



Research Article

Formulation of shear capacity of honeycomb beams using standard genetic programming technique

Sayyd Hadi Vafae^{1*}, Reza Babaei Semiromi²

1*-PHD Student Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood , Iran.

2-Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Received: 17 December 2024; Revised: 14 January 2025; Accepted: 16 January 2025; Published: 19 February 2025

Abstract

Conducting laboratory studies to determine the shear capacity of honeycomb beams is very time-consuming and costly. Therefore, the necessity of providing design models that can provide accurate estimates of the shear capacity of honeycomb beams without the need to conduct laboratory studies is well felt. This paper has examined a very new method called Standard Genetic Programming (SGP) for the formulation of the shear capacity of honeycomb beams. Laboratory results available in the technical literature have been used to develop SGP models. The new design models presented formulate the shear capacity of honeycomb beams in terms of geometric and mechanical characteristics of honeycomb beams. In order to obtain optimal models, extensive trial and error has been carried out using the parameters affecting the shear capacity of honeycomb beams. The role of the effective parameters in predicting the shear capacity of honeycomb beams has been discussed and investigated using sensitivity analysis. The presented model has been compared with other models available in the technical literature, and the possibility of using SGP models as a reliable tool for predicting the shear capacity of honeycomb beams has been investigated..

Keywords: *Honeycomb beam, shear capacity, standard genetic programming, formulation*

Cite this article as: Vafae, S. H. and Babaei Semiromi, R. (2025). Formulation of shear capacity of honeycomb beams using standard genetic programming technique. *Civil and Project*, 6(12), -. [doi: 10.22034/cpj.2025.494512.1330](https://doi.org/10.22034/cpj.2025.494512.1330)

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: hady.vafaei@gmail.com



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

فرمولاسیون ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری با استفاده از تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک استاندارد

سید هادی وفائی^{۱*}، رضا بابایی سمیرمی^۲

*۱- دانشجوی دکتری، واحد شاهرود، دانشگاه آزاداسلامی، شاهرود، ایران.
۲- گروه مهندسی عمران، واحدشاهرود، دانشگاه آزاداسلامی، شاهرود، ایران.

تاریخ دریافت ۲۷ آذر ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۲۵ دی ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۲۷ دی ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ اسفند ۱۴۰۳

چکیده

انجام مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. لذا، ضرورت ارائه مدل‌های طراحی که بتوانند بدون نیاز به انجام مطالعات آزمایشگاهی تخمین‌های دقیقی از ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری به دست دهند به‌خوبی احساس می‌شود. این مقاله به بررسی روش بسیار جدیدی بنام برنامه‌نویسی ژنتیک استاندارد (SGP) برای فرمولاسیون ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری پرداخته است. نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی برای بسط مدل‌های SGP مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های طراحی جدید ارائه‌شده، ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری را برحسب مشخصات هندسی و مکانیکی تیرهای لانه‌زنبوری فرمول‌بندی می‌کنند. به‌منظور به دست آوردن مدل‌های بهینه سعی و خطای گسترده‌ای با استفاده از پارامترهای مؤثر بر ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری صورت گرفته است. نقش پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری با استفاده از آنالیز حساسیت مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. مدل ارائه‌شده با سایر مدل‌های موجود در ادبیات فنی مقایسه شده‌اند و امکان استفاده از مدل‌های SGP به‌عنوان ابزاری قابل اطمینان برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری مورد بررسی قرار گرفته است. بهترین مدل‌های SGP با استفاده از پارامترهای ورودی e و $tw \times F_{yw} h dg$ بسط داده شده‌اند. دقت بالای مدل‌ها نشانگر این مهم است که این پارامترها نماینده مناسبی از مشخصات هندسی و مکانیکی تیر لانه‌زنبوری برای پیش‌بینی ظرفیت برشی آن می‌باشند. مدل‌های ارائه‌شده می‌توانند برای کنترل اعتبار نتایج آزمایشگاهی به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، در شرایطی که امکان انجام مطالعات آزمایشگاهی نباشد، این مدل‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای تخمین ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری تلقی شوند.

کلمات کلیدی:

تیر لانه‌زنبوری، ظرفیت برشی، برنامه‌نویسی ژنتیک استاندارد، فرمولاسیون

۱- مقدمه

تیرهای لانه‌زنبوری ابتدا در سال ۱۹۱۰ مورد استفاده قرار گرفتند و سپس در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی به‌عنوان تیرهای سقف، در جمهوری چک طراحی و تولید شدند (Aglan & Redwood, 1974). اولین مطالعات در زمینه بسط روش‌های ارتجاعی و مومسان برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری در سال ۱۹۴۲ و اوایل دهه ۱۹۷۰ انجام شد تیرهای لانه‌زنبوری اغلب از مقاطع I شکل تهیه می‌شوند. این‌گونه تیرها در طول خود دارای حفره‌های توخالی (در جان) هستند که به لانه زنبور شبیه است؛ به همین سبب به این‌گونه تیرها لانه‌زنبوری می‌گویند. یکی از مهم‌ترین مزایای تیرهای لانه‌زنبوری در مقایسه با سایر مقاطع استاندارد ایجاد ممان اینرسی نسبتاً خوب آن حول محور قوی تیر (X) می‌باشد که به سبب ایجاد فاصله بال‌ها از محور خنثی و افزایش ارتفاع تیر می‌باشد؛ بنابراین مقاومت خمشی تیر که مهم‌ترین نقش آن نیز می‌باشد افزایش یافته، همچنین سختی آن نیز بیشتر می‌گردد (Dougherty, 1993; Zirakian & Showkati, 2006).

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های عملکردی تیرهای لانه‌زنبوری ظرفیت برشی آن‌ها می‌باشد. به علت پیچیدگی در رفتار ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری، مدل‌های محدودی برای پیش‌بینی آن ارائه شده است (Knowles, 1985). برنامه‌نویسی ژنتیک استاندارد (کلاسیک) (SGP)^۱ (Koza, 1992). شاخه در حال رشد تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌باشد. SGP با الهام از قوانین تکامل ژنتیک طبیعی به‌طور اتوماتیک برنامه‌های کامپیوتری تولید می‌کند. این شاخه جدید محاسبات تکاملی در حقیقت گستره‌ای از الگوریتم ژنتیک (GA)^۲ است با این تفاوت که بجای رشته‌های دودویی ثابت مدل‌های کامپیوتری تولید می‌کند. برنامه‌های کامپیوتری نوشته‌شده توسط SGP به زبان‌های رایج مانند فرترن نمی‌باشد بلکه به زبان گمنام هوش مصنوعی برنامه‌نویسی تابعی^۳ (LISP) می‌باشد که برخلاف زبان‌های دیگر از اصطلاحات استفاده می‌کند. مزیت بسیار قابل توجه SGP در مقایسه با روش‌های متداول آماری و سایر تکنیک‌های یادگیری ماشین توانایی آن در به وجود آوردن معادلات ساده کاربردی بدون فرض اولیه ساختار مدل می‌باشد. در مقایسه با ANNs، کاربردهای SGP برای حل مسائل مهندسی عمران جدید و محدود به زمینه‌های بسیار کمی می‌باشد (Baykasoglu et al., 2009; Gandomi et al., 2011b).

استفاده از SGP باعث کاهش قابل توجه زمان تحلیل مسائل پیچیده و هزینه سنگین آن می‌شود. استفاده از SGP و شاخه‌های آن در چند سال اخیر برای تحلیل انواع مختلف مسائل مهندسی به‌شدت گسترش یافته است. به‌ویژه اینکه این روش‌ها کاربرد بسیار موفقیت‌آمیزی در تعدادی از مسائل مهندسی عمران داشته و توانسته‌اند به‌آسانی بسیاری از مسائل پیچیده را حل نموده و مشکلات ناشی از انجام آزمایش‌های پیشرفته و پرهزینه را برطرف سازد. استفاده از این روش به‌عنوان یک ابزار قدرتمند مهندسی باعث کاهش قابل توجه زمان تحلیل مسائل پیچیده و هزینه سنگین آن می‌شود. اگرچه از شبیه‌سازی دقیق فرایند تکامل از دیدگاه مهندسی دور هستیم با این حال SGP و شاخه‌های آن حقیقتاً راه‌حل‌های مناسبی را برای مسائل مختلف در حوزه‌های تحقیقاتی مختلف در دنیای علوم و فنی- مهندسی ارائه نموده‌اند. اولین کاربرد SGP در حل مسائل مهندسی عمران مربوط به بهینه‌سازی طراحی‌های سازه‌ای می‌باشد که توسط سوه و یانگ^۴ (۲۰۰۰) در سال ۲۰۰۰ میلادی ارائه شده است. از آن زمان تاکنون SGP و شاخه‌های آن در مقایسه با ANN به‌ندرت در مسائل مهندسی عمران و به‌خصوص سازه به‌کاررفته‌اند. برخی از عمده‌ترین موارد کاربرد SGP آن عبارت‌اند از پیش‌بینی طراحی خودکار بهینه سازه‌ها (Yang & Soh, 2002)، مشخصات بتن با مقاومت بالا (Baykasoglu et al., 2009)، ارزیابی جابجایی‌های جانبی ناشی از روانگرایی در حین زلزله (Javadi et al., 2006)، آنالیز حرکات زمین در اثر معدنکاری (Lia et al., 2007)، پیش‌بینی مقاومت پیچشی تیرهای بتنی مسلح (Fiore et al., 2012)، فرمولاسیون تنش کم‌انرژی اعضا فولادی نورد سرد شده (Pala, 2008)، فرمولاسیون ظرفیت پیچشی تیرهای بال‌پهن (Cevik, 2007b)، فرمولاسیون مقاومت لهیدگی جان تیر صفحات فولادی نورد سرد شده (Cevik, 2007a)، مدل‌سازی افزایش مقاومت بتن‌های FRP و CFRP (Cevik et al., 2010; Cevik, 2011).

¹ Standard Genetic Programming

² Genetic Algorithm

³List Processing Functional Programming Language

⁴ Soh, C.K., Yang

مطالعات محدودی در زمینه مدل‌سازی رفتار تیرهای لانه‌زنبوری انجام شده است. در تحقیقات انجام شده توسط ناولز (Kerdal & Nethercot, 1984; Knowles, 1991) مشخص شد که ظرفیت گسیختگی پیش‌بینی شده توسط روش "ستون در فشار" نتایج قابل قبولی به دست خواهد داد. برای پیش‌بینی ظرفیت گسیختگی تیرهای لانه‌زنبوری مدل دیگری در استاندارد بریتانیا (BS 449) ارائه شده است. این مدل تنها برای تیرهای لانه‌زنبوری که از پروفیل‌های موجود در بریتانیا ساخته شده‌اند قابل استفاده است (Knowles, 1991).

تحلیل و طراحی این تیرهای لانه‌زنبوری با اعمال مبانی مربوط به روش نوین ضرایب بار و مقاومت از اهمیت برخوردار است. شوکتی (۱۳۷۹؛ ۱۳۸۱) با بررسی همه‌جانبه نکات AISC-LRFD و امکان اعمال آن‌ها در خصوص مقاطع خمشی لانه‌زنبوری، راه برای طراحی آن‌ها به روش دوران بازنموده است. در مورد کمانش جان در تیرهای لانه‌زنبوری با جان نازک زور و ردود (۱۹۹۶) تحقیقی انجام داده‌اند که به منظور مطالعه کمانشی جان بین سوراخ‌ها تیرهای لانه‌زنبوری با مشخصات مقطع متفاوت و با طول یکسان را که تا مرحله شکست بارگذاری شده‌اند تست کرده است که در بسیاری از موارد کمانش جان رخ داده است. برای پیش‌بینی بارهای کمانشی از روش آنالیز المان محدود کمانش جان استفاده شده است. کمانش جانبی-پیچشی جان یکی از انواع گسیختگی تیر لانه‌زنبوری می‌باشد که توسط محمودیان (۱۳۷۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. دل پیشه (۱۳۸۲) در مورد بررسی آزمایشگاهی کمانش پلاستیک خمشی تیرهای لانه‌زنبوری تحت اثر زوج بار متمرکز با نارسائی‌های هندسه اولیه پرداخته شده است. این تحقیق در قالب کار آزمایشگاهی با تست ۱۲ نمونه صورت گرفته است، نمونه‌ها در مرحله الاستیک چندین مرحله بارگذاری و باربرداری شده‌اند، کرنش نرمال و کرنش برشی و خیز قائم و همچنین خیز جانبی اندازه‌گیری شده‌اند.

شوکتی و محب خواه (۱۳۸۲) و یوسفی (۱۳۸۲) به بررسی ناپایداری تیرهای لانه‌زنبوری در برابر کمانش جانبی-پیچشی، کمانش فشاری مقطع T شکل در محل سوراخ‌ها، کمانش فشاری و برشی در محل جان پر و ضعف برشی جان این تیرها پرداخته‌اند. با فرض اینکه کلیه اجزای تشکیل‌دهنده مقطع تیر لانه‌زنبوری غیر لاغر باشند، تنها تنش، عامل مؤثر در طراحی منظور گردیده است. بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده در رفتار استاتیکی و پایدار تیرهای لانه‌زنبوری معلوم شد که برخی کنترل‌های اضافی تر نسبت به تیرهای معمولی ضروری است. قابل ذکر است که از میان سیستم‌های یادگیری ماشین تنها ANNs برای مدل‌سازی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری بکار رفته‌اند. اخیراً، امریه و ساکا (۲۰۰۵) و قلی زاده و همکاران (۲۰۱۱) از ANNs برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری استفاده کردند. در هر صورت، نتایج حاصل از این مطالعات نقش بسیار مهمی را در شناسایی عوامل مؤثر بر ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری جهت بسط مدل‌ها در این پروژه ایفا خواهند کرد.

ساخت تیرهای لانه زنبوری، موجب افزایش ارتفاع نیمرخ در محل لنگر خمشی حداکثر می گردد و در نتیجه موجب افزایش قابل توجهی در ظرفیت خمشی و کاهش زیادی در خیز تیر می شود. به همین جهت، صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه سازه های فولادی صورت می پذیرد. تیرهای لانه زنبوری دارای مزایای مختلف از جمله سبکی وزن می باشد. با وجود مزایای مزبور، این تیرها مشکلات افزون تری را نسبت به تیرهای نورد شده به همراه دارند که اکثراً در زمینه ناپایداری است. این تیرها باید در برابر کمانش جانبی- پیچشی کنترل شوند. کمانش فشاری مقطع T شکل در محل سوراخ ها، کمانش فشاری و برشی در محل جان پر و ضعف برشی تیرهای لانه زنبوری از جمله مواردی است که افزون بر حالات ناپایداری سایر تیرها بررسی شود بنابراین استفاده از روش SGP به منظور کاهش این اثرات دارای اهمیت می باشد.

پژوهش حاضر اولین تحقیق در ادبیات فنی در زمینه فرمولاسیون ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری با استفاده از روش SGP می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی برای بسط مدل‌های SGP استفاده می‌شود. مدل‌های طراحی جدید ارائه شده، ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری را برحسب مشخصات هندسی و مکانیکی تیرهای لانه‌زنبوری فرمول بندی می‌کنند. این مدل‌ها ابزارهای مؤثری برای طراحی‌های تیرهای لانه‌زنبوری خواهند بود.

۲- مواد و روش‌ها

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های عملکردی تیرهای لانه‌زنبوری ظرفیت برشی آن‌ها می‌باشد. انجام آزمایش جهت تعیین ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری همیشه با مشکلات و محدودیت‌هایی همراه است بر اساس تحقیقات انجام شده (Knowles, 198۸)، می‌تواند تابع مشخصات هندسی و مکانیکی تیر به صورت زیر باشد:

$$V \text{ (kN)} = f(d_g, h, t_w, F_{yw}, e) \quad (1)$$

در رابطه فوق پارامترهای به کاررفته به شرح زیر می‌باشد:

d_g : عمق کلی تیر لانه‌زنبوری

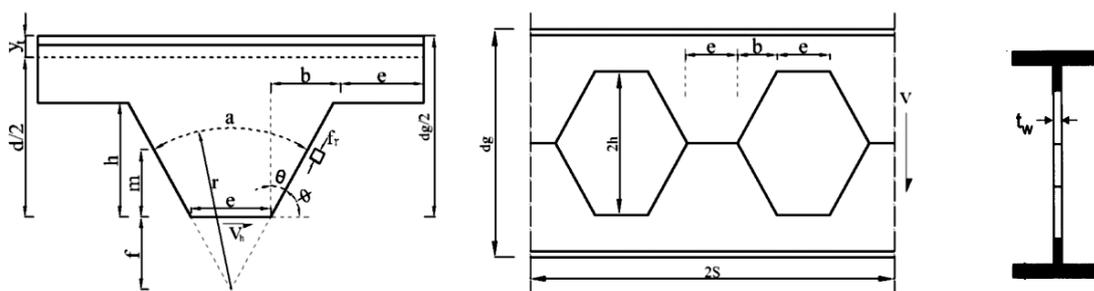
h : برآمدگی عمودی قسمت مایل چشمه

t_w : ضخامت جان تیر

F_{yw} : تنش تسلیم کمینه جان تیر

e : عرض جان در نیمه میانی

پارامترهای مربوط به مشخصات هندسی تیرهای لانه‌زنبوری در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱: مشخصات هندسی تیرهای لانه‌زنبوری

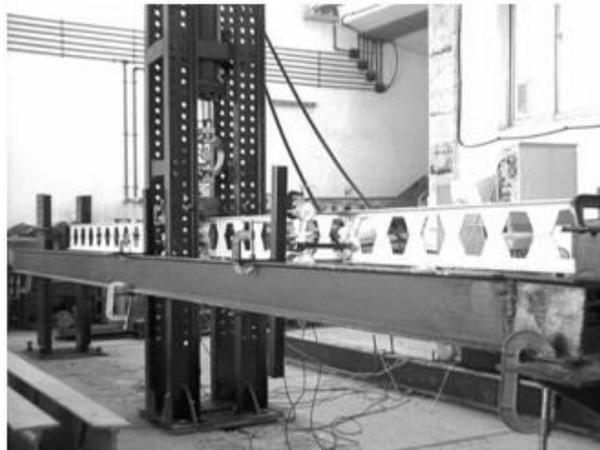
بانک اطلاعاتی گردآوری شده شامل نتایج ۱۴۲ آزمایش باربری تیرهای لانه‌زنبوری انجام گرفته توسط زارور و ردوود^۵ (۱۹۹۶)، ردوود^۶ (۱۹۹۸) و قلی زاده و همکاران^۷ (۲۰۱۱) می‌باشد.

به منظور انجام آزمایشات، فونداسیون مقاومی در نظر گرفته شده است که بتواند کلیه بارهای مرده از جمله نیروهای تکیه‌گاهی و عکس‌العمل سیستم بارگذاری را به نحو مطلوب به زمین منتقل کند. این کف از صلبیت کافی برخوردار است تا نتایج آزمایش مورد اعتماد باشند. با ایجاد یک سیستم مناسب و پر مقاومت برای کف آزمایشگاه سازه، از نشست و حرکت تکیه‌گاه‌ها و شاسی بارگذاری جلوگیری شده است. برای آزمایش کردن نمونه‌ها از جک بارگذاری استفاده شده است. این جک دارای سیستم هیدرولیکی بوده و قادر است بار استاتیکی نقطه‌ای تا معادل ۶۰ تن وارد کند (شکل (۲)).

⁵ Zaarour and Redwood

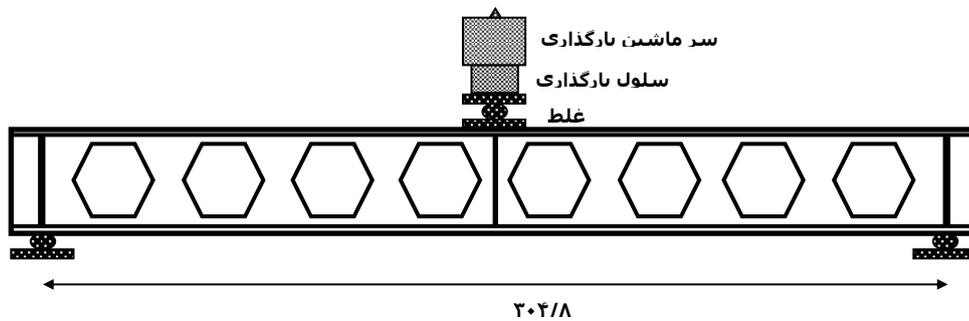
⁶ Redwood

⁷ Gholizadeh et al

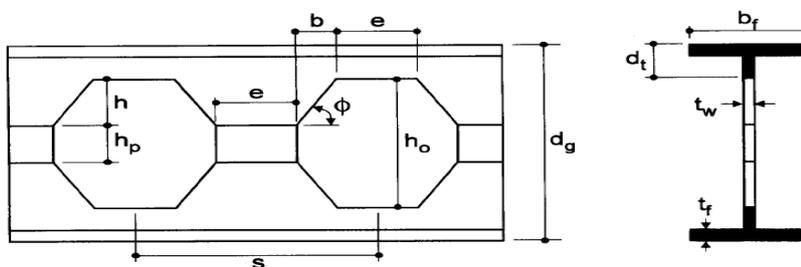


شکل ۲: نمای کلی آزمایش بارگذاری تیرهای لانه زنبوری

آرایش آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. ترکیب بندی و نشان گذاری های مرتبط در شکل (۴) نشان داده شده اند.



شکل ۳: آرایش آزمایش بارگذاری تیرهای لانه زنبوری



شکل ۴: ترکیب بندی و نشان گذاری تیرهای لانه زنبوری

در شکل (۴) پارامترهای به کاررفته به شرح زیر می باشند:

d_g : عمق کلی تیر لانه زنبوری

d_t : عمق کلی قسمت T شکل بالا و پایین چشمه (بازشدگی)

h : برآمدگی عمودی قسمت مایل چشمه

h_o : ارتفاع کلی چشمه

h_p : ارتفاع صفحه میانی

b_f : عرض بال

b: برآمدگی افقی قسمت مایل چشمه

t: ضخامت جان تیر

s: فاصله مرکز تا مرکز چشمه‌ها

t_w: ضخامت بال تیر

F_{yw}: تنش تسلیم کمیننه جان تیر

e: عرض جان در نیمه میانی

ترکیب‌های بهینه متفاوتی از پارامترهای ورودی که برای بسط مدل‌های SGP در نظر گرفته شده‌اند در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: مدل‌های SGP بسط داده شده با ترکیب‌های مختلفی از ورودی‌ها

الگوی مدل	ورودی‌ها
۱	d _g , h, t _w
۲	d _g , h, t _w , F _{yw}
۳	d _g , h, t _w × F _{yw}
۴	d _g , h, t _w , e
۵	d _g , h, t _w × F _{yw} , e
۶	d _g , h, t _w , F _{yw} , e

به منظور آنالیز SGP، کد نویسی‌های مربوطه در برنامه MATLAB و با اعمال تغییرات فراوان در کد GPLAB انجام شده است. در این تحقیق، عملگرهای و توابع اصلی ریاضی برای به دست آوردن مدل‌های بهینه استفاده شده‌اند. مجموعاً ۷۲=۲×۲×۳×۳ ترکیب متفاوتی از پارامترها در نظر گرفته شده است. کلیه این ترکیبات امتحان شده است؛ بنابراین مجموع اجراهای برنامه معادل ۴۳۲ = (ترکیب‌های مختلفی از ورودی‌ها) ۶×۷۲ بوده است. در هر مورد، اجرای برنامه تا جاییکه بهبودی در عملکرد مدل‌ها دیده نشد ادامه یافت و یا تا جاییکه برنامه به صورت خودکار قطع گردید.

جدول ۲: تنظیم پارامترها در الگوریتم SGP

تنظیمات	پارامتر
100, 500, 1000	جمعیت
8, 12	عمق بیشینه برنامه (درخت)
1000, 2000, 3000	تعداد نسل‌ها
10, 95	نرخ تزویج (درصد)
10, 95	نرخ جهش (درصد)
بهترین برنامه	مکانیزم بقای برنامه
+, -, ×, /, √, ^2, Log, Exp, sin, cos	توابع

برای تحلیل، اطلاعات موجود به سه دسته آموزش^۸، اعتبار سنجی^۹ و آزمایش^{۱۰} تقسیم شده‌اند. داده‌های آموزش برای آموزش الگوریتم استفاده شده‌اند. داده‌های صحت سنجی برای مشخص کردن قابلیت عمومی‌سازی مدل‌ها بر روی داده‌هایی که شبکه بر روی آن‌ها آموزش ندیده است استفاده شده‌اند. داده‌های آزمایش نیز برای بررسی عملکرد مدل‌ها بر روی داده‌هایی که هیچ نقشی در ساخت مدل‌ها نداشته‌اند استفاده شده‌اند. از میان ۱۴۲ داده ارائه شده در ادبیات فنی، ۱۰۰ داده برای آموزش (۷۰٪)، ۲۱ داده (۱۵٪) برای اعتبار سنجی و ۲۱ داده (۱۵٪) برای آزمایش مدل‌ها به کار رفته‌اند. این دسته‌بندی نیز بر اساس بررسی‌ها و پیشنهاد محققان بسیاری صورت گرفته است (Shahin et al., 2001; 2009).

به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شده از ضریب همبستگی^{۱۱} (R)، میانگین کلی خطا^{۱۲} (MAE) و میانگین مربعات خطا^{۱۳} (RMSE) استفاده شده است. R، MAE و RMSE از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - t_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)^2}{n}} \quad (4)$$

در روابط فوق t_i و h_i به ترتیب مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای i امین خروجی هستند. \bar{h}_i و \bar{t}_i به ترتیب میانگین خروجی واقعی و پیش‌بینی شده و n شماره نمونه است.

۳- یافته‌ها

بر اساس آنالیزهای انجام شده، مدل‌های با الگوی شماره ۵ که ۴ متغیر ورودی ($d_g, h, F_{yw} \times t_w$ و e) در آن به کار رفته بهترین مدل‌های SGP برای پیش‌بینی V می‌باشد. در این مطالعه، دو مدل SGP I و SGP II ارائه شده‌اند. مدل SGP I برای حالتی است که از توابع ساده تری (Exp, Log, $\sqrt{\quad}$, /, \times , -, +) برای بسط مدل استفاده شده است و مدل SGP II برای حالت پیچیده تری است که توابع مثلثاتی (sin و cos) نیز برای بسط مدل در نظر گرفته شده‌اند. خروجی MATLAB برنامه‌هایی با ساختار درختی به زبان LISP می‌باشد که برای مدل‌های SGP I و SGP II به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند.

⁸ Training

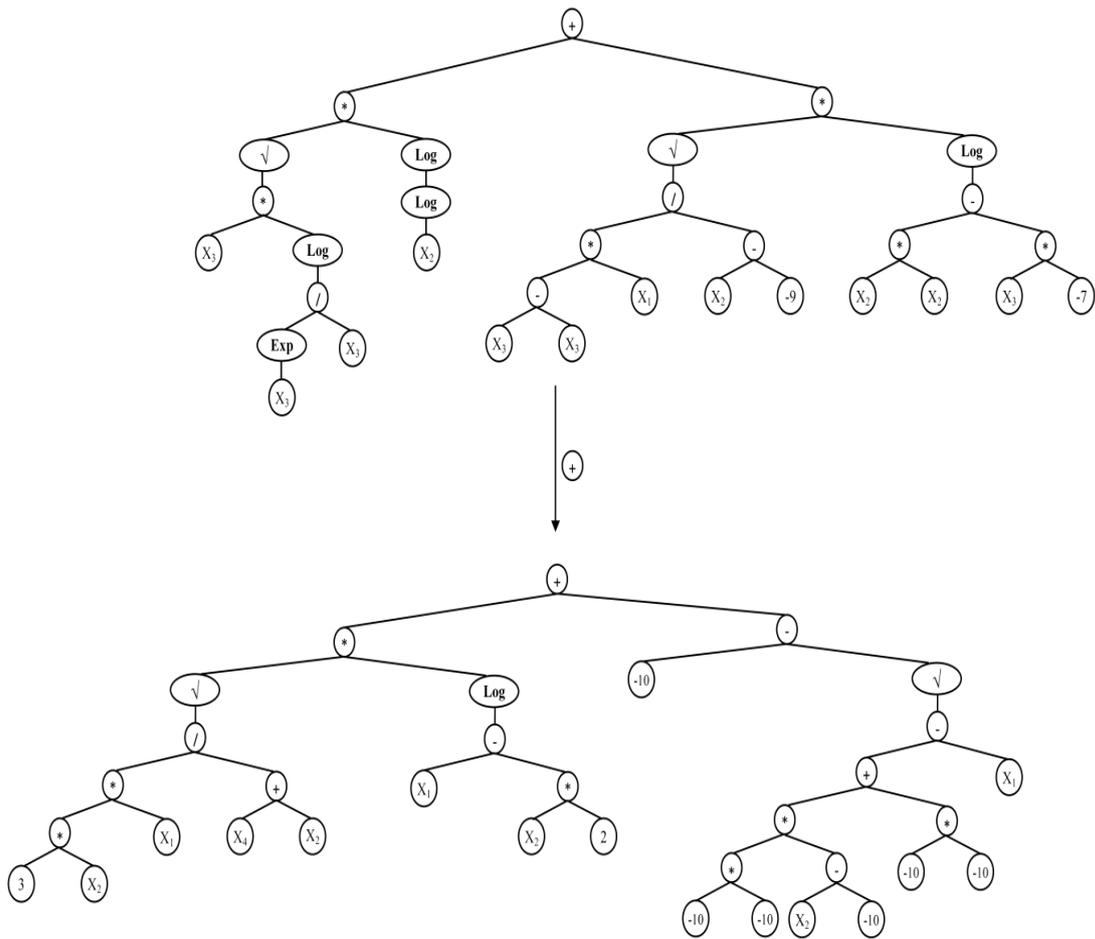
⁹ Validation

¹⁰ Testing

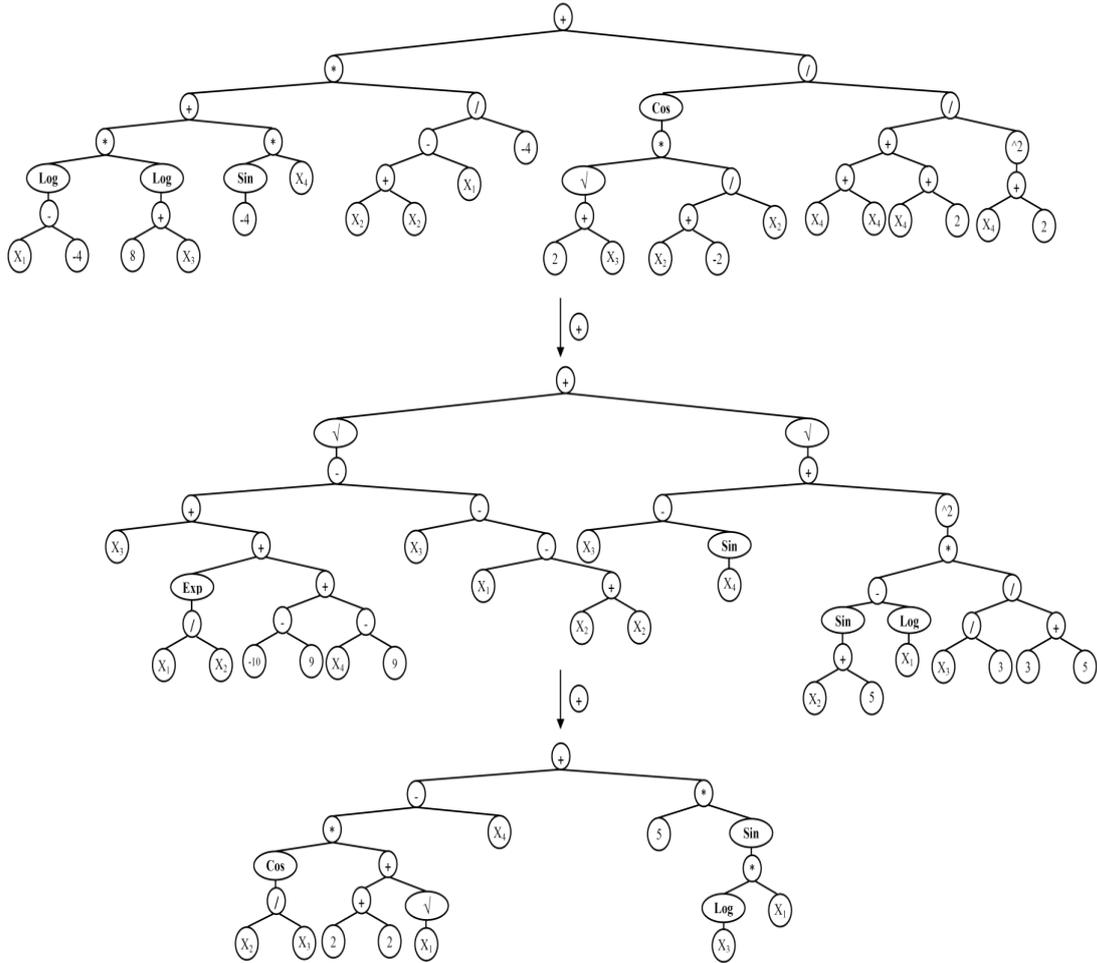
¹¹ Correlation Coefficient

¹² Mean Absolute Error

¹³ Root of Mean Squared Error



شکل ۵: ساختار درختی مدل SGP I برای پیش‌بینی ظرفیت باربری تیرهای لانه‌زنبوری (X_1 تا X_4 به ترتیب نماد پارامترهای d_g ، h ، $t_w \times F_{yw}$ و e می‌باشند).



شکل ۶: ساختار درختی مدل SGP II برای پیش‌بینی ظرفیت باربری تیرهای لانه‌زنبوری (X1 تا X4 به ترتیب نماد پارامترهای dg, h, e و tw×Fyw می‌باشند).

برنامه‌های درختی حاصل از آنالیز SGP را می‌توان به معادلات ساده‌تری تبدیل کرد. به‌منظور تسهیل استفاده، با تفسیر ساختار درختی برنامه‌ها از چپ به راست، معادلات پیش‌بینی ظرفیت برشی به‌صورت تابعی تبدیل‌شده‌اند. سپس، روابط به‌دست‌آمده توسط دستور simple در MATLAB نیز ساده‌شده‌اند. درنهایت، فرمولاسیون V با استفاده از نتایج ۱۴۲ آزمایش باربری ارائه‌شده در ادبیات فنی به شرح ذیل می‌باشد:

$$V_{SGP I}(kN) = \text{Log}(\text{Log}(h)) \sqrt{t_w F_{yw} \text{Log} \left(\frac{\exp(t_w F_{yw})}{t_w F_{yw}} \right)} - \sqrt{(100h - d_g + 1100) + \text{Log}(d_g - 2h)} \sqrt{\frac{3d_g h}{h + e}} + \text{Log}(h^2 + 7t_w F_{yw}) \sqrt{\frac{2d_g t_w F_{yw}}{h + 9}} - 10 \quad (5)$$

$$V_{SGP II}(kN) = 0.25d_g - 0.5h - 0.243e + 5 \sin(d_g \text{Log}(t_w F_{yw})) + \cos\left(\frac{h}{t_w F_{yw}}\right) (\sqrt{d_g} + 4) + \sqrt{d_g - 2h + e + \exp\left(\frac{d_g}{h}\right) - 28} + \sqrt{t_w F_{yw} - \sin(e) + \frac{(t_w F_{yw})^2 (\sin(h + 5) - \text{Log}(d_g))^2}{576}} + \text{Log}(d_g + 4) \text{Log}(t_w F_{yw} + 8) + \frac{(e + 2)^2 \cos\left(\frac{(h - 2)\sqrt{t_w F_{yw} + 2}}{h}\right)}{3e + 2} \quad (6)$$

در رابطه (۶):

d_g : عمق کلی تیر لانه‌زنبوری (mm)

h : برآمدگی عمودی قسمت مایل چشمه (mm)

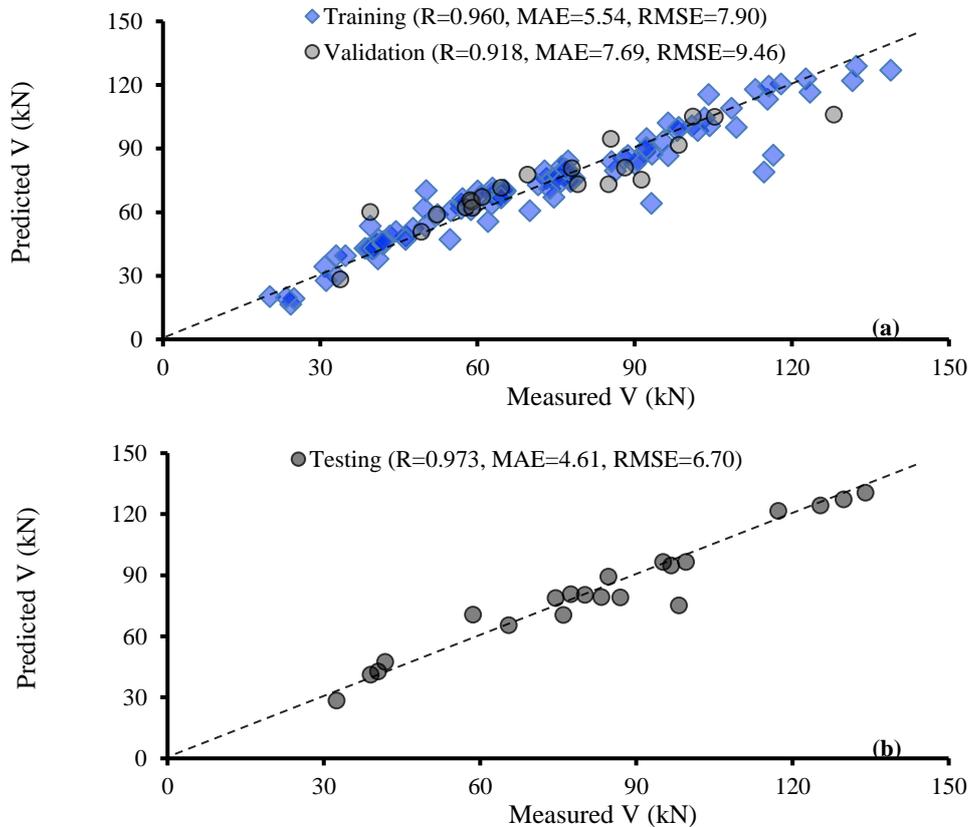
t_w : ضخامت جان تیر (mm)

F_{yw} : تنش تسلیم کمینه جان تیر (MPa)

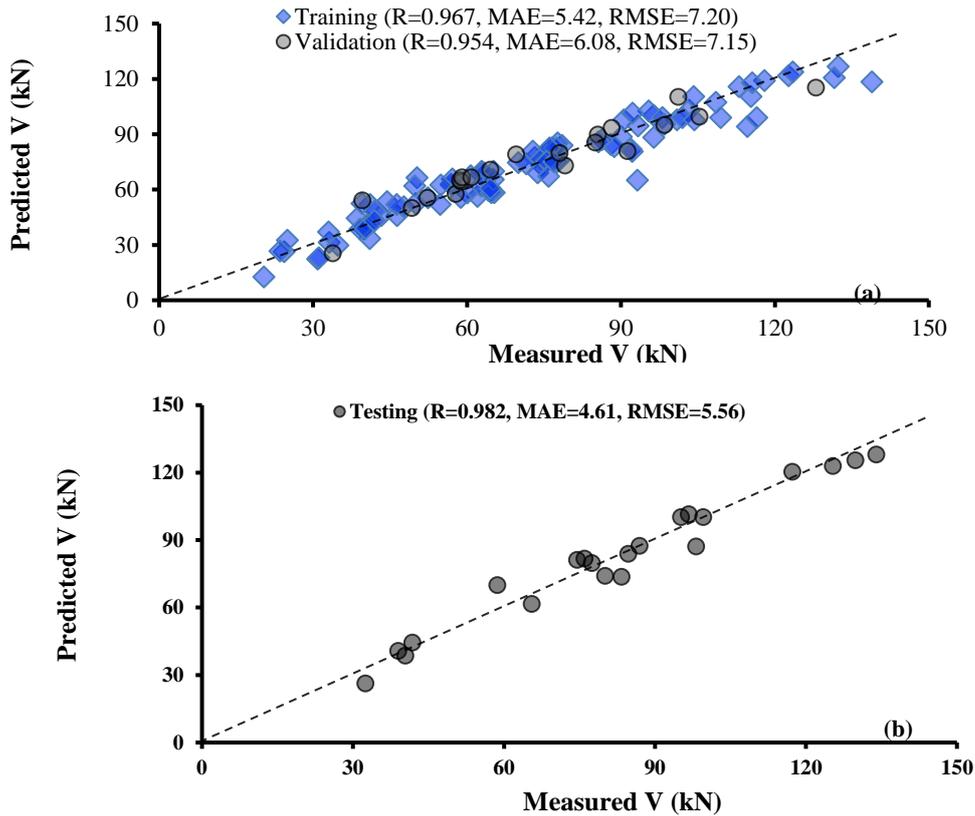
e : عرض جان در نیمه میانی (mm)

همان‌طور که مشخص است مدل SGP I ساختار ساده‌تری نسبت به مدل SGP II دارد. در ادامه یکی از نمونه‌ها برای آزمایش مدل انتخاب شده است. مقادیر d_g ، h ، $t_w \times F_{yw}$ و e این نمونه به ترتیب برابر $۳۸۰/۵۰$ mm، ۶۰ mm، $۱۲۵/۳۱$ MPa*mm و ۵۰ mm می‌باشند و مقدار V مورد نیاز است. با یک جایگذاری ساده در فرمول‌های (۵) و (۶) مقدار V پیش‌بینی شده به ترتیب برابر $۱۲۴/۲۸$ kN و $۱۲۲/۹۶$ kN به دست می‌آید. در این مثال، مقدار V پیش‌بینی شده در تطابق مطلوبی با مقدار واقعی (آزمایشگاهی) ($۱۲۵/۳۷$ kN) قرار دارد (به ترتیب $۰/۸۷\%$ و $۱/۹۲۲\%$ پایین‌تر از مقدار واقعی).

نتایج پیش‌بینی شده به وسیله بهترین مدل‌هایی که توسط SGP به وجود آمده‌اند برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش در شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شده‌اند. طبیعتاً، هر چه در این شکل‌ها تمرکز نقاط در محل خط قطری بیشتر باشد مقادیر پیش‌بینی و واقعی (آزمایشگاهی) به هم نزدیک‌تر می‌باشند. از شکل (۷) مشاهده می‌شود که مدل اول R بالایی برابر با $۰/۹۶۰$ ، $۰/۹۱۸$ و $۰/۹۷۳$ به ترتیب برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به دست می‌دهد. از شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود که مدل دوم R بالایی برابر با $۰/۹۶۷$ ، $۰/۹۵۴$ و $۰/۹۸۲$ به ترتیب برای داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به دست می‌دهد.

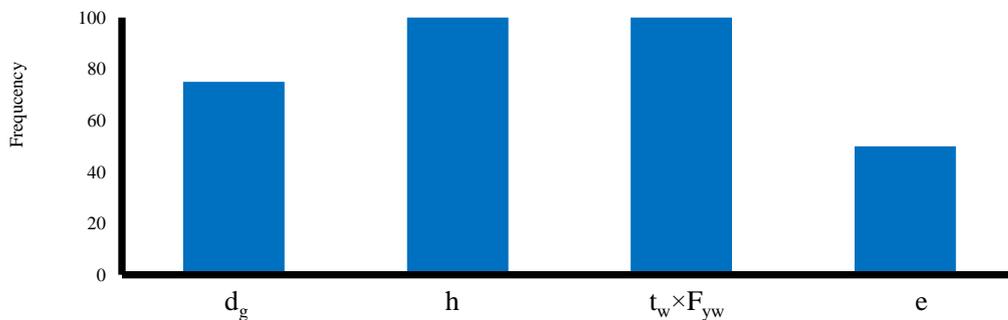


شکل ۷: نتایج پیش‌بینی V بر حسب kN به وسیله مدل اول (SGP I) (رابطه ۵-۷) (الف) داده‌های آموزش و اعتبارسنجی (ب) داده‌های آزمایش



شکل ۸: نتایج پیش‌بینی V برحسب kN به‌وسیله مدل دوم (SGP II) (رابط ۵-۸) (الف) داده‌های آموزش و اعتبار سنجی (ب) داده‌های آزمایش

تحلیل حساسیت به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر اهمیت پارامترهای ورودی مؤثر انتخاب‌شده (d_g , h , $t_w \times F_{yw}$ و e) برای مدل‌های SGP انجام‌شده است. بدین منظور فرکانس^{۱۴} پارامترهای ورودی به‌دست‌آمده است. مقدار فرکانس معادل ۱۰۰ برای یک ورودی نشان‌دهنده این است که متغیر مربوطه در ۱۰۰ درصد دقیق‌ترین سی برنامه حاصل از SGP ظاهر شده است. این روش در آنالیز حساسیت GP متداول می‌باشد (Gandomi et al., 2011b). مقادیر این فرکانس‌ها برای ورودی‌های مختلف در شکل (۹) نمایش داده‌شده است. با توجه به این نتایج، ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری به $t_w \times F_{yw}$ و h حساس‌تر از سایر ورودی‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است اهمیت پاره‌ترهای d_g , h , $t_w \times F_{yw}$ و e در تعیین ظرفیت برشی در آنالیز SGP بیشتر مشخص گردیده بود و تحلیل حساسیت صرفاً به‌منظور مطالعه مقایسه‌ای مابین پارامترهای نهایی انتخاب‌شده صورت گرفته است.



شکل ۹: اهمیت پارامترهای ورودی مؤثر انتخاب‌شده در مدل‌های SGP

¹⁴ Frequency

بر اساس یک فرضیه منطقی، اسمیت (۱۹۸۶) معیار زیر را برای بررسی عملکرد مدل‌ها ارائه کرده است:

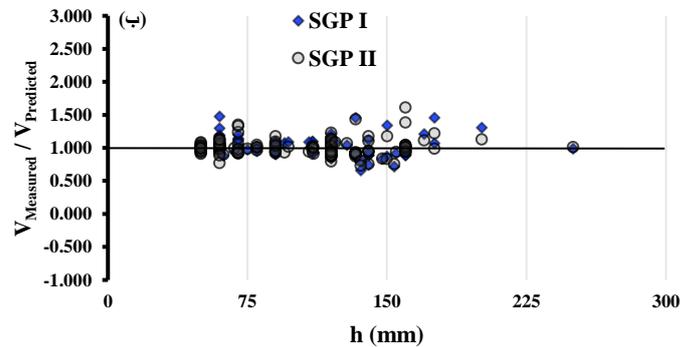
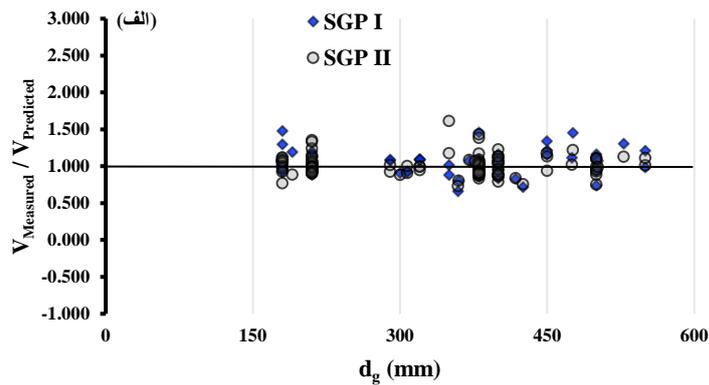
اگر ضریب همبستگی (R) برای مدلی بزرگ‌تر از $0.8 < R < 1$ باشد، همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده قوی می‌باشد.

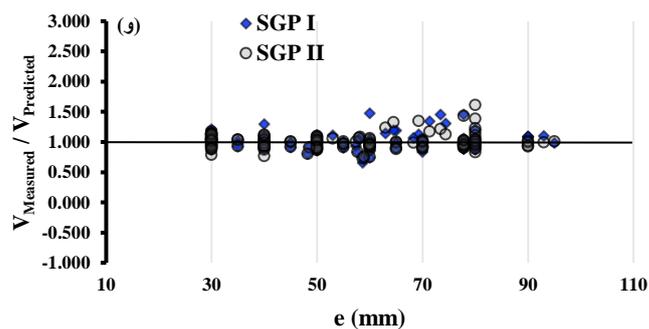
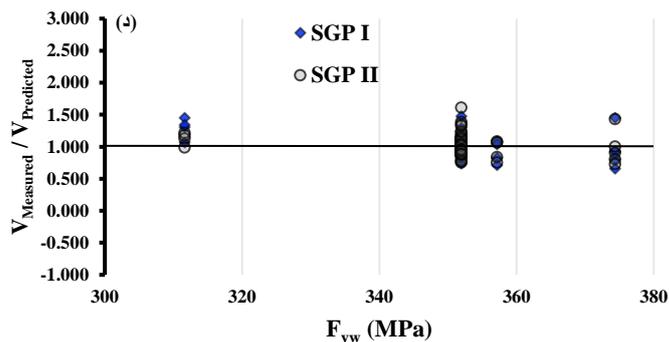
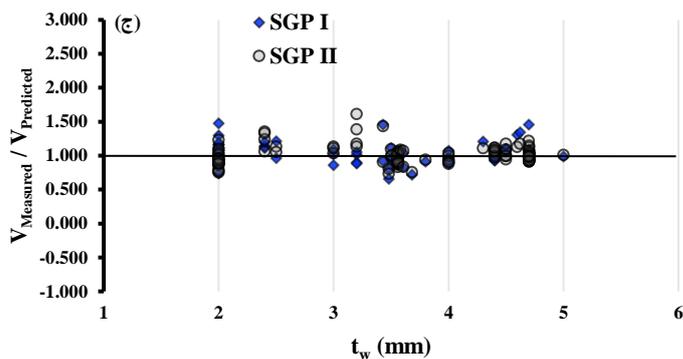
اگر R برای مدلی بین $0.2 < R < 0.8$ باشد، همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده وجود دارد.

اگر R برای مدلی کمتر از $R < 0.2$ باشد، همبستگی ضعیفی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده وجود دارد.

در تمامی حالات مقادیر خطا مانند MAE و RMSE بایستی کمینه باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده می‌شود مدل‌های SGP دقت بسیار بالایی برای داده‌های آموزش و اعتبار سنجی و آزمایش دارند. در تمامی موارد، مدل دوم (SGP II) که توابع مثلثاتی (sin و cos) نیز برای بسط آن در نظر گرفته شده‌اند نتایج بهتری از مدل اول (SGP I) که با توابع ساده‌تر (+, -, ×, /, √, Log, Exp) بسط داده شده است ارائه می‌کند.

برای آنالیز بیشتر، نتایج مدل‌های SGP I و SGP II، نسبت مقادیر واقعی به پیش‌بینی شده در برابر پارامترهای ورودی مؤثر انتخاب شده ($d_g, h, d_g \times F_{yw}, t_w$ و e) رسم شده و در شکل (۱۰) نمایش داده شده‌اند. هر چه پراکندگی در این شکل‌ها افزایش می‌یابد، دقت مدل‌ها کاهش می‌یابد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مدل‌های ارائه شده با کمترین میزان پراکندگی دقت بسیار بالایی دارند. در موارد h و t_w پراکندگی اندکی با افزایش این پارامترها کاهش می‌یابد.





شکل ۱۰: نسبت مقادیر واقعی ظرفیت برشی تیرهای لانه زنبوری به مقادیر پیش‌بینی شده در برابر پارامترهای طراحی

اخیراً، روی و روی (۲۰۰۸) شاخص تعیین R_m را برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها معرفی کرده‌اند. قید به ازای $R_m > 0.5$ ارضا می‌شود. همچنین، مربع ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی (R_0^2) و مربع ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی به مقادیر پیش‌بینی شده ($R_0'^2$) بایستی نزدیک ۱ باشد. معیارهای اعتبارسنجی ذکر شده و نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل‌های SGP I و SGP II کلیه شرایط را ارضا می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر اعتبار بسیار بالای مدل‌های ارائه شده می‌باشد.

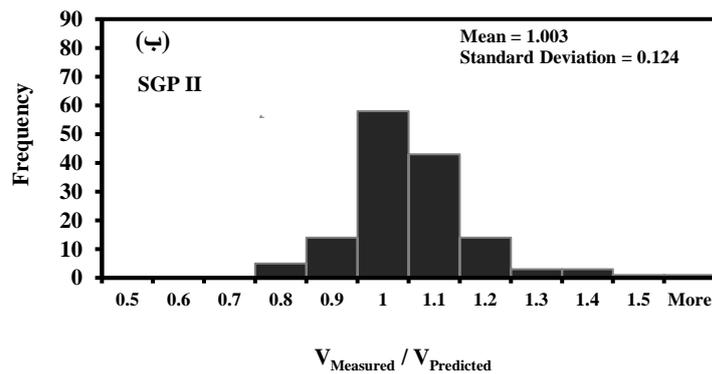
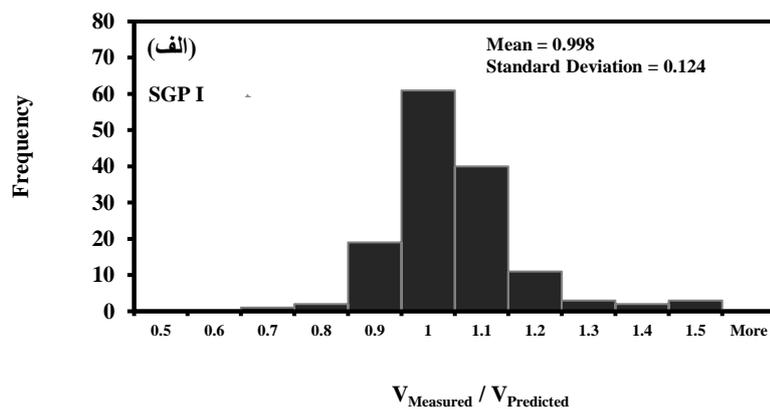
جدول ۲: پارامترهای مربوط به اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده

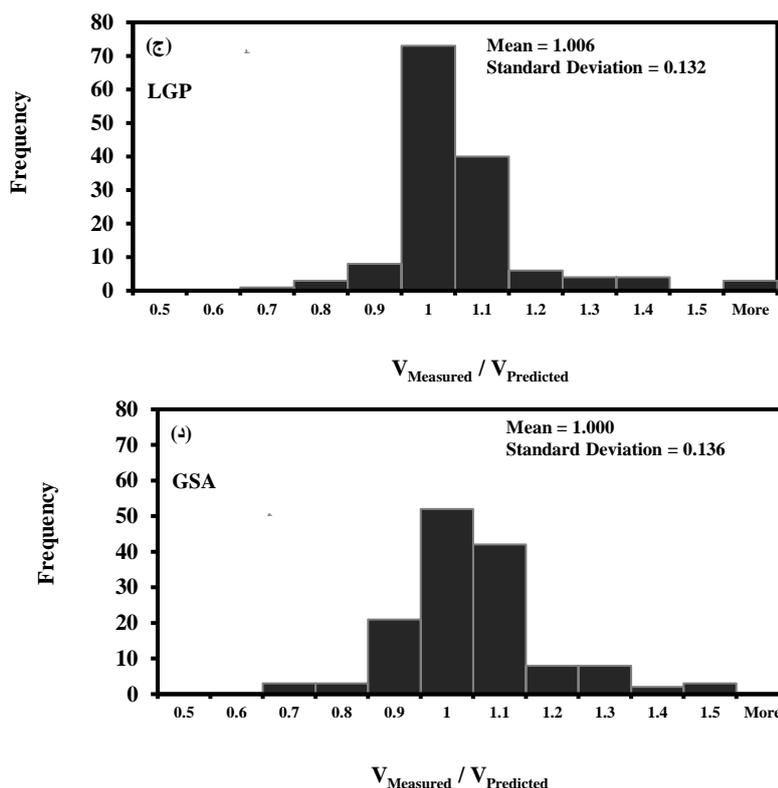
آیتم	رابطه	شرایط	SGP II	SGP I
۱	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}}$	$R > 0.8$	0.982	0.973
۲	$k = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i \times t_i)}{h_i^2}$	$0.85 < K < 1.15$	1.004	1.010
۳	$k' = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i \times t_i)}{t_i^2}$	$0.85 < K' < 1.15$	0.992	0.984
۴	$m = \frac{R^2 - Ro^2}{R^2}$	$ m < 0.1$	-0.038	-0.054
۵	$n = \frac{R^2 - Ro'^2}{R^2}$	$ n < 0.1$	-0.037	-0.053
۶	$R_m = R^2 \times (1 - \sqrt{ R^2 - Ro^2 })$	$R_m > 0.5$	0.779	0.732
۷	$Ro^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - h_i^o)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_i)^2}$ $h_i^o = k \times t_i$		1.000	0.999
۸	$Ro'^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i^o)^2}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2}$ $t_i^o = k' \times h_i$		0.999	0.998

عملکرد مدل‌های LGP، GP/SA و SGP بر روی داده‌های آزمایش در جدول (۳) نمایش داده شده است. علاوه بر این، شکل (۱۱) نمودارهای هیستوگرام نسبت مقادیر واقعی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری به مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های LGP و GSA را برای کل داده‌ها نشان می‌دهند. مقادیر متوسط (Mean) و انحراف معیار (Standard Deviation) نسبت‌های مقادیر واقعی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری به مقادیر پیش‌بینی شده در شکل‌ها نمایش داده شده است. هر چه تمرکز نمودارها در اطراف عدد ۱ بیشتر باشد نشان‌دهنده تطابق بالاتر مقادیر پیش‌بینی با مقادیر آزمایشگاهی ($V_{Measured} / V_{Predicted} = 1$) و در نتیجه دقت بالاتر مدل است. بدیهی است هرچه مقادیر متوسط به عدد ۱ نزدیک‌تر و انحراف معیار کمتر باشد مدل، دقت بالاتری خواهد داشت. همان‌طور که در شکل (۱۱) و جدول (۳) مشاهده می‌شود مدل SGP II عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های موجود در ادبیات فنی دارد و دقت مدل SGP I نیز بسیار نزدیک به مدل‌های LGP و GSA می‌باشد.

جدول ۳: عملکرد مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری برای داده‌های آزمایش

پارامتر	مدل			
	LGP	GSA	SGP I	SGP II
R	۰/۹۸۰	۰/۹۷۶	۰/۹۷۳	۰/۹۸۲
MAE	۴/۶۲	۴/۹۵	۴/۶۱	۴/۶۱
RMSE	۵/۹۳	۶/۳۷	۶/۷۰	۵/۵۶





شکل ۱۱: هیستوگرام نسبت مقادیر واقعی به مقادیر پیش‌بینی شده ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری توسط مدل‌های مختلف

مدل‌های به دست آمده در این تحقیق علاوه بر دقت بالا از لحاظ ساختاری نیز بسیار ساده می‌باشند و به راحتی می‌توان از آنها برای طراحی استفاده کرد. نکته قابل ذکر اینکه، مدل‌های متداول آماری (نظیر رگرسیون) رابطه‌ای خطی و یا غیر خطی میان ورودی‌ها و خروجی‌ها در نظر می‌گیرند که همواره درست نیست. تقریباً در تمامی موارد، بهترین مدل‌های به دست آمده از آنالیزهای متداول آماری پس از بسط تعداد محدودی مدل با ساختار از پیش تعیین شده به دست می‌آیند. به همین دلیل، اینگونه مدل‌ها نمی‌توانند برهم‌کنش بین متغیرهای وابسته و غیر وابسته را به طور مناسب در نظر بگیرند. از سوی دیگر، **SGP** مشخصات کاملاً متمایزی دارد. یکی از مهم‌ترین برتری‌های این تکنیک در مقایسه با روش‌های متداول آماری توانایی قابل توجه آن در تولید مدل‌های پیچیده بدون در نظر گرفتن ساختاری اولیه برای مدل می‌باشد. این روش قدرتمند، مدل‌های بهینه را پس از کنترل میلیون‌ها و یا میلیاردها مدل اولیه ارائه می‌کند. مسلماً، ایجاد این تعداد مدل بدون استفاده از روش‌های یادگیری ماشین غیر ممکن می‌نماید.

با وجود استفاده فزاینده از تکنیک‌های یادگیری ماشین و خصوصاً **SGP** در چند سال اخیر برای تحلیل انواع مختلف مسائل مهندسی، به نظر می‌رسد در زمینه مهندسی عمران باید فعالیت‌های بیشتری صورت گیرد تا جنبه‌های جدیدی از کاربرد این روش‌ها حاصل گردد. برخی از زمینه‌هایی که کاربرد تکنیک‌های **SGP** در آنها به درستی مورد بررسی قرار نگرفته است عبارتند از:

- پیش‌بینی مدول الاستیسیته انواع بتن (مانند بتن الیافی)
- پیش‌بینی ظرفیت باربری تیرهای بتن مسلح عمیق
- طراحی سپرهای فولادی
- پیش‌بینی برش پایه قاب‌ها

نکته قابل ذکر اینکه ، یکی از نقاط ضعف تکنیک **SGP** حساسیت بالای آن به پارامترهای الگوریتم می باشد که تنها با سعی و خطا و یا مراجعه به متون علمی قابل حل می باشد. علاوه بر این می توان در مطالعات آینده از الگوریتم های بهینه سازی نظیر الگوریتم مورچه گان و یا پرندگان برای تعیین پارامترهای بهینه **SGP** استفاده کرد و مدل های جدیدتری برای پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه زنبوری ارائه کرد.

۴- نتیجه گیری

توسعه در ابزارهای کامپیوتری طی دو دهه اخیر باعث سهولت و سرعت در رشد تکنیک های یادگیری ماشین گردیده است. علاوه بر این، مشخص گردیده است که این تکنیک ها می توانند به عنوان ابزاری برای حل مسائلی که روش های متداول در حل آنها ناموفق هستند یا عملکرد ضعیفی دارند به کار روند. نمونه ای کاملاً بارز برای نشان دادن این پتانسیل زمینه های طراحی مهندسی عمران است. با نگاهی بر ادبیات فنی موجود این موضوع به خوبی مشهود می گردد، لیکن این مهم نیز آشکار می گردد که جامعه محققین تمایل فزاینده ای به جنبه های جدیدی از تکنیک های یادگیری ماشین از نقطه نظر مهندسی پیدا نموده اند. رویکرد یادگیری ماشین به طراحی برنامه های کامپیوتری و سیستم هایی می پردازد که قادرند به طور اتوماتیک از تجربیات یادگیری کنند. الگوریتم های تکاملی، مجموعه ای از روش های یادگیری ماشین هستند که در زمینه های مختلفی با پیچیدگی های زیاد مورد استفاده قرار می گیرد و تحت نام کلی محاسبات تکاملی مورد استفاده قرار می گیرند. این الگوریتم ها در سه دسته بزرگ الگوریتم های ژنتیک ، برنامه نویسی تکاملی و استراتژی های تکاملی طبقه بندی می شوند که دو دسته دیگر برنامه نویسی ژنتیک و سیستم های دسته بندی کننده نیز در زمره این طبقه بندی قرار می گیرند. برنامه نویسی ژنتیک گستره ای از الگوریتم های ژنتیک است که با الهام از گزینش طبیعی برنامه های کامپیوتری، الگوریتم و ساختارهای مشابهی نظیر اینها را تولید می کند. در حقیقت ، در برنامه نویسی ژنتیک ، اطلاعات ورودی و خروجی مرتب با آن را از قبل می دانیم و هدف یافتن برنامه ای است که آنها را به هم مرتبط می کند. عملگرهای الگوریتم ژنتیک مانند تزیج و جهش برای به کارگیری در برنامه نویسی ژنتیک به اندکی اصلاحات نیاز دارد.

هدف اصلی در این مقاله به دست آوردن معادلات طراحی جدید برای تخمین ظرفیت برشی تیرهای لانه زنبوری با استفاده از شاخه ای از تکنیک های یادگیری ماشین با نام برنامه نویسی ژنتیک استاندارد (**SGP**) بوده است.

مدل های ارائه شده بر اساس نتایج ۱۴۲ آزمایش های باربری تیرهای لانه زنبوری انجام گرفته توسط سایر محققان توسعه یافته اند. مدل های متفاوتی برای پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه زنبوری با در نظر گرفتن ترکیب های مختلفی از مشخصات هندسی و مکانیکی تیر نظیر عمق کلی تیر لانه زنبوری (**dg**)، برآمدگی عمودی قسمت مایل چشمه (**h**)، ضخامت جان تیر (**tw**)، تنش تسلیم کمینه جان تیر (**Fyw**)، و عرض جان در نیمه میانی (**e**) بسط داده شده اند. مطالعه آزمایشی (سعی و خطا) گسترده ای برای تعیین مؤثرترین ورودی ها برای مدل ها انجام شده است.

بهترین مدل‌های SGP با استفاده از پارامترهای ورودی $t_w \times F_{yw}$ ، h ، d_g و e بسط داده شده‌اند. دقت بالای مدل‌ها نشانگر این مهم است که این پارامترها نماینده مناسبی از مشخصات هندسی و مکانیکی تیر لانه‌زنبوری برای پیش‌بینی ظرفیت برشی آن می‌باشند.

مدل‌های ارائه شده SGP تخمین‌های بسیار دقیقی از مقدار ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری به دست داده‌اند. نتایج نشانگر عملکرد بهتر مدل SGP II در مقایسه با SGP I می‌باشند.

به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شده از ضریب همبستگی (R)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین کلی خطا (MAE) استفاده شده است. علاوه بر این، اعتبار خارجی مدل‌های ارائه شده برای داده‌های آزمایش توسط معیارهای جدید ارائه شده در ادبیات فنی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشانگر اعتبار بسیار بالای مدل‌های ارائه شده می‌باشد.

بهترین مدل‌های SGP به صورت فرمول‌های ساده و کاربردی نشان داده شده‌اند. معادلات استخراج شده می‌توانند به سهولت برای مقاصد پیش طراحی و یا بررسی سریع راه‌حل‌های حاصل از تحلیل‌های زمان‌بر و قطعی مورد استفاده قرار بگیرند.

تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی دقیق‌تر اهمیت پارامترهای ورودی مؤثر انتخاب شده (e ، $t_w \times F_{yw}$ ، d_g ، h) برای مدل‌های SGP انجام شده است. با توجه به این نتایج، ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری به $t_w \times F_{yw}$ و h حساس‌تر از سایر ورودی‌ها است.

مدل‌های ارائه شده می‌توانند برای کنترل اعتبار نتایج آزمایشگاهی به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، در شرایطی که امکان انجام مطالعات آزمایشگاهی نباشد، این مدل‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای تخمین ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری تلقی شوند.

یکی از نقاط ضعف تکنیک SGP حساسیت بالای آن به پارامترهای الگوریتم می‌باشد که تنها با سعی و خطا و یا مراجعه به متون علمی قابل حل می‌باشد. علاوه بر این می‌توان در مطالعات آینده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم مورچگان و یا پرندگان برای تعیین پارامترهای بهینه SGP استفاده کرد و مدل‌های جدیدتری برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای لانه‌زنبوری ارائه کرد.

مراجع

- Aglan, A.A., & Redwood, R.G. (1974). Web buckling in castellated beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*, 57, 307-320.
- Amayreh, L., & Saka, M.P. (2005). Failure load prediction of castellated beams using artificial neural networks. *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)*, 6(1-2), 35-54.
- Baykasoglu A., Oztas, A. & Ozbay, E. (2009). Prediction and multi-objective optimization of high-strength concrete parameters via soft computing approaches. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 6145-6155.
- Cevik, A. (2007b). Genetic programming based formulation of rotation capacity of wide flange beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(7), 884-893.
- Cevik, A. (2011). Modeling strength enhancement of FRP confined concrete cylinders using soft computing. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5662-5673.
- Cevik, A. A new formulation for web crippling strength of cold-formed steel sheeting using genetic programming. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(2007a), 867-883.
- Cevik, A., Göğüş, M.T., Güzelbey, I., & Filiz, H. (2010). Soft computing based formulation for strength enhancement of CFRP confined concrete cylinders. *Advances in Engineering Software*, 41(4), 527-536.
- Del Pisheh, A. (2012) *Laboratory investigation of plastic bending of honeycomb beams under concentrated load couple*. Urmia University persion. (Persian)
- Dougherty, B.K. (1993). Castellated beams: A state of the art report. Technical Report. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 35(2), 12-20.

Fiore, A., Berardi, L., & Marano, G.C. (2012). Predicting torsional strength of RC beams by using Evolutionary Polynomial Regression. *Advances in Engineering Software*, 47(1), 178-187.

Gandomi, A.H., Alavi, A.H., Mirzahosseini, M.R., Moqhadas Nejad, F. (2011b) Nonlinear Genetic-Based Models for Prediction of Flow Number of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 23(3), 248-263.

Gholizadeh, S., Pirmoz, A., & Attarnejad, R. (2011). Assessment of load carrying capacity of castellated steel beams by neural networks. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 770-779.

Javadi, A.A., Rezani, M., & Mousavi Nezhad, M. (2006). Evaluation of liquefaction induced lateral displacements using genetic programming. *Computers and Geotechnics*, 33(4-5), 222-33.

Kerdal, D., & Nethercot, D.A. (1984). Failure modes for castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 4, 295-315.

Knowles, P.R. (1985). *Design of castellated beams. (for use with BS 5950 and BS 449) Constrado*, UK: Croydon.

Knowles, P.R. (1991). Castellated beams. *Proc. Instn Civ Engrs, Part 1*, 90, 521-536.

Koza, J.R. (1992). *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection*. Cambridge (MA): MIT Press.

Lia, W., Daib, L., Houa, X., & Leia, W. (2007). Fuzzy genetic programming method for analysis of ground movements due to underground mining. *Technical note, Int. J. Rock Mech. Min.*, 44, 954-961.

Mahmoudian, B. (1374) Lateral buckling - torsion in honeycomb beams. Master's thesis, University of Tehran persion. (Persian)

Pala, M. (2008). Genetic programming-based formulation for distortional buckling stress of cold-formed steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(12), 1495-1504.

Redwood, R., & Demirdjian, S. (1998). Castellated beam web buckling in shear. *J Struct Eng ASCE*, 124, 1202-1207.

Roy, P.P., & Roy, K. (2008). On some aspects of variable selection for partial least squares regression models. *QSAR Comb Sci*, 27, 302-313.

Shahin, M.A., Jaksa, M.B., & Maier, H.R. (2009). Recent advances and future challenges for artificial neural systems in geotechnical engineering applications. *J. Adv. Artif. Neural Syst.* doi:10.1155/2009/308239.

Shahin, M.A., Maier, H.R., & Jaksa, M.B. (2001). Artificial neural network applications in geotechnical engineering. *Austr Geomech*, 36(1), 49-62.

Shaukati, H., & Mohibkhaha, A. (2012) Lateral torsional buckling of honeycomb beams with elastic lateral restraint. *6th International Civil Engineering Conference*, Isfahan University of Technology persion. (Persian)

Shoukti, H. (2008) *Application of LRFD method in the design of honeycomb beams, a research project in Urmia University persion.* (Persian)

Shoukti, H. (2008) *Theoretical study of the buckling behavior of common honeycomb beams in Iran.* National Research Project - Scientific Research Council of the country persion. (Persian)

Smith, G.N. (1986). *Probability and statistics in civil engineering*. London: Collins

Soh, C.K., & Yang, Y. (2000). Genetic programming-based approach for structural optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(1), 31-37.

Yang, Y., & Soh, C.K. (2002). Automated optimum design of structures using genetic programming. *Computers & Structures*, 80, 1537-1546.

Yousefi, R. (2012). *Investigation of errors caused by construction on the lateral torsional buckling of honeycomb beams*, Urmia University persion. (Persian)

Zaarour, W., & Redwood, R. (1996). Web buckling in thin castellated beams. *J Struct Eng ASCE* 122, 860-866.

Zirakian, T., & Showkati, H. (2006). Distortional buckling of castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 863-871.