انرژی شکست بتن ( $\frac{N}{m}$ ) و  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای ( $\frac{N}{mm^2}$ ) می‌باشد. سایر پارامترهای رفتار پلاستیک بتن شامل زاویه اتساع<sup>۲</sup>، ( $\psi$ )، خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک<sup>۳</sup>، نسبت تنش فشاری دو محوره به تک محوره، زاویه محصورشدگی<sup>۴</sup>،  $k$ ، و پارامتر ویسکوپلاستیک<sup>۴</sup> مطابق جدول 3 برای مدل آسیب دیده پلاستیک براساس راهنمای نرم افزار ABAQUS تنظیم گردیده‌است [12].

جدول ۳- پارامترهای رفتار پلاستیک بتن

$\psi$	Eccentricity	$f$	$k$	Viscosity parameter
38	0.1	1.16	0.667	0.001

### ۳-۳- شرایط مرزی، بارگذاری و اندرکنش‌ها

مطابق شکل ۴، در مدل‌سازی آزمایش فشار خارج، انتهای پایین رویه‌های فولادی در مقابل جابجایی در تمام جهات مقید شده‌اند،

<sup>3</sup> Flow potential eccentricity

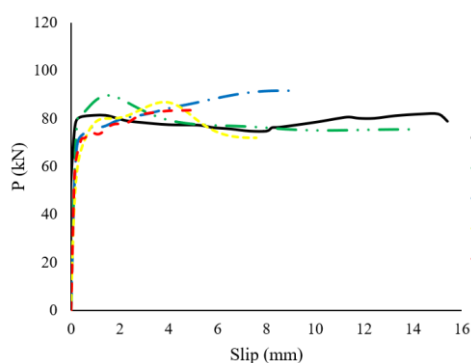
<sup>4</sup> Viscosity parameter

<sup>1</sup> Concrete damaged plasticity

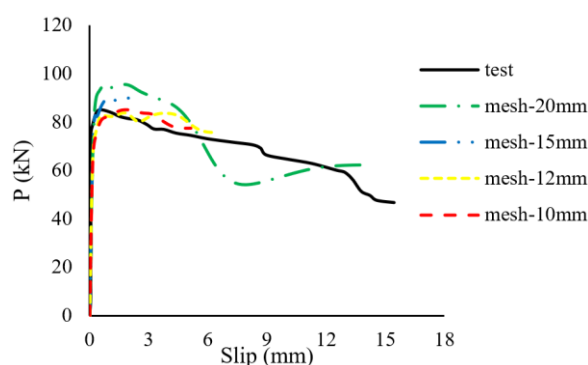
<sup>2</sup> Dilation angle

جدول ۴- مقایسه مقاومت نهایی بدست آمده از آزمایش و اجزای محدود

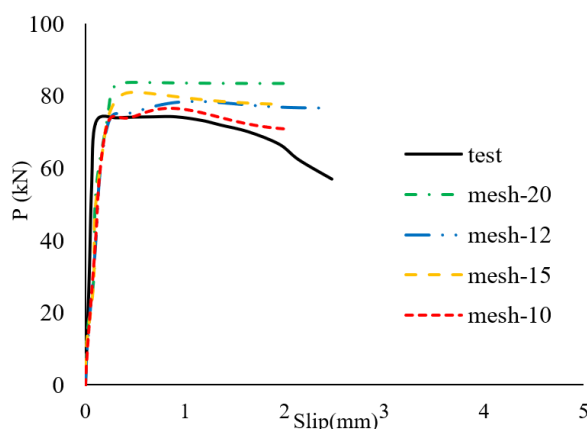
Specimen	$P_{Test}(kN)$	$P_{FE}(kN)$	$\frac{P_{FE}}{P_{Test}}$
10D-3	84.976	85.207	1.003
6Dh100-9	81.77	83.543	1.021
6Dh55-15	74.352	76.59	1.03
<b>Average</b>			<b>1.018</b>
<b>C.O.V</b>			<b>0.0007</b>



ب) 6Dh100-9



الف) 10D-3



ب) 6Dh55-15

شکل ۵- نمودارهای نیرو-جابجایی آزمایش و مدلسازی اجزای محدود

#### ۴- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژنی (GEP)

استفاده از اپراتورهای ژنتیکی GA، رشته‌های خطی با طول ثابت را ایجاد می‌نماید. هدف این برنامه تولید یک تابع ریاضی با استفاده از داده‌های ارائه شده می‌باشد [16]. روند الگوریتم GEP مطابق شکل 6 می‌باشد. در این تحقیق، جهت در نظر گرفتن اثر برهم کنش پارامترهای

فریا<sup>۱</sup> در سال 2001 الگوریتم جدیدی بر پایه برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)<sup>۲</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> (GA) پیشنهاد نمود. این الگوریتم به صورت یک برنامه کامپیوتری کد گذاری شده در کروموزوم‌های خطی با طول ثابت می‌باشد [15]. برنامه‌ریزی بیان ژنی (GEP)، با

<sup>3</sup> Genetic Algorithm

<sup>1</sup> Ferreira

<sup>2</sup> Genetic Programming

هندسی، از روش طراحی آزمایش [17] بهره گرفته شده‌است، جهت استفاده از این روش، ۶ فاکتور ورودی از جمله: زاویه‌ی اتصال دهنده‌ها ( $\theta$ )، پهنا‌ی اتصال دهنده‌ها ( $b_c$ )، ضخامت اتصال دهنده‌ها ( $t_c$ )، ارتفاع بتن ( $h_{con}$ )، نسبت ارتفاع اتصال دهنده‌ها به ارتفاع بتن ( $h_{cc}$ ) و مقاومت فشاری بتن ( $f_c$ ) بعنوان متغیرهای ورودی، مطابق جدول 5 انتخاب شده‌است. سپس نمونه‌ها از روش فاکتوریل دوسطحی مطابق جدول 6 در 17 طرح با پارامترهای مختلف هندسی برنامه‌ریزی شدند [17]. براساس طرح‌های به

دست آمده، مدل‌سازی عددی انجام شده و مقاومت نهایی متناظر آن‌ها در جدول 6 مشاهده می‌شود. در مجموع، از 17 مدل عددی و همچنین 10 نمونه‌ی آزمایشگاهی مرجع [5]، برای روش GEP استفاده شده است. تعداد داده‌های آموزشی و پیش‌بینی، به ترتیب مقدار 22 (81%) و 5 (19%) تنظیم شده‌است. همچنین پارامترهای برنامه‌ریزی الگوریتم GEP مطابق جدول 7 وارد شده و معیار شایستگی، کمینه کردن ریشه میانگین خطای مربعات (RMSE)<sup>1</sup> انتخاب گردید.

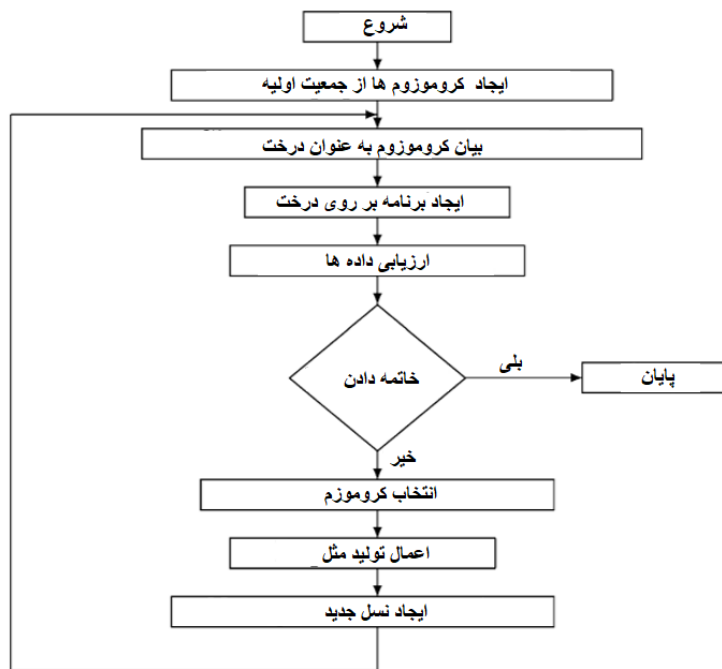
جدول ۵- پارامترهای ورودی و سطوح مختلف آن‌ها.

پارامترها	علامت مشخصه		کران
	پایین	بالا	
زاویه‌ی اتصال دهنده‌ها	$\theta$	45	90
پهنا‌ی اتصال دهنده‌ها	$b_c$	10	40
ضخامت اتصال دهنده‌ها	$t_c$	4	8
ارتفاع بتن	$h_{con}$	70	100
مقاومت فشاری بتن	$f_c$	30	50
نسبت ارتفاع اتصال دهنده‌ها به ارتفاع بتن	$h_{cc}$	0.8	1

جدول ۶- مشخصات هندسی و نیروی برشی مربوط به برشگیرهای نواری مدل سازی شده

نمونه‌ها	$t_c$ (mm)	$\theta^\circ$	$b_c$ (mm)	$f_c$ (MPa)	$h_{con}$ (mm)	hh	p(kN)
N-1	4	90	40	30	70	0.8	59.4
N-2	8	45	10	30	100	1	36.8
N-3	8	90	40	50	100	1	163.45
N-4	8	45	10	30	70	0.8	30.2
N-5	4	90	10	50	100	0.8	32.75
N-6	4	90	10	30	70	1	61.95
N-7	8	45	40	50	100	0.8	70.8
N-8	4	67.5	25	40	85	0.9	82.85
N-9	8	90	40	30	100	1	93.45
N-10	4	45	40	30	100	0.8	82.25
N-11	4	45	10	50	100	1	58.35
N-12	8	45	10	50	70	0.8	60.7
N-13	4	90	10	30	100	0.8	66
N-14	8	45	40	50	70	1	66.5
N-15	8	45	40	30	70	1	64.5
N-16	4	90	40	50	70	0.8	118.85
N-17	6	90	10	50	70	1	81.6

<sup>1</sup> Root-Mean-Square Error



شکل ۶- فلوچارت الگوریتم GEP [18]

جدول ۷- پارامترهای مدل GEP

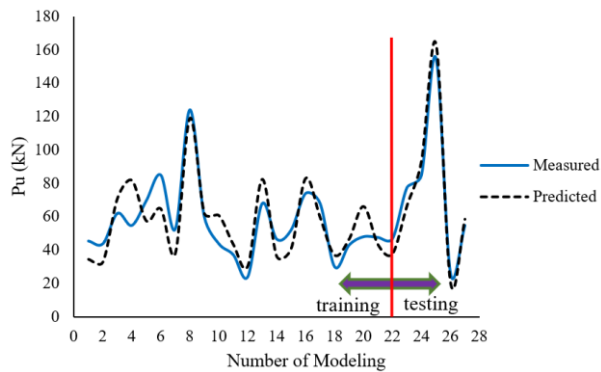
مقدار	پارامتر
$\times, \div, \sqrt{\quad}$	توابع ریاضی (Function set)
6	اندازه سرشاخه‌ها (Head size)
50	تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)
3	تعداد ژن در هر کروموزوم (Number of genes)
0.044	نرخ جهش (Mutation rate)
2	نرخ وارون سازی (Number of genes)
0.3	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای (One-point recombination rate)
0.3	نرخ ترکیب دو نقطه‌ای (Two-point recombination rate)
0.1	نرخ ترکیب ژن (Gene recombination rate)
0.1	نرخ ترانزیشن ژن (Gene transposition rate)
ضرب (Multiplication)	تابع پیوند (Linking function)

خروجی‌های بدست آمده از برنامه‌ریزی بیان ژنی بر اساس 50 اجرای مختلف، منجر به ارائه‌ی روابط مختلفی جهت تخمین مقاومت برشی اتصال دهنده‌های نواری شد. در نهایت بر اساس کمیته‌ی ریشه‌ی میانگین خطای مربعات، رابطه‌ی (5) به عنوان بهترین رابطه حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژنی انتخاب شد:

$$P_u = 0.124h_{cc}\sqrt{\theta A_s f_c} \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $A_s$  سطح مقطع برشگیر می‌باشد که به صورت (b.c.t.c) قابل محاسبه است. همانطور که انتظار می‌رفت، ارتفاع بتن نقشی در مقاومت نهایی برشگیر نداشته‌است. مشخص می‌شود برنامه‌ریزی بیان ژنی رابطه مناسبی را یافته و متغیر بی‌تاثیر را حذف نموده است. شکل ۷ مقایسه نتایج داده‌های پیش‌بینی شده توسط برنامه‌ریزی بیان ژنی با رابطه (5) و داده‌های آموزش و آزمایش را نشان می‌دهد.





شکل ۷- مقایسه‌ی داده‌های پیش‌بینی شده توسط رابطه با داده‌های مدلسازی و آزمایشگاهی

**۵- اعتبار سنجی رابطه پیشنهادی**  
 های موجود و همچنین رابطه‌ی پیشنهادی مرجع [5] که در جدول در این بخش، رابطه‌ی ارائه شده در بخش قبل، با روابط آیین نامه ۸ لیست شده‌اند، مقایسه و ارزیابی شده است.

جدول ۸- روابط مقاومت برشی تیر بتنی با اتصال‌دهنده‌های گلمیخی و نواری

ANSI/AISC 360-10[19]	$P_u = 0.5A_s\sqrt{f_{ck}E_c} \leq 0.75f_uA_s$	(۶)
AASHTO Washington[19]	$P_u = 0.5A_s\phi\sqrt{f_{ck}E_c} \leq \phi f_uA_s$	(۷)
GB 50017[19]	$P_u = 0.43A_s\sqrt{f_{cp}E_c} < 0.7\gamma f_uA_s$	(۸)
	$\frac{P_u}{A_s} = 35.2t_p^{0.386}l_c^{0.162}h_{cc}^{312}k_{cb}^{-0.51}\theta_r^{0.287}$	
yousefi & Ghalehnovi[5]	$A_s = b_c \times t_c$ $k_{cb} = \frac{b_c}{b}$ $l_c = h_{con} - [(h_{con} - h_c) * 2]$	(۹)

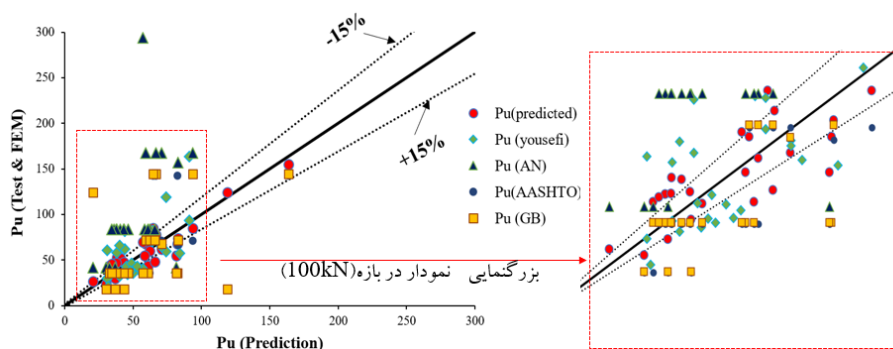
توضیحات:

$f_{ck}$ : مقاومت نمونه استوانه‌ای،  $f_{cp}$ : مقاومت فشاری منشوری بتن،

$f_u$ : مقاومت نهایی کششی اتصال‌دهنده‌ی برشی گلمیخی،  $E_c$ : مدول الاستیسیته‌ی سکانتی بتن،

$\phi$ : ضریب اطمینان مقاومت = 0.85،  $\gamma$ : نسبت مقاومت کششی حداقل به مقاومت تسلیم اتصال‌دهنده‌ی گلمیخی

در شکل ۸، پراکندگی نتایج حاصل از آزمایش و مدلسازی با مقادیر حاصل از روابط مقایسه شده است. همچنین دامنه‌ای که خطای آن کمتر از 15% می‌باشد، بعنوان دامنه‌ی امن و باقیمانده بعنوان دامنه‌ی ناامن در نظر گرفته شده است. می‌توان ادعا نمود که اکثر مقادیر مقاومت نهایی بدست آمده از رابطه‌ی شماره 5 در دامنه‌ی امن نمودار قرار گرفته‌اند و نسبت به دیگر روابط دقت بالاتری داشته‌است.



شکل ۸- مقایسه‌ی بین روابط محققین و رابطه‌ی پیشنهادی

جدول ۹- مقایسه ی روابط ذکر شده برای تمامی داده‌ها

نمونه	مقاومت برشی پیش- بینی شده از رابطه ی 5			yousefi		ANSI/AISC		AASHTO		GB50017	
	$Pu_{exp}$ (kN)	Pu (kN)	$\frac{Pu_{exp}}{Pu}$	Pu (kN)	$\frac{Pu_{exp}}{Pu}$	Pu (kN)	$\frac{Pu_{exp}}{Pu}$	Pu (kN)	$\frac{Pu_{exp}}{Pu}$	Pu (kN)	$\frac{Pu_{exp}}{Pu}$
N-1	59.4	65.2	0.91	74	0.8	167.76	0.35	71.30	0.83	72.13	0.82
N-2	36.8	28.81	1.28	38	0.97	41.94	0.88	17.82	2.06	18.03	2.04
N-3	163.45	148.8	1.1	91	1.8	335.52	0.49	142.6	1.15	144.27	1.13
N-4	30.2	23.05	1.31	31	0.97	41.94	0.72	17.82	1.69	18.03	1.67
N-5	32.75	42.09	0.78	40	0.82	41.94	0.78	17.82	1.84	36.07	1.82
N-6	61.95	57.63	1.07	44	1.41	83.88	0.74	35.65	1.74	72.13	1.72
N-7	70.8	59.52	1.19	64	1.11	167.76	0.42	71.30	0.99	67.63	0.98
N-8	82.85	71.02	1.17	61	1.36	157.28	0.53	66.84	1.24	72.14	1.23
N-9	93.45	81.5	1.15	91	1.03	167.76	0.56	71.30	1.31	144.27	1.3
N-10	82.25	62.2	1.26	64	1.29	335.52	0.25	142.60	0.58	36.07	0.57
N-11	58.35	52.61	1.11	38	1.54	83.88	0.70	35.65	1.64	36.07	1.62
N-12	60.7	42.09	1.44	31	1.96	83.88	0.72	35.65	1.70	36.07	1.68
N-13	66	46.1	1.43	40	1.65	83.88	0.79	71.30	1.85	72.14	1.83
N-14	66.5	74.4	0.89	71	0.94	167.76	0.40	142.60	0.93	144.27	0.92
N-15	64.5	81.5	0.79	71	0.91	335.52	0.19	142.60	0.45	144.27	0.45
N-16	118.85	119.04	1	74	1.61	335.52	0.35	17.85	0.83	18.03	0.82
N-17	81.6	52.61	1.55	44	1.85	41.94	1.95	35.65	4.58	36.07	4.52
10D-3	43.3	35.75	1.21	45	0.96	83.88	0.52	17.82	1.21	18.03	1.20
6Db10-5	20.6	25.28	0.81	32	0.64	41.94	0.49	124.77	1.16	124.41	1.14
6Db70-6	57.3	66.89	0.86	84	0.68	293.58	0.20	35.65	0.46	36.09	0.45
6Da90-9	37.9	50.56	0.75	55	0.69	83.88	0.45	35.65	1.06	36.09	1.05
6Da60-10	46.4	41.28	1.12	49	0.95	83.88	0.55	35.65	1.30	36.09	1.29
6Dh100-12	40.7	50.03	0.81	57	0.71	83.88	0.49	35.65	1.14	36.09	1.13
6Dh80-13	43	46.53	0.92	53	0.81	83.88	0.51	35.65	1.21	36.09	1.19
6Dh65-14	36.1	44.69	0.81	50	0.72	83.88	0.43	35.65	1.01	36.09	1
6Dh55-10	37.7	44.2	0.85	48	0.79	83.88	0.45	35.65	1.06	36.09	1.05
6Dh45-16	34.3	44.03	0.78	46	0.75	83.88	0.41	35.65	0.96	36.09	0.95
<b>AVE</b>			<b>1.069</b>		<b>1.1</b>		<b>0.57</b>		<b>1.33</b>		<b>1.31</b>
<b>C.O.V</b>			<b>0.053</b>		<b>0.28</b>		<b>0.546</b>		<b>1.285</b>		<b>1.27</b>

در روابط 10 تا 13، پارامترهای  $V_{pre}$ ،  $\bar{V}_{exp}$ ،  $V_{pri}$ ،  $V_{exp}$ ،  $n$ ،  $V_{pre}^{min}$  و  $V_{exp}^{max}$  به ترتیب مقاومت برشی تجربی، مقاومت برشی پیش‌بینی شده، میانگین مقاومت برشی تجربی، میانگین مقاومت برشی پیش‌بینی شده، تعداد کل نمونه‌ها، بزرگترین مقدار مقاومت برشی تجربی و کوچکترین مقاومت برشی پیش‌بینی شده، می‌باشد. لازم به ذکر است بهترین مقدار برای پارامترهای RMSE، MAPE، NSE و R به ترتیب 0، 0، 1 و 1 می‌باشد [20]. در جدول 10، با استفاده از پارامترهای سنجش خطای مذکور، روابط 5 تا 9 مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج می‌توان گفت رابطه‌ی پیشنهاد شده، دارای ضریب همبستگی 0.922 می‌باشد که نشان دهنده‌ی ارتباط خطی نسبتاً بالای بین متغیرها می‌باشد.

به منظور اطمینان از عملکرد رابطه پیشنهادی، دقت این رابطه با استفاده از 4 پارامتر سنجش خطا از جمله: ضریب همبستگی  $(R)$ ، ریشه‌ی میانگین خطای مربعات (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا  $(MAPE)^2$  و ضریب نش  $(NSE)^3$  که به ترتیب در رابطه ی 10 تا 13 مشاهده می‌شوند، ارزیابی می‌گردد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{exp} - \bar{V}_{exp})(V_{pre} - \bar{V}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{exp} - \bar{V}_{exp})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{pre} - \bar{V}_{pre})^2}} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{exp} - V_{pre})^2} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \left( \frac{V_{exp} - V_{pre}}{V_{exp}} \right) \right|}{n} \times 100 \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{exp} - V_{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{exp} - \bar{V}_{exp})^2} \quad (13)$$

<sup>3</sup> Nash-Sutcliffe Efficiency

<sup>1</sup> Correlation coefficient

<sup>2</sup> Mean Absolute Percentage Error

نتایج رابطه‌ی پیشنهادی با 18.88% کمترین میانگین درصد مطلق خطا و همچنین با 2.28، حداقل ریشه‌ی میانگین خطای مربعات را نسبت به دیگر روابط دارا بوده است. با توجه به نتایج برداشت می‌شود که رابطه‌ی ارائه شده جهت تخمین مقاومت برشی اتصال دهنده‌های برشی CSC عملکرد نسبتاً خوبی داشته است.

همچنین مقادیر معیار ضریب نش (NSE) رابطه‌ی پیشنهادی مقدار 0.842 می‌باشد، اینگونه برداشت می‌شود که رابطه‌ی ارائه شده نسبت به دیگر روابط توانایی تخمین بالاتری داشته است. در انتها جهت بررسی میزان خطای روابط با استفاده از معیارهای میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) و ریشه میانگین خطای مربعات (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفته شدند. بر اساس

جدول ۱۰- مقایسه پارامترهای سنجش خطا

رابطه	شاخص			
	R	RMSE	MAPE(%)	NSE
رابطه‌ی پیشنهادی	0.922	2.28	18.88	0.842
ANSI/AISC 360-10	0.708	21.35	123.81	-12.81
AASHTO Washington	0.708	5.74	33.37	0.264
GB 50017-2003	0.708	5.80	33.29	-0.02
yousefi & Ghalehnovi	0.673	4.39	27.05	0.414

Evans, "The design of double skin composite elements," J. Constr. Steel Res., vol. 19, no. 2, pp. 111-132, 1991, doi: 10.1016/0143-974X(91)90037-2.

[3] M. Xie and J. C. Chapman, "Developments in sandwich construction," J. Constr. Steel Res., vol. 62, no. 11, pp. 1123-1133, 2006, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.06.025.

[4] K. M. A. Sohel, J. Y. Richard Liew, and C. G. Koh, "Numerical modelling of lightweight Steel-Concrete-Steel sandwich composite beams subjected to impact," Thin-Walled Struct., vol. 94, pp. 135-146, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.04.001.

[5] M. Yousefi and M. Ghalehnovi, "Push-out test on the one end welded corrugated-strip connectors in steel-concrete-steel sandwich structure," Steel Compos. Struct., vol. 24, no. 1, pp. 23-35, 2017, doi: 10.12989/scs.2017.24.1.023.

[6] M. Yousefi and M. Ghalehnovi, "Finite element model for interlayer behavior of double skin steel-concrete-steel sandwich structure with corrugated-strip shear connectors," Steel Compos. Struct., vol. 27, no. 1, pp. 123-133, 2018, doi: 10.12989/scs.2018.27.1.123.

[7] محمد گل محمدی، منصور قلعه نوی، بررسی رفتار برشی بین لایه‌ای سازه ساندویچی فولاد-بتن-فولاد با اتصال دهنده‌های پیچ

میله مقاومت بالا، تحقیقات بتن، سال دهم، شماره سوم.

[8] B. A. Burgan and F. J. Najj, "Steel-concrete-steel sandwich construction," J. Constr. Steel Res., vol. 1, no. 46, p. 219, 1998.

[9] L. Tong, L. Chen, M. Wen, and C. Xu, "Static

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا 3 نمونه پانل از آزمایشات فشار خارج مدلسازی و صحت‌سنجی شد، سپس جهت در نظر گرفتن اثر پارامترهای هندسی بر یکدیگر، با استفاده از طراحی آزمایش، 17 نمونه طراحی و مدلسازی شد. در ادامه از الگوریتم ژنتیک (GEP) و همچنین نتایج حاصل از مدلسازی و آزمایشات یوسفی و قلعه‌نوی، کمک گرفته شد. در نهایت مدلی ساده با دقت بالا، جهت پیش‌بینی مقاومت برشی بین لایه‌ای سازه‌های SCS با اتصال دهنده‌ی برشی نواری (CSC) پیشنهاد شد.

در ادامه رابطه‌ی پیشنهاد شده نسبت به روابط آیین‌نامه‌ها و رابطه‌ی مرجع [5]، از نظر معیارهای خطا مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر معیارهای ضریب همبستگی (R)، ریشه‌ی میانگین خطای مربعات (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) و ضریب نش (NSE) برای رابطه‌ی پیشنهاد شده به ترتیب 0.922، 2.28، 18.88 و 0.842 بدست آمد، که این مقادیر حاکی از عملکرد خوب رابطه‌ی پیشنهادی بوده است.

## ۷- مراجع

[1] S. K. Solomon, D. W. Smith, and A. R. Cusens, "Flexural tests of steel-concrete-steel sandwiches," Mag. Concr. Res., vol. 28, no. 94, pp. 13-20, Mar. 1976, doi: 10.1680/mac.1976.28.94.13.

[2] H. D. Wright, T. O. S. Oduyemi, and H. R.

به وسیله‌ی روش برنامه‌ریزی عبارتی ژنتیک (GEP)، تحقیقات بتن، سال یازدهم، شماره اول.

behavior of stud shear connectors in high-strength-steel-UHPC composite beams,” Eng. Struct., vol. 218, no. March, p. 110827, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110827.

[10] J. B. Yan, H. Hu, and T. Wang, “Shear behaviour of novel enhanced C-channel connectors in steel-concrete-steel sandwich composite structures,” J. Constr. Steel Res., vol. 166, p. 105903, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105903.

[11] M. Yousefi and S. Hashem Khatibi, “Experimental and numerical study of the flexural behavior of steel-concrete-steel sandwich beams with corrugated-strip shear connectors,” Eng. Struct., vol. 242, p. 112559, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112559.

[12] K. & S. Hibbitt, “ABAQUS User’s Manual,” ABAQUS/CAE User’s Man., pp. 1–847, 2012.

[13] M. Yousefi, M. Golmohammadi, S. H. Khatibi, and M. Yaghoobi, “Prediction of the punching load strength of SCS slabs with stud bolt shear connectors using numerical modeling and GEP algorithm,” J. Rehabil. Civ. Eng., 2022, doi: 10.22075/JRCE.2022.26528.1628.

[14] F. H. Wittmann, P. E. Roelfstra, H. Mihashi, Y.-Y. Huang, X.-H. Zhang, and N. Nomura, “Influence of age of loading, water-cement ratio and rate of loading on fracture energy of concrete,” Mater. Struct., vol. 20, no. 2, pp. 103–110, Mar. 1987, doi: 10.1007/BF02472745.

[15] C. Ferreira, “Gene Expression Programming in Problem Solving,” in Soft Computing and Industry, London: Springer London, 2002, pp. 635–653.

[16] D. Muñoz, “Thesis Discovering unknown equations that describe large data sets using genetic programming techniques,” Masters Thesis, Linköping Institute of Technology. Institutionen för systemteknik, 2005, [Online]. Available: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:19975/FULLTEXT01>.

[17] W. Kleppmann, “Statistische Versuchsplanung,” in Masing Handbuch Qualitätsmanagement, vol. 158, no. 11, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014, pp. 499–522.

[۱۸] حامد قوهانی عرب، همکاران، تخمین مقاومت برشی بتن با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژنی، تحقیقات بتن، سال سیزدهم، شماره سوم.

[19] A. ANSI, “ANSI/AISC 360-10. Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction,” Inc. Chicago, 2010.

[۲۰] پویان فخاریان، همکاران، ارائه مدل پیشبینی مقاومت ستونهای با مقاطع مربع یا مستطیل محصور شده با الیاف پلیمری (FRP)

## **Prediction of the interlayer shear strength of SCS panels with corrugated – strip shear connectors using gene expression programming algorithm**

**Seyed Hashem Khatibi**

**Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.**

**Hamed Ghohani Arab\***

**Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.**

**Mahmoud Miri**

**Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.**

### **Abstract**

Today, construction of large structures is growing quickly. For this reason, it is necessary to find the material with a rather low weight and high strength. For this purpose, Steel-Concrete-Steel (SCS) sandwich structures were proposed. SCS structures are composed of two steel layers and one concrete layer. Due to their low weight and high strength and flexibility, they have become popular among engineers. In the present research, first, three specimens of push-out test of strip shear connector were modeled and validated using ABAQUS finite elements software. Then, since the present equations to predict the shear strength of the shear connectors are complicated and are not so precise, the authors proposed an equation taking the effects of different geometrical parameters and the concrete's compressive strength into account. For this purpose, using the experimental design, 17 specimens were designed and modeled. Then, an equation was proposed using the Genetic Expression Programming Algorithm (GEP) to predict the system's shear strength. Finally, the performance of the proposed equation was evaluated using the error parameters.

**Keywords:** shear strength, corrugated-strip shear connectors, GEP, SCS structures, gene expression programming algorithm.

---

\* Corresponding Author: ghohani@eng.usb.ac.ir

