ISSN 2783-2805

# نشریه مهندسی عمران فردوسی

## فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۴


**تشخیص آسیب چندگانه در سازه¬ بااستفاده از روش آنتروپی موجک گسسته** ۱
میلاد آشورزاده مقری - علی بیگلری فدافن

**بهینه¬سازی فنی اقتصادی مجموعه روسازی آسفالتی و اساس تثبیت‌شدهٔ مطالعهٔ موردی محور اردکان-نائین** ۱۷
مصطفی آدرسی

**مقاومت جریان در یک رودخانهٔ شنی- قلوه سنگی در حضور توده‌های گیاهی موضعی و شکل‌های بستر گوداب و خیزاب (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ ماربر پادنا)** ۳۵
کورش نصرتی - حسین افضلی مهر- مروان حسن - مسعود کاظم

**تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ بااستفاده از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری** ۵۱
هادی فتاحی - فرشاد ملک محمودی حسین قائدی

**تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه نفت بااستفاده از نانو فتوکاتالیست جدید** $Fe-ZSM-_5@TiO_2/Ag$ ۷۱
محمد دلنواز - کیارش اسحقی

**مطالعهٔ آزمایشگاهی تعادل نیروها و اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب مورّب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار** ۸۷
مصطفی دولتی مهتاج - بهرام رضائی


**سال ۳٤، شماره ۲**
**تابستان، ۱٤۰۰**

# فهرست مطالب


| | | |
|---|---|---|
| تشخیص آسیب چندگانه در سازه بااستفاده از روش آنتروپی موجک گسسته | میلاد آشورزاده مقری – علی بیگلری فدافن | ۱ |
| بهینه‌سازی فنی اقتصادی مجموعه روسازی آسفالتی و اساس تثبیت‌شدهٔ مطالعهٔ موردی محور اردکان-نائین | مصطفی آدرسی | ۱۷ |
| مقاومت جریان در یک رودخانهٔ شنی- قلوه سنگی در حضور توده‌های گیاهی موضعی و شکل‌های بستر گوداب و خیزاب (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ ماربر پادنا) | کورش نصرتی – حسین افضلی مهر<br>مروان حسن – مسعود کاظم | ۳۵ |
| تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ بااستفاده از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری | هادی فتاحی – فرشاد ملک محمودی<br>حسین قائدی | ۵۱ |
| **تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه نفت بااستفاده از نانو فتوکاتالیست جدید Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag** | محمد دلنواز - کیارش اسحقی | ۷۱ |
| **مطالعهٔ آزمایشگاهی تعادل نیروها و اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار** | مصطفی دولتی مهتاج – بهرام رضائی | ۸۷ |

# تشخیص آسیب چندگانه در سازه بااستفاده از روش آنتروپی موجک گسسته*

## پژوهشی

میلاد آشورزاده مقری[۱] علی بیگلری فدافن[۲]

**چکیده** *مقایسهٔ داده‌های سازه در دوحالت آسیب‌ندیده و آسیب‌دیده یک روش معمول به‌منظور تشخیص آسیب در سازه است. براساس این پردازش مکان و شدت آسیب شناسایی می‌گردد. انتخاب الگوریتم مناسب به‌منظور انجام این مقایسه با دقت بالا و سرعت مناسب از اهمیت بالایی در فرایند شناسایی آسیب برخوردار می‌باشد. در این مقاله با تعریف مفهوم آنتروپی موجک به‌منظور حفظ دقت و برمبنای تبدیل موجک گسسته به‌منظور حفظ سرعت، یک الگوریتم تشخیص به‌منظور شناسایی محل آسیب در سازه پیشنهاد شده‌است. استفاده از تعریف تبدیل موجک گسسته به‌همراه آنتروپی موجک، پایه الگوریتم شناسایی آسیب روش پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. به‌منظور ارزیابی حساسیت روش پیشنهادی، از یک مدل عددی به‌منظور درنظر گرفتن سناریوهای گوناگون آسیب استفاده شده‌است. روش پیشنهادی، قابلیت شناسایی چند مکان آسیب براساس پردازش پاسخ رفتار دینامیکی سازه در اثر تجربهٔ زمین‌لرزه در سازه‌ای که رفتار واقعی اتصال در آن شبیه‌سازی شده‌است را دارا می‌باشد. روش پیشنهادی به‌عنوان یک روش مؤثر در شناسایی آسیب می‌تواند استفاده شود.*

**واژه‌های کلیدی** پایش سلامت سازه، شناسایی آسیب، تبدیل موجک گسسته، آنتروپی موجک نسبی، قاب سه‌بعدی.

## Structures Multi-Damage Detection by Discrete Wavelet Entropy Method

M. Ashurzade Moghri A. Bigleri Fadafan

**Abstract** *Identification of infrastructure damage in the early stages is one of the most fundamental requirements through the maintenance process. In order to identify damages in the process of Structural Health Monitoring, numerous methods have been developed, including Neural Network (NN) Damage Identification Techniques, Time Series Damage Identification Techniques, Frequency Response Damage Identification Techniques, Force Spectrum Density Damage Identification Techniques, and Wavelet Damage Identification Techniques. The conventional structural health monitoring procedure depends on a comparison of undamaged primary structural data to the affected structural data. Comparative algorithms to indicate the location of damage based on the structural data has a significant effect on the structural health monitoring method performance. Therefore, a damage detection algorithm is the most important step in identifying damage in the structural health monitoring procedure. In this paper, a damage identification algorithm based on the relative wavelet entropy method is proposed for the structure. Using the definition of the discrete wavelet transform with wavelet entropy form the base of the proposed algorithm for damage detection to support the method efficiency. The proposed method is capable of identifying several sites of damage and is used as an effective method compared to other methods of damage detection.*

**Key Word** Structural Health Monitoring, Damage Detection, Discrete Wavelet Transform, Relative Wavelet Entropy, 3D frame.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۹/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۲۱ از صفحه ۱ تا ۱۶ می‌باشد .

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران – سازه، دانشکدهٔ فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان.**Email:** Biglari.a@gmail.com

## مقدمه

شناسایی آسیب در زیرساخت‌های عمرانی در مراحل ابتدایی شروع آسیب، یکی از اساسی‌ترین نیازها در فرایند نگهداری صحیح می‌باشد. به‌منظور شناسایی آسیب در فرایند پایش سلامت سازه‌ها، روش‌های بی‌شماری مورد بررسی قرار گرفته‌است از جمله این روش‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ روش‌های شناسایی آسیب مبتنی‌بر شبکهٔ عصبی( Neural Network (NN)-Based Damage Detection Techniques) [1]، تکنیک‌های شناسایی آسیب مبتنی‌بر سری‌های زمانی ( Time Series-Based Damage Detection Techniques)، روش‌های شناسایی آسیب مبتنی‌بر فیلتر کلمن ( Kalman Filter-Based Damage Detection Techniques) [2]. روش‌های مبتنی‌بر خصوصیات شکل‌های مدی و خصوصیات رفتار دینامیکی سازه، تابع پاسخ فرکانسی، چگالی طیف نیرویی [2] و روش‌های مبتنی‌بر به‌کارگیری موجک‌ها [3].

در بررسی سیگنال‌های تصادفی، غیرایستا و غیرخطی تحلیل تبدیل موجک ( Wavelet Transform (WT)) به‌عنوان یک روش شناسایی الگوی سیگنال در شناسایی آسیب‌های سازه‌ای به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است [4, 5]. به‌صورت ویژه تبدیل موجک روش مناسب‌تری از تبدیل فوریه به‌منظور بررسی سیگنال‌های غیرایستا و تصادفی شناخته می‌شود و محدودیت‌های روش تبدیل فوریه را برطرف می‌نماید [6, 7]. کاربرد اصلی تبدیل موجک، استخراج ویژگی(Fetcher Extraction) در یک فضا است. در توصیف استخراج ویژگی می‌توان این‌گونه بیان کرد که بخش‌های مهم اطلاعات استخراج می شود و بخش‌های زاید حذف می‌گردد. با به کارگیری تبدیل موجک به‌راحتی می‌توان این فرایند استخراج ویژگی را انجام داد. هم‌چنین تبدیل موجک قابلیت آنالیز سیگنال در هر دو دامنهٔ زمانی و فرکانسی را فراهم می‌سازد.

در فرایند ارزیابی روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک روش‌های به‌کارگیری موجک گسسته، پیوسته و روش‌های ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک گسسته اگرچه توانایی بیشتری در بررسی سیگنال‌های پرجزئیات دارد، اما امکان تشخیص آسیب با دقت بالا در این روش‌ها دشوار می‌باشد [8-10]. ازاین‌رو تعریف تابع شناسایی آسیب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. باتوجه به این محدودیت در روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک گسسته، تمرکز پژوهشگران بر روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته به‌دلیل امکان تشخیص آسیب با دقت مناسب قرار گرفته‌است. از این روش‌ها همواره و به‌صورت گسترده در حالت منفرد و یا ترکیبی استفاده می‌شود، اما هنوز محدودیت ذاتی این روش‌ها در بررسی سیگنال‌های پرجزئیات قابل مشاهده است [11, 12]. اگرچه در بررسی سیگنال‌ها با جزئیات کم روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته قابلیت مناسبی را دارند [8, 10]. به‌منظور برطرف کردن این محدودیت در روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته، توسعهٔ روش‌های ترکیبی نظیر روش‌های باقی‌ماندهٔ نیرو ((Wavelet Residual Force (WRF)) و روش‌های باقی‌ماندهٔ مودال (Modal Residual Force (MRF)) مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است [13-15]. در این روش‌ها اگرچه بهبود نتایج مشاهده می‌شود اما نقص ذاتی در به‌کارگیری توابع تبدیل موجک پیوسته هنوز برطرف نشده‌است. این محدودیت در روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته باعث افزایش زمان تحلیل در مقایسه با روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک گسسته خواهد شد [13, 16].

پس از استخراج ویژگی‌های سیگنال براساس تبدیل موجک بررسی و ارزیابی داده‌ها در دو دامنهٔ زمان و فرکانس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بررسی امکان شناسایی آسیب در ساختار سازه فراهم می‌شود. شاخص‌های گوناگونی به‌منظور شناسایی آسیب برمبنای الگوریتم‌های مختلف شناسایی آسیب ارائه شده‌است، اما

تمامی آنها در حوزهٔ شناسایی الگوی سیگنال کاربرد مناسبی ندارد. استفاده از اطلاعات آنتروپی ضرایب تبدیل موجک یکی از شاخص‌های حساس آسیب برای تشخیص آسیب در سازه‌ها می‌باشد [17]. آنتروپی موجک، آنتروپی موجک پیش‌رونده و آنتروپی موجک نسبی و هم‌چنین توابع تفاضلی از موارد بااهمیت و قابل کاربرد می باشند [17-19].

به‌کارگیری مفهوم آنتروپی موجک از قابلیت مناسبی در شناسایی آسیب برخوردار است. یوون و همکارانش در سال ۲۰۱۱ از آنتروپی موجک به‌منظور شناسایی محل وقوع آسیب غیرمتمرکز در سنسورهای بی‌سیم استفاده کردند [16]. نوری و همکارنش در سال ۲۰۱۸ به‌منظور شناسایی آسیب از روش مبتنی‌بر تبدیل بستهٔ موجک (Wavelet Packet Transform)، در مدل عددی و آزمایشگاهی از یک سازهٔ پل فولادی استفاده کردند [20]. آن‌ها بااستفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از سنسورهای کرنش، با قابلیت اندازه‌گیری نرخ تغییرات انرژی بستهٔ موجک به شناسایی محل آسیب پرداختند.

در این مقاله، یک روش شناسایی آسیب در سازه مبتنی‌بر به‌کارگیری مفهوم آنتروپی موجک برمبنای آنالیز داده‌های تبدیل گسستهٔ موجک پیشنهاد می‌شود. درنتیجه بااستفاده از این تابع آنتروپی امکان بهره‌برداری از مزایای تبدیل گسستهٔ موجک در افزایش سرعت و توانایی بررسی سیگنال‌های پر جزئیات فراهم می‌شود. روش پیشنهادی در شناسایی نقاط آسیب‌دیده در فرایند تحلیل لرزه‌ای سازهٔ سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در بخش بعد، جزئیات روش پیشنهادی ارائه شده‌است.

## آنتروپی موجک نسبی گسسته در شناسایی آسیب

به‌منظور بهره‌برداری از ویژگی‌های تبدیل موجک گسسته در بررسی سیگنال‌های پرجزئیات با سرعت مناسب که از ویژگی‌های این روش می‌باشد، لازم است که به‌منظور افزایش کیفیت تشخیص آسیب در این روش دقت محاسبات را افزایش داد. ازاین‌رو در این بخش، جنبه‌های تئوری تبدیل موجک گسسته (Discrete Wavelet Transfer (DWT)) و جزئیات آنتروپی موجک نسبی (Relative Wavelet Entropy (RWE)) که براساس آن شناسایی آسیب در سازه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت، ارائه می‌شود.

## تبدیل موجک گسسته (Discrete Wavelet Transfer (DWT))

تبدیل موجک توانایی آنالیز هم‌زمان چند سیگنال متغیر در دامنه‌های زمان- فرکانس یا فضا- فرکانس را فراهم می‌کند. دامنهٔ وسیع موجک‌های مادر به‌روش تبدیل موجک اجازه می‌دهد که تغییرات ظریف در یک سیگنال که تشخیص آن با روش تبدیل فوریه دشوار است به‌آسانی شناسایی شود [2]. براساس این قابلیت امکان تشخیص چند آسیب در یک سازه و در یک فرایند ارزیابی فراهم می‌شود. در این تبدیل یک سیگنال زمانی ورودی به موجک‌های گسسته تبدیل می‌شود و ضرایب موجک پایین‌گذر و بالاگذر محاسبه می‌شوند. در تبدیل موجک گسسته با درنظر گرفتن تابع موجک مادر $\Psi^{i}(2t-k)$ تجزیهٔ سیگنال ورودی انجام می‌شود. بااستفاده از فیلتر پایین‌گذر $LF(k)$ فرکانس‌های پایین و بااستفاده از فیلتر بالاگذر $HF(k)$ فرکانس‌های بالا در سیگنال ورودی تجزیه و طبقه‌بندی می‌شوند. این فیلترها به این منظور طراحی شده‌اند که تمامی اطلاعات در بازهٔ تعریف‌شده بررسی شود و دقت فرایند در مقیاس‌های مختلف کنترل شود [21].

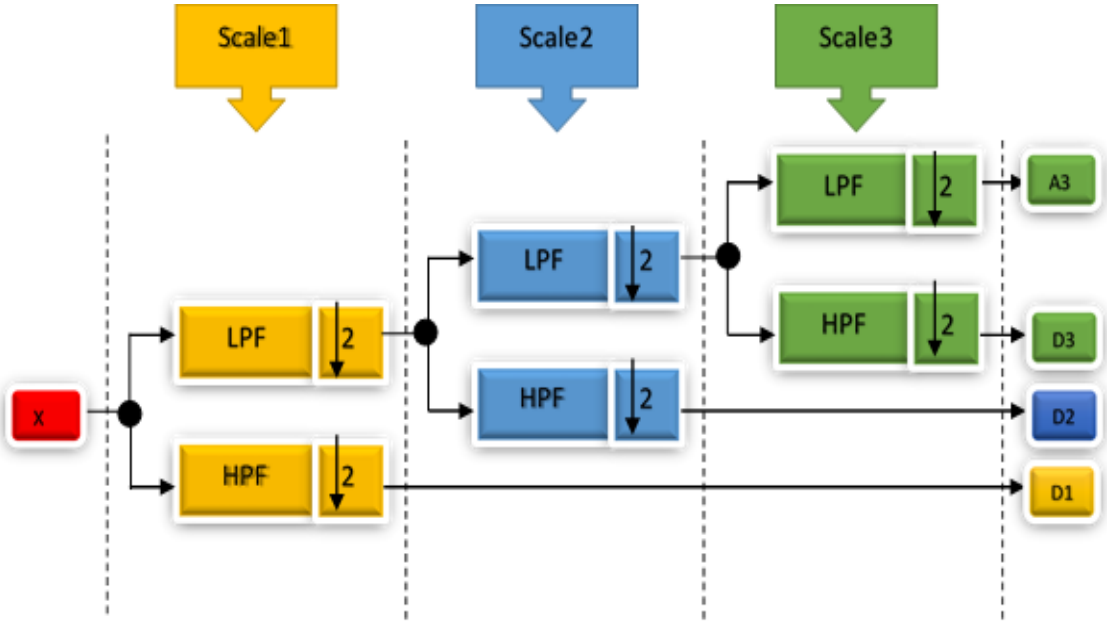
$$\Psi_{(t)}^{2i} = \sqrt{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty} HF(k)\Psi^{i}(2t-k)\ ; \qquad (۱)$$

$$\Psi_{(t)}^{2i+1} = \sqrt{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty} LF(k)\Psi^{i}(2t-k)\ ; \qquad (۲)$$

فرایند تبدیل موجک گسسته و دامنهٔ تغییرات در

مقیاس‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده‌است. در هر سطح مقیاس یک‌بار فیلترهای تجزیهٔ موجک بر سیگنال اصلی ورودی x(t) اعمال می‌شود. در هر مرتبه از مقیاس و اعمال فیلترها، خروجی در دو دامنه شامل اطلاعات فرکانس پایین و اطلاعات فرکانس بالا طبقه‌بندی می‌شود. گروه مؤلفه‌ها شامل اطلاعات فرکانس پایین از سیگنال اصلی به‌عنوان تقریب (Approximation) می‌شود که با A نشان داده می‌شود و گروه مؤلفه‌ها شامل اطلاعات فرکانس بالا به‌منظور درنظر گرفتن جزئیات (Details) می‌شود که با D نشان داده می‌شود. مقیاس‌های بعدی تبدیل موجک گسسته بااستفادهٔ پی‌درپی از فیلترهای معرفی‌شده برروی گروه جزئیات مقیاس مرحلهٔ قبل $D_{i-1}$ اعمال می‌شود. خروجی-های مقیاس‌های بعدی نشان‌دهندهٔ گروه‌های فرکانسی به‌شدت محدود و با فرکانس‌های پایین‌تر می‌باشد. خروجی نهایی تبدیل موجک گسسته در مقیاس نهایی (n) شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول زیرگروه فرکانس پایین تقریب $A_n$ و بخش دوم زیرگروه‌های فرکانس بالای جزئیات در تمام مقیاس‌های (1,2,3,…n) است که با ($D_1, D_2, D_3, \ldots, D_n$) نشان داده می‌شود. نتایج در سه مقیاس در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

تبدیل موجک گسسته مستلزم انتخاب یک موجک مناسب و تعداد مقیاس‌های مناسب به‌منظور کسب نتیجهٔ دقیق می‌باشد. ازاین‌رو باتوجه به قابلیت شتاب‌سنج‌های ثبت‌کنندهٔ رفتار لرزه‌ای غیرخطی و غیرایستا امکان برطرف کردن این محدودیت فراهم می‌شود. باتوجه به حساسیت این شتاب‌سنج‌ها بیشترین دقت و بیشترین انرژی در فرکانس‌های طبیعی سازه نشان داده می‌شود [2]. ازاین‌رو مقیاس کردن تا زمانی باید انجام شود که فرکانس‌های طبیعی سازه را شامل شود. درنتیجه اگر آسیب در یک سازه موجب تغییر در فرکانس طبیعی سازه شود، آن آسیب به‌عنوان تغییری در انرژی در مقیاس متناظر مشاهده خواهد شد.




شکل ۱ ساختار محاسباتی تبدیل موجک گسسته

## آنتروپی موجک

همان‌گونه که در بخش پیشین ذکر شد، با اعمال $n$ مقیاس تبدیل موجک گسسته برروی یک سیگنال ضرایب موجک گسسته در تمامی زیرگروه‌ها محاسبه می‌شوند. این ضرایب در مقیاس nام شامل آخرین تقریب ($A_n$) و جزئیات $(D_i; i = n, n-1, \dots, 1)$ در همهٔ مقیاس‌ها می‌باشد. هر کدام از این مقیاس‌ها را می‌توان به‌عنوان یک زیرگروه مجزا با طول متفاوت درنظر گرفت. اگر طول نمونه سیگنال ارتعاش اصلی با $L$ تعریف شود، $A_n$ شامل $\frac{L}{2^n}$ ضریب و $(D_i; i = n, n-1, \dots, 1)$ مقدار $\frac{L}{2^i}$ ضریب را شامل می‌شود. بردار ضرایب موجک از یک تبدیل موجک گسسته با n مقیاس را به‌صورت یک ماتریس از زیرگروه‌های مقیاس‌شده به‌ترتیب افزایش فرکانس‌ها در هر یک از زیرگروه‌ها به‌صورت $C_{ji} = [A_N, D_N, D_{N-1}, \dots, D_1]$ می‌توان نشان داد. هر یک از بردارهای ماتریس $C_{ji}$ دارای k ارائه می‌باشد.

انرژی سیگنال در هر گروه را که با ($E_j$) نشان داده می شود، از جمع مربعات ضرایب آن زیرگروه برای کل طول زیرگروه می‌توان محاسبه کرد. این انرژی که با (E) نشان داده می‌شود به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E = [E_j] = [\sum_k |A_n(k)|^2, \sum_k |D_j(k)|^2] \qquad (۳)$$

انرژی کل در تبدیل موجک یک سیگنال به‌صورت جمع گروه را که با ($E_{tot}$) نشان داده می شود، در دامنهٔ زمان و دامنهٔ زیرگروه که در معادلهٔ (۳) پیشنهاد شده‌است می‌توان به‌شکل زیر نوشت:

$$E_{tot} = \sum_k |A_n(k)|^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_k |D_j(k)|^2 \qquad (٤)$$

نسبت انرژی موجک در زیرگروه jام را که با ($P_j$) نشان داده می‌شود، می‌توان به‌صورت معادلهٔ (٤) تعریف نمود:

$$P_j = \frac{E_j}{E_{tot}} \quad j = 1,2, \dots . n \qquad (۵)$$

مقدار $P_j$ متناظر با درصد انرژی کل در زیرگروه jام است. توزیع مقادیر $P_1, P_2, \dots, P_N$ تا حدودی شبیه یک توزیع احتمال انرژی است، به این معنی که مجموع مقادیر $P_j$ برابر یک می‌باشد. از آنجایی‌که نسبت انرژی موجک برای هر زیرگروه تعریف می‌شود، این مقدار یک ابزار مناسب برای نمایش و توصیف یک پدیدهٔ طبیعی است که تغییرات طیف انرژی در دامنهٔ فرکانسی را مشخص می‌کند.

رن و همکارانش در سال 2008، مفهوم آنتروپی موجک را در شناسایی آسیب استفاده کردند [17]. براساس تئوری آنتروپی Shannon، آنتروپی موجک در یک نسبت آنتروپی مشخص موجک $P_j Ln[P_j]$ و مقدار کل آنتروپی ($S_{WT}$) به‌صورت معادله (۵) تعریف می‌شود [2].

$$S_{WT} = S_{WT}(P) = -\sum_j P_j Ln[P_j] \qquad (٦)$$

می‌توان نشان داد که به‌کارگیری نسبت آنتروپی موجک در دو وضعیت سازهٔ آسیب‌دیده $P_j^{Damaged}$ و آسیب‌ندیده $P_j^{Undamaged}$ باعث بهبود دقت در شناسایی آسیب می‌شود. همان‌طور که در معادلهٔ (٦) نشان داده شده‌است.

$$RWE = -\sum_j P_j^{Damaged} \, Ln\left(\frac{P_j^{Damaged}}{P_j^{Undamaged}}\right) \qquad (۷)$$

در یک سازهٔ آسیب ندیده نسبت انرژی موجک $P_j^{Damaged}$ و $P_j^{Undamaged}$ یکسان می باشند، درنتیجه مقدار RWE صفر خواهد شد. اما وجود آسیب سیگنال پاسخ را تا حدودی تغییر می‌دهد و در نتیجه مقدار RWE افزایش خواهد یافت.

الگوریتم خطی به‌کارگیری تابع آنتروپی معرفی‌شده در به‌کارگیری (معادلهٔ ٦) به‌منظور به‌کارگیری در تبدیل موجک گسسته به‌منظور شناسایی آسیب در جدول (۱) ارائه شده‌است. در ادامهٔ این مقاله، معیار RWE به‌منظور شناسایی مکان آسیب در تبدیل موجک گسسته بااستفاده از مدل عددی معرفی خواهد شد و توانایی روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱ الگوریتم تشخیص آسیب

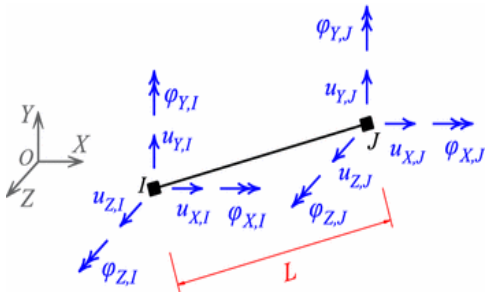
| |
|---|
| شروع |
| استخراج شتاب‌نگاشت در درجات آزادی مورد بررسی سازهٔ آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده |
| تکرار این حلقه برای سازهٔ سالم و سازهٔ آسیب‌دیده |
| تکرار حلقه برای تمامی شتاب‌نگاشت در درجات آزادی مورد بررسی |
| شروع تشخیص آسیب |
| تکرار حلقه در مقیاس مورد بررسی برای n مقیاس 1, 2, …, n |
| محاسبهٔ بردار ضرایب $A_n$ |
| محاسبهٔ بردار ضرایب $D_1, D_2, \ldots, D_n$ |
| محاسبهٔ توابع انرژی $E_1, E_2, \ldots, E_n$ |
| محاسبهٔ تابع انرژی کل $E_{tot}$ |
| محاسبهٔ نسبت انرژی $P_1, P_2, \ldots, P_n$ |
| محاسبهٔ تابع آسیب در تمامی درجات آسیب RWE |
| شناسایی توابع آسیب حداکثر در درجات آزادی بررسی‌شده و تشخیص درجات آزادی آسیب‌دیده |
| پایان |

## مدل عددی سازهٔ قاب سه‌بعدی

به‌منظور ارزیابی عددی الگوریتم پیشنهادی مدل اجزای محدود سازهٔ قاب سه‌بعدی با المان‌های تیر اویلر- برنولی توسعه داده شده‌است، که قابلیت درنظر گرفتن رفتار واقعی اتصال را با درنظر گرفتن یک درجه آزادی اضافی برای هر دوران دارد [22] . در این بخش مدل عددی از یک سازهٔ قاب سه‌بعدی با شش درجه آزادی در هر گره و سه درجه آزادی اضافی به‌منظور درنظر گرفتن دوران واقعی اتصال [22] در محیط Matlab™ مدل‌سازی شده‌است و پاسخ‌ها به‌دلیل شتاب‌نگاشت اعمال‌شده به سازه در هر درجه آزادی محاسبه شده‌است. درنهایت با ایجاد سناریوهای گوناگون آسیب در اتصالات به شناسایی محل آسیب طبق روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

## ماتریس سختی و جرم المان قاب سه‌بعدی

ماتریس سختی و جرم المان قاب سه‌بعدی را می‌توان از ترکیب رفتار المان‌های محوری، خمشی و پیچشی استخراج کرد [23]. شکل (۲) یک المان قاب سه‌بعدی مرجع را در دستگاه مختصات محلی با ۱۲ درجه آزادی نشان می‌دهد. محور x در طول خط مرکزی مقاطع عرضی و محورهای y و z محورهای اصلی در مقطع عرضی هستند. ممان اینرسی‌های مقطع عرضی $I_z$ و $I_y$ هستند و $I_p$ ممان اینرسی قطبی حول محور x می‌باشد.

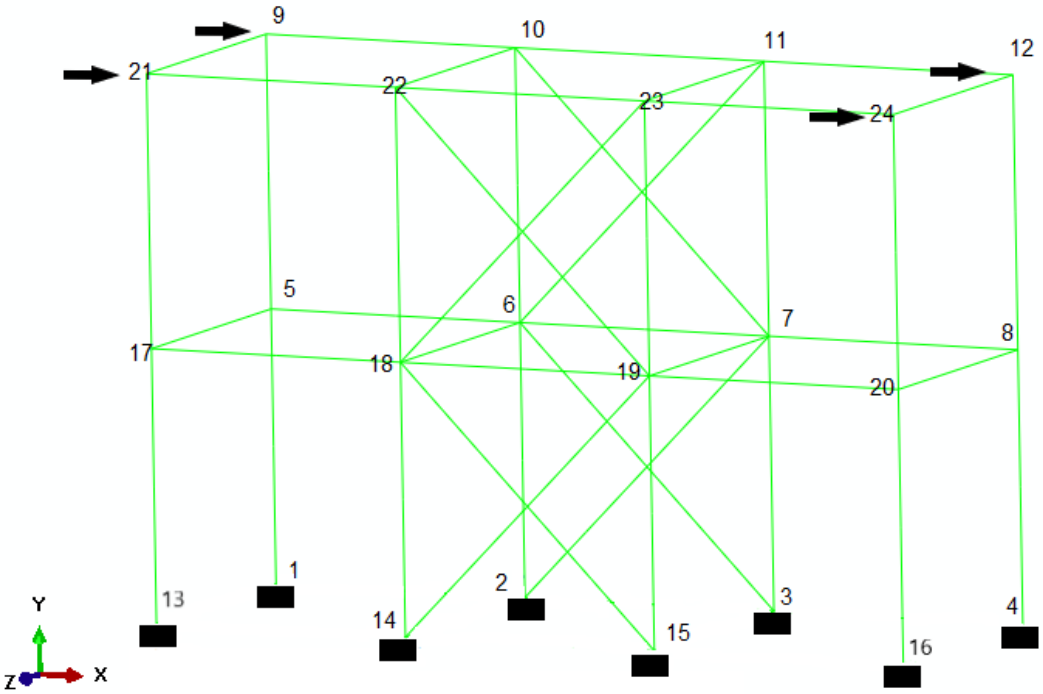



شکل ۲ یک المان قاب سه‌بعدی مرجع با مختصات محلی و درجات آزادی

## ارزیابی صحت نتایج قاب سه‌بعدی مدل‌سازی‌شده

به‌منظور اطمینان از کدهای برنامه‌نویسی‌شده در محیط Matlab™ قاب سه‌بعدی، قاب با همان مشخصات در نرم‌افزار اجزای محدودی Abaqus™ مدل‌سازی شده و صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفته‌است. به‌منظور

مقایسهٔ نتایج تحلیل دینامیک و اطمینان از صحت تحلیل، فرکانس‌های طبیعی سازه با یکدیگر مقایسه شده‌است. به این منظور قاب سه‌بعدی شکل (۳) با ۸ المان دارای سطح مقطع دایرهٔ تو خالی در نرم‌افزار Abaqus™ مدل‌سازی شده و تحلیل فرکانسی انجام شده‌است. مشخصات مصالح و هندسهٔ اعضا در هر دو مدل Matlab™ و Abaqus™ در جدول (۲) و جدول (۳) ارائه شده‌است. در جدول (٤) فرکانس‌های طبیعی مدل شبیه‌سازی‌شده در محیط Matlab™ به‌همراه درصد خطا نسبت‌به مدل شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار Abaqus™ ارائه شده‌است. درصد خطای کم نشان از توانایی محاسبهٔ الگوریتم پیشنهادی دارد.

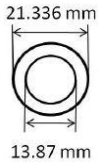



شکل ۳ مدل سازهٔ خرپایی و شماره‌گذاری محل گره‌ها

جدول ۲ مشخصات مصالح مدل سازه

| تعداد مصالح | مدول الاستیسیته Pa | مدول برشی Pa | چگالی $\frac{kg}{m^3}$ | ضریب پواسون |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.00E11 | 7.69E10 | 7850 | 0.3 |

جدول ۳ مشخصات هندسهٔ مدل سازه

| تعداد مقطع | نوع مقطع | شکل مقطع | مساحت $m^2$ | ممان انرسی $m^4$ | ممان انرسی قطبی $m^4$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | دایرهٔ تو خالی |   | 2.06E-04 | 8.36E-09 | 1.67E08 |

جدول ٤ درصد خطای محاسباتی فرکانس‌های طبیعی مدل در محیط Matlab™ و Abaqus™

| | Mod1 | Mod2 | Mod3 | Mod4 | Mod5 | Mod6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Abaqus™ | ١,٢٨٥٢ | ١,٢٨٥٢ | ١,٦٤٣٨ | ٢,٨١٨٨ | ٥,٤١٤٤ | ٦,٤٦٢٩ |
| Matlab™ | ١,٢٨٨٧ | ١,٢٨٨٧ | ١,٦٤٨١ | ٢,٨٢٥٦ | ٥,٤٢١٢ | ٦,٤٧١١ |
| Eror٪ | ٠,٢٧٨٧ | ٠,٢٧٨٧ | ٠,٢٦٢٦ | ٠,٢٤١٦ | ٠,١٢٧٣ | ٠,١٢٦٩ |

## مدل عددی

مدل عددی از سازهٔ قاب سه‌بعدی شکل (۳) با مشخصات هندسه و مصالحی که در جدول (۲) و (۳) ارائه شده‌است به‌منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی، در محیط Matlab™ مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مدل دارای ٥٤ المان و ٢٤ گره است. هر المان دارای دو گره و هر گره دارای ٦ درجه آزادی می‌باشد (۳ درجه انتقالی و ۳ درجه دورانی). در مدل قاب سه‌بعدی گره‌های ۱، ۲، ۳، ٤، ۱۳، ١٤، ۱۵، ١٦ در هر ٦ درجه آزادی محدود شده‌اند، و این گره‌ها به‌عنوان شرایط مرزی تکیه‌گاهی درنظر گرفته می‌شوند. نتایج پاسخ شتاب حاصل از بارگذاری در هر درجه آزادی با ایجاد سناریوهای آسیب که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود محاسبه شده‌است.

با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادشده، پاسخ شتاب‌نگاشت در سازهٔ آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده براساس سناریوهای آسیب مورد مقایسه قرار می‌گیرد و توانایی الگوریتم پیشنهادی در شناسایی محل آسیب مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## شبیه‌سازی آسیب با اعمال نویزهای تصادفی

به‌دلیل محدودیت و اطمینان در شبیه‌سازی حرکات غیرخطی ناشی از عوامل مخالف نظیر آسیب و رفتار غیرخطی هندسی و مواد در اعضای سازه و اتصالات می‌توان از اعمال تغییرات در ضرایب استفاده کرد، اما به‌منظور اطمینان از لحاظ کردن این اثرات برای ایجاد آسیب در مدل عددی نیاز به انتخاب روش مناسب در مدل‌سازی می‌باشد. از این‌رو از روش اعمال نویزهای تصادفی ناهم‌بسته با نسبت سیگنال به نویز(Signal-to-Noise Ratio(SNR)) 1dB و 100dB استفاده می‌شود [24]. به‌کارگیری این دامنهٔ نویز نمایشگر دقت روش می‌باشد و نتایج آزمایشگاهی صحت روش افزودن نویز تصادفی به‌منظور شبیه‌سازی آسیب در بررسی سیگنال‌های غیرایستا و غیرخطی ناشی از آسیب را مورد تأیید قرار می‌دهند [25].

## سناریوهای ارزیابی‌شده

به‌منظور نمایش توانایی روش شناسایی آسیب مبتنی‌بر الگوریتم پیشنهادی، درمجموع چهار سناریوی آسیب در این مقاله ارائه می‌شود. جزئیات هر یک از این سناریوها در جدول (۵) و (٦) ارائه شده‌است. در تمامی سناریوهای آسیب، همهٔ المان‌های مرتبط با گره آسیب‌دیده درنظر گرفته می‌شوند، اگرچه امکان آسیب تنها در یک درجه آزادی مربوط به هر المان نیز وجود دارد.

جدول ۵ سناریوهای آسیب روش محلی‌سازی آسیب براساس شاخص آسیب اعمال ۱ آسیب و بررسی سیگنال در ٤ گره

| سناریوی آسیب | محل آسیب | گره‌های مورد بررسی | توضیحات |
|---|---|---|---|
| SD1 | ۱۸ | ۱۷–۱۸–۱۹–۲۰ | گره‌های مورد بررسی در یک امتداد |
| SD2 | ٦ | ٦–۱۰–۱۹–۲۳ | گره‌های مورد بررسی تصادفی |
| SD3 | ۵ | ۱۷–۱۸–۱۹–۲۰ | گره آسیب دیده خارج از سناریو |

جدول ٦ سناریوهای آسیب روش محلی‌سازی آسیب براساس شاخص آسیب اعمال ۲ آسیب و بررسی سیگنال در ۸ گره

| سناریوی آسیب | محل آسیب | گره‌های مورد بررسی | توضیحات |
|---|---|---|---|
| DD1 | ۱۱و ۱۸ | ٦-۷-۱۰-۱۱-۱۸-۱۹-۲۲-۲۳ | افزایش مکان‌های مورد بررسی- دو آسیب |

در سناریوی آسیب $SD_1$ (تک آسیب ۱) ، همهٔ مکان‌های مورد بررسی در یک امتداد پشت سرهم قرار دارند، و آسیب تنها در یک مکان درنظر گرفته شده‌است. این سناریو ابتدایی‌ترین سناریو از لحاظ سادگی و کارایی در بررسی مفاصل با فاصلهٔ نزدیک به یکدیگر و المان‌های مشترک متصل به یک گره طراحی شده‌است. میزان آنتروپی این گره‌های مجاور، یکدیگر را تحت پوشش قرار می‌دهند و بر یکدیگر اثرگذار هستند از این‌رو می‌تواند باعث ایجاد انحراف در شناسایی آسیب شود. در این سناریو به بررسی تداخل آنتروپی مکان آسیب و مکان‌های آسیب‌ندیده در روند استفاده از الگوریتم پرداخته شده‌است.

در سناریوی $SD_2$ (تک آسیب ۲)، مکان‌های مورد بررسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند. در این سناریو تلاش شده‌است که نقاط مورد ارزیابی با فاصله از یکدیگر قرار داشته باشند تا ضمن بررسی و مقایسهٔ آنتروپی در نقاط تصادفی، فاصلهٔ ایجادشده بین نقاط مورد ارزیابی از تداخل اثرات آنتروپی در گره‌ها جلوگیری کند تا الگوریتم پیشنهادی از این نظر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. تصادفی انتخاب شدن نقاط مورد ارزیابی شرایط واقعی در ارزیابی و شناسایی آسیب در یک سازهٔ واقعی را شبیه‌سازی می‌نماید. ازاین‌رو در این سناریو امکان ارزیابی توانایی الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی و شناسایی آسیب در یک سازهٔ واقعی نیز فراهم می‌شود.

در سومین ارزیابی، سناریوی آسیب $SD_3$ (تک آسیب ۳)، همهٔ مکان‌های مورد بررسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند، اما مکان آسیب در مجموعه نقاط مورد ارزیابی در این سناریو نیست. هدف از سناریوی آسیب $SD_3$ بررسی موضعی بودن الگوریتم پیشنهادی است. با بررسی سطح آنتروپی گره‌های انتخاب‌شده توانایی و دقت الگوریتم در عدم تشخیص اشتباه ارزیابی می‌شود.

درنهایت به‌منظور حساسیت‌سنجی و بررسی دقیق‌تر الگوریتم پیشنهادی تعداد گره‌های مورد بررسی به هشت گره افزایش یافته‌است. بر این اساس امکان نمایش قدرتمندی الگوریتم پیشنهادی در بررسی گستردهٔ مکان-های آسیب‌دیده فراهم می‌گردد. به این منظور سناریوی دو آسیب $DD_1$ (دو آسیب ۱) نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. ذکر این نکته مهم است که در سازه‌هایی با آسیب‌دیدگی گسترده، به‌منظور بررسی دقیق چند آسیب‌دیدگی، تعداد مکان‌های مورد بررسی لازم است که افزایش یابد تا تمام مکان‌های آسیب‌دیده تحت پوشش قرار گیرد. این سناریو امکان‌پذیری استفاده از الگوریتم پیشنهادی را به‌منظور درنظر گرفتن شرایط واقعی در ارزیابی و شناسایی بیش از یک آسیب در یک سازه، شبیه‌سازی می‌کند.

## نتایج و بحث‌ها

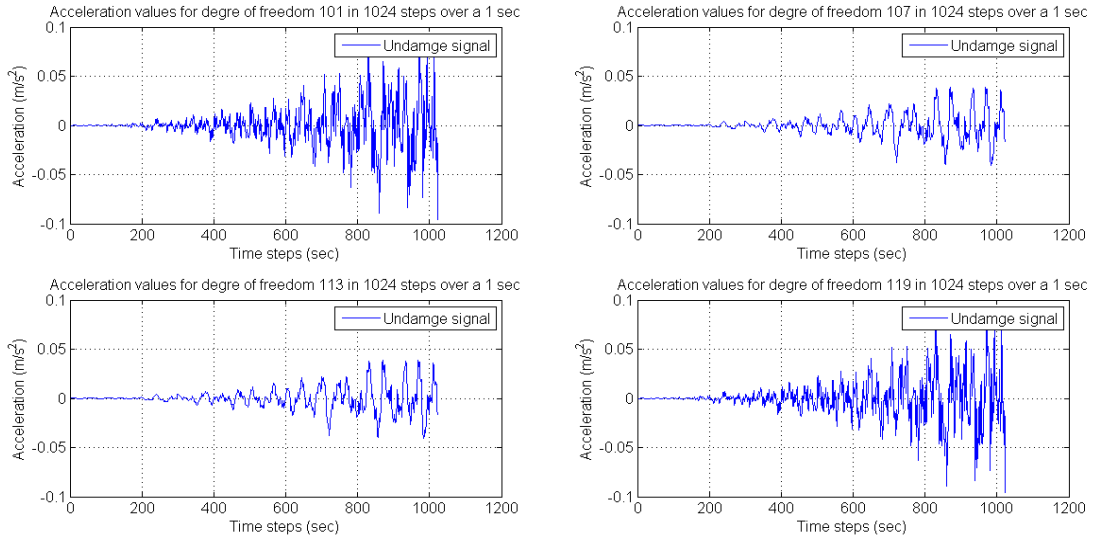
در این بخش به بررسی نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی در بررسی سناریوهای آسیب $SD_1$, $SD_2$, $SD_3$, $DD_1$ پرداخته می‌شود و کارایی روش پیشنهادی در شناسایی آسیب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### بررسی نتایج شبیه‌سازی آسیب در سناریوی آسیب $SD_1$

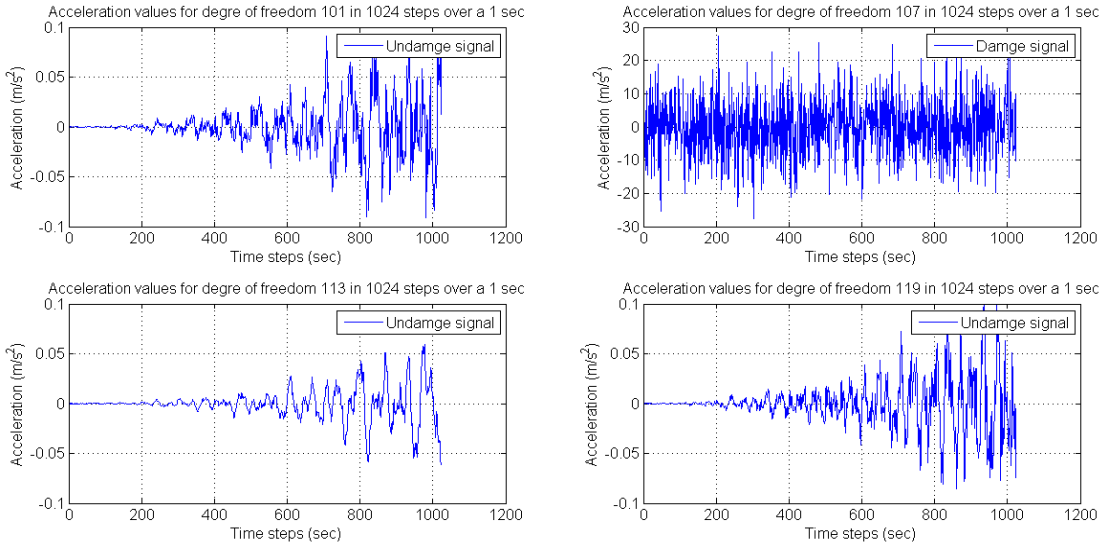
در شکل (٤) اثر اعمال نویز تصادفی به‌منظور شبیه‌سازی آسیب برروی سیگنال‌های حاصل از درجه آزادی ۵م در چهار گره در سناریوی آسیب $SD_1$ ارائه شده‌است. پس از اعمال نویز تصادفی، نوسانات به‌وجودآمده در سیگنال درجه آزادی ۱۰۷ به‌صورت کاملا محسوس قابل مشاهده است (شکل٤- ب). به‌راحتی می‌توان دگرگونی و نوسانات شدید سیگنال درجه آزادی گره مورد نظر را پیش از اعمال نویز و پس از اعمال نویز مشاهده کرد. درحالی‌که شناسایی نوسانات با شدت کمتر نیاز به تحلیل

دقیق داده‌ها دارد.

درواقع این شبیه‌سازی بخشی از پدیده‌ای است که برروی یک درجه آزادی سازه پس از وقوع هر نوع آسیبی به‌وجود می‌آید. هم‌چنین ممکن است آسیب مورد نظر به تمام درجات آزادی سازه اثر کند و باعث ایجاد نوسانات شدید در دیگر درجات آزادی سازه شود. اما در این بخش به‌منظور ساده‌سازی، نتایج مربوط به اعمال آسیب در یک درجه آزادی ارائه شده‌است تا این اثر به‌روشنی در شکل (٤) و (٥- الف) مشاهده شود. این نوسانات ناشی از آسیب باعث افزایش مقدار آنتروپی در درجه آزادی آسیب‌دیده می‌شود. تشخیص افزایش مقدار آنتروپی براساس الگوریتم پیشنهادی در هر درجه آزادی ابزار شناسایی مکان آسیب خواهد بود.

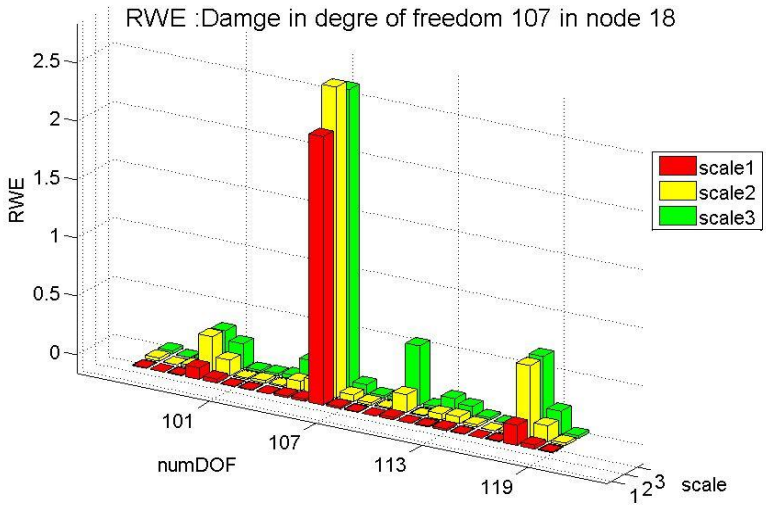



(الف) سیگنال‌های شتاب درجهٔ آزادی ۵ام در هر گره در سناریوی آسیب SD1 پیش از اعمال نویز

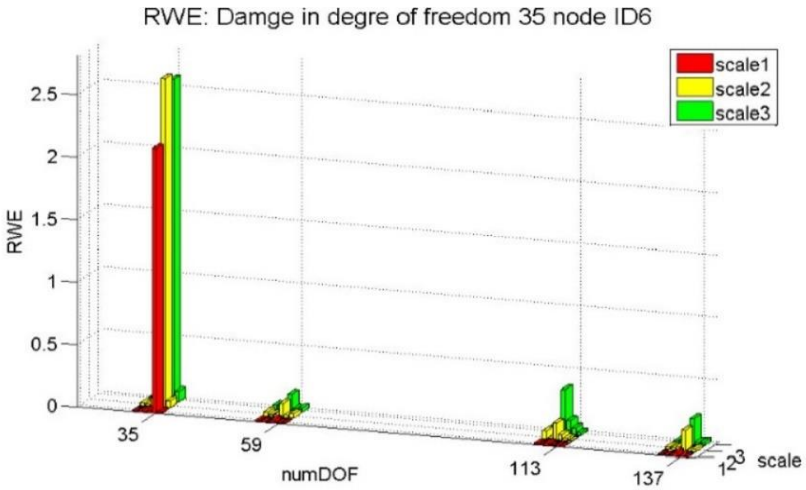



(ب) سیگنال‌های شتاب درجهٔ آزادی ۵ام در هر گره در سناریوی آسیب SD1 پس از اعمال نویز

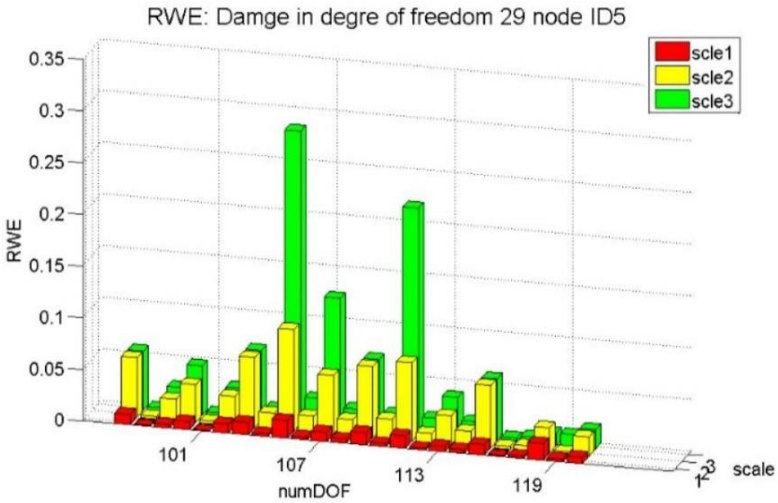
شکل ٤ سیگنال‌های شتاب درجهٔ آزادی ۵ام در هر گره در سناریوی آسیب SD1



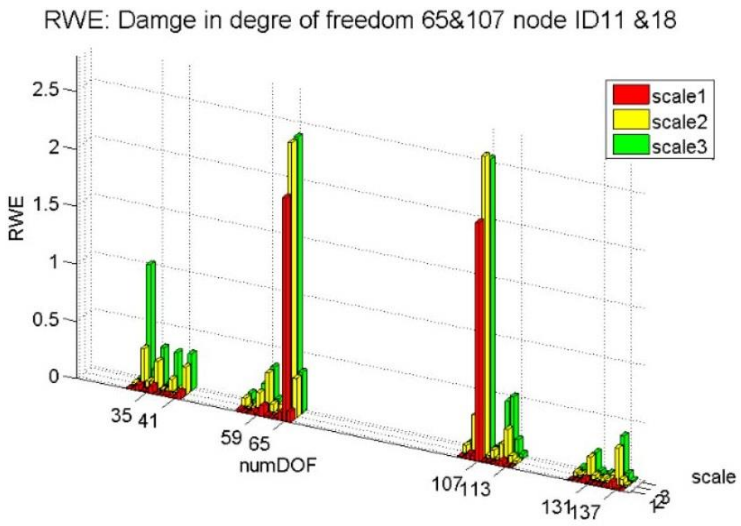

(الف) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب SD1




(ب) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب SD2




(پ) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب SD3




(ت) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب DD1

شکل ۵ مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در چهار سناریوی آسیب

## ارزیابی نتایج آماری از شناسایی آسیب بااستفاده از روش شاخص آسیب

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادشده، سناریوهای آسیب متفاوتی درنظر گرفته شده‌است و تنها نتایج مربوط به چهار سناریوی معرفی شده در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌است. مقدار تغییرات در شاخص آسیب معرفی‌شده برای تبدیل موجک گسستهٔ معرفی شده در شکل (۵) نشان داده شده‌است. افزایش شدید در شاخص آسیب در مکان آسیب به‌سادگی و تنها در سه مقیاس قابل مشاهده است. ازاین‌رو براساس تبدیل موجک گسسته از این شاخص می‌توان آن را به‌عنوان یک شاخص مؤثر در روش شناسایی آسیب درنظر گرفت (شکل ۵- الف).

همان‌گونه که در شکل (۵- ب) مربوط به نتایج ارزیابی برمبنای سناریوی آسیب $SD_2$ مشخص است، هنگامی‌که مکان‌های مورد بررسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند امکان شناسایی آسیب وجود دارد. پس با توزیع متفاوت محل‌های مورد بررسی نیز الگوریتم پیشنهادی توانایی شناسایی محل آسیب‌دیده را دارد. این قابلیت نشان می‌دهد که نیاز به گزینش مکان مورد بررسی وجود ندارد. این قابلیت در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری را دارد.

در شکل (۵- پ) نتایج ارزیابی سناریوی آسیب $SD_3$ نشان داده شده‌است. هنگامی‌که همهٔ مکان‌های مورد بررسی در درجات آزادی سالم قرار دارد تفاوت برجسته‌ای در مقدار شاخص آسیب مشاهده نمی‌شود. ازاین‌رو می‌توان حساسیت خوب شاخص در عملکرد موضعی الگوریتم پیشنهادشده را به‌عنوان یک قابلیت مهم برشمارد. این دقت در شناسایی آسیب فقط در محل آسیب‌دیده را می‌توان به‌عنوان یک قابلیت مهم برشمرد. همان‌طور که در شکل (۵- پ) مشخص است مقدار شاخص آسیب تا سه مقیاس در گره‌های مورد بررسی بسیار ناچیز است. اما با این وجود مقدار آنتروپی در مجاورت آسیب اندکی بیشتر می‌باشد که می‌تواند راهنمای مناسبی در انتخاب نقاط مورد بررسی در مراحل بعدی ارزیابی مورد توجه قرار گیرد. این قابلیت در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری دارد.

در سناریوی آسیب دوگانه $DD_1$ که نتایج آن در شکل (۵-ت) نشان داده شده‌است، با افزایش تعداد مکان های مورد بررسی و افزایش تعداد مکان های آسیب‌دیده، شاخص شناسایی آسیب توانایی تشخیص محل آسیب‌دیده را دارد.

همان‌گونه که از نتایج عددی به‌روشنی قابل مشاهده است، روش شناسایی آسیب پیشنهاد شده در شناسایی مکان‌های آسیب و به‌صورت دقیق درجه آزادی آسیب‌دیده به‌گونهٔ مؤثری و تنها در سه مقیاس عمل می‌کند. این قابلیت در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری دارد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش شناسایی آسیب براساس آنتروپی موجک برمبنای تبدیل موجک گسسته پیشنهاد شده‌است. به‌منظور نمایش کارایی شاخص آسیب معرفی‌شده برای این تبدیل موجک، کارایی الگوریتم پیشنهادی در مدل سازهٔ سه‌بعدی نمایش داده شد. امکان استفاده از این الگوریتم در سناریوهای دیگر آسیب نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است و آسیب به‌صورت صحیح شناسایی شده‌است.

نتایج به‌کارگیری این روش شناسایی را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱. الگوریتم و شاخص پیشنهادی، توانایی شناسایی دقیق مکان آسیب را داراست.

۲. در هر یک از نمونه‌های تکی و چندگانهٔ آسیب، همهٔ درجات آسیب‌دیده می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیز در هر سناریوی آسیب شناسایی شوند.

۳. شاخص آنتروپی پیشنهادشده در درجات آزادی سالم تحت تأثیر وجود آسیب در درجات آزادی مجاور قرار نمی‌گیرد، اما تغییرات می‌توانند راهنمای مناسبی برای مراحل بعدی ارزیابی باشند.

باتوجه به این‌که یکی از مزایای استفاده از تبدیل موجک گسسته، محاسبات کمتر نسبت به تبدیل فوریه سریع (Fast Fourier Transform(FFT)) می‌باشد [2]، بنابراین به‌ارگیری مفهوم آنتروپی موجک در فرایند تبدیل موجک گسسته باعث بهبود فرایند شناسایی آسیب خواهد شد. این قابلیت‌ها در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری را دارد. لازم به ذکر است که ارزیابی سرعت شناسایی پس از ارزیابی دقت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هم‌چنین ارزیابی تنها با آسیب سیگنال‌های ارتعاشی در این مقاله انجام شده‌است، روش پیشنهادی شایستهٔ ارزیابی به‌منظور انواع دیگر از آسیب و سازه به‌صورت عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

## مراجع


1. Saadat, S.,"Structural Health Monitoring and Detection of Progressive and Existing Damage Using Artificial Neural Networks-Based System Identification", Ph.D. Thesis, NC State University Libraries, (2003).
2. Lee, G.,"Hybrid Damage Identification Based on Wavelet Transform and Finite Element Model Updating", Ph.D. Thesis, University of Akron, (2012).
3. Biglari, A., and Ashurzade, M.,"Damage Detection for Structures by Relative Wavelet Entropy Method", *Proceedings of The 2nd International Conference on Civil Engineering*, Architechtcer and Urban Management, Vol. 1, pp. 1-11, Iran, (2019).
4. Diao, Y., Zhang, X., Sun, Z., Guo, K. and Wang, Y.,"Wavelet Entropy Based Structural Damage Identification Under Seismic Excitation", Smart Materials and Structures, Vol. 27, pp. 1-11, (2018).
5. Ravanfar, S. A., "Vibration-Based Structural Damage Detection and System Identification Using Wavelet Multiresolution Analysis", Ph.D. Thesis, University Of Malaya, (2017).

6. Sifuzzaman, M., Islam, M. and Ali, M.,"Application of Wavelet Transform and Its Advantages Compared to Fourier Transfor", *Journal of Physical Sciences,* Vol. 13, pp. 121-134, (2009).
7. Kankanamge, L.,"Application of Wavelet Transform in Structural Health Monitoring", Master's Theses, Western Michigan University, (2016).
8. Balili, C.C., Sobrepena, M. C. C., and Naval, P. C.,"Classification of Heart Sounds Using Discrete and Continuous Wavelet Transform and Random Forests", *3rd IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR),* Kuala Lumpur, Vol. 1, pp. 655-659, (2015).
9. Chakrabarti, C., and Vishwanath, M.,"Efficient Realizations of the Discrete and Continuous Wavelet Transforms: From Single Chip Implementations to Mappings on Simd Array Computers", *IEEE Transactions on Signal Processing,* Vol. 43, No. 3, pp. 759-771, (1995).
10. Rioul, O., and Duhamel, P.,"Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transforms", *IEEE Transactions on Information Theory,* Vol. 38, No. 2, pp. 569-586, (1992).
11. Kankanamge, Y, Hu, Y., and Shao, X.,"Application of Wavelet Transform in Structural Health Monitoring", *Earthq. Eng.* Eng. Vib. Vol. 19, pp. 515–532, (2020).
12. Barbosh, M., Singh, P., and Sadhu, A.,"Empirical Mode Decomposition and Its Variants: A Review With Applications in Structural Health Monitoring", *Smart Materials and Structures,* Vol. 29,pp. 1-20, (2020).
13. Zare, H. A., Ghodrati, A. G., and Razzaghi, S. A.,"A New Damage Index for Structural Damage Identification by means of Wavelet Residual Force", *International Journal of Optimization In Civil Engineering,* Vol. 2, pp. 269-286, (2016).
14. Yanab, G., Dong, Z., Jinping, D., and De Stefano, O.,"Structural Damage Detection Using Residual Forces Based on Wavelet Transform", *Mechanical Systems and Signal Processing,* Vol. 24, pp. 224-239, (2010).
15. Silva, A., Zarzo, A., Manue, J., González, M., Manue, J., and Guijosa, M.,"Early Fault Detection of Single-Point Rub in Gas Turbines with Accelerometers on the Casing Based on Continuous Wavelet Transform", *Journal of Sound andVibration,* Vol. 487, pp. 1-21, (2020).
16. Yun, G.J., Lee, S.G., Carletta, J., and Nagayama, T.,"Decentralized Damage Identification Using Wavelet Signal Analysis Embedded on Wireless Smart Sensors", *Engineering Structures,* Vol. 33, pp. 2162-2172, (2011).
17. Ren, W.X., and Sun, Z. S.,"Structural Damage Identification by Using Wavelet Entropy", *Engineering Structures,* Vol. 30, pp. 2840-2849, (2008).
18. Pakrashi, V., O'connor, A., and Basu, B.,"A Study on the Effects of Damage Models and Wavelet Bases for Damage Identification and Calibration in Beams", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,* Vol. 22, pp. 555-569, (2007).

19. Poudel, U.P., Fu, G., and Ye, J.,"Wavelet Transformation of Mode Shape Difference Function for Structural Damage Location Identification", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 36, pp. 1089-1107, (2007).
20. Noori, M., Wang, H., Altabey, W.A., and Silik, A.I.H.,"A Modified Wavelet Energy Rate-Based Damage Identification Method for Steel Bridges", *Scientia Iranica*, Vol. 25, pp. 3210-3230, (2018).
21. Biglari, A., Harrison, P. and Bićanić, N.,"Quasi-Hinge Beam Element Implemented within the Hybrid Force-Based Method", *Computers & Structures*, Vol. 137, pp. 31-46, (2014).
22. Stark, H.G.,"Continuous Wavelet Transform and Continuous Multiscale Analysis", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 169, pp. 179-196, (1992).
23. Craig, R.R., and Kurdila, A.J.,"Fundamentals of Structural Dynamics", John Wiley & Sons, (2006).
24. Ibrahim, R., and Pettit, C.,"Uncertainties and Dynamic Problems of Bolted Joints and Other Fasteners", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, pp. 857-936, (2005).
25. Lee, S.G., Yun, G.J., and Shang, S.,"Reference-Free Damage Detection for Truss Bridge Structures by Continuous Relative Wavelet Entropy Method", *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, pp. 307-320, (2014).

# بهینه‌سازی فنی اقتصادی مجموعه روسازی آسفالتی و اساس تثبیت‌شدهٔ مطالعهٔ موردی محور اردکان-نائین* پژوهشی

مصطفی آدرسی[۱]

**چکیده** *هدف مطالعهٔ حاضر تعیین درصد مناسب تراشهٔ آسفالت و سیمان در مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان است به‌گونه‌ای که عامل دوام و اقتصادی بودن روسازی، هم‌زمان درنظر گرفته شوند. ازاین‌رو مقاومت فشاری و کششی در درصدهای مختلف RAP شامل ۰٪، ٤۰٪، ٦۰٪ و ۸۰٪ و در درصدهای مختلف سیمان شامل ۳٪، ۵٪ و ۷٪ به‌دست آورده شد. درادامه روسازی تحت بار استاندارد ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلیون ESALs تعیین ضخامت شد. با برقراری رابطه بین درصد تراشهٔ آسفالت، درصد سیمان، عدد شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در دوام، و هزینه‌ی اجرای روسازی در بارهای مختلف، معادلهٔ هم‌زمان هزینهٔ دوام روسازی تشکیل گردید. نهایتا براساس تکنیک بهینه‌سازی میزان درصد بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان در مخلوط‌ها به‌منظور دست‌یابی به دوام مورد انتظار (TSR= ۷۰) تعیین گردید. بر این اساس جواب بهینهٔ تابع هزینه که تابعی از سطح بارگذاری است، در مقدار ۲۹,٦ درصد تراشهٔ آسفالت، ٤,۱٦ درصد سیمان و در حداقل سطح بارگذاری حاصل شد. از نتایج مقالهٔ فوق می‌توان با تقریب مناسبی در طرح سازه‌ای روسازی بادوام و اقتصادی حاوی اساس تثبیت‌شده با سیمان و مقادیر مختلف تراشهٔ آسفالت بهره برد.*

**واژه‌های کلیدی** تراشهٔ آسفالت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام مخلوط، طرح اقتصادی.

# Economic and Durability Optimization of Asphalt Pavement with Cement Stabilized Base Mixtures Ardakan-Naeen Case Study

M. Adresi

**Abstract** *The purpose of this study is to determine the appropriate percentage of RAP and cement in the stabilized base in such a way that the durability and economics of the pavement are considered simultaneously. Therefore, compressive and tensile strength was obtained in different percentages of RAP including 0%, 40%, 60%, and 80%, and indifferent percentages of cement including 3%, 5%, and 7%. The structural design of the Pavement was further determined under 10, 20, 35, and 50 million ESALs. By establishing the relationship between the percentages of RAP, percentage of cement, and moisture sensitivity index (TSR) as an effective parameter in durability, and the cost of paving at different loads, a simultaneous cost-durability equation of pavement was formed. Finally, based on the optimization technique, the optimal percentage of RAP and cement to achieve the expected durability (TSR = 70) was determined. Hence, the optimum cost, which is a function of the loading level, was obtained in the amount of 29.6% of RAP, 4.16% of cement, and in the minimum loading level. The results can be appropriately approximated in the design of durable and economical pavement structures Contains a stabilized base with cement and various amounts of RAP.*

**Key Word** RAP, Compressive strength, Tensile strength, mixed durability, Economical structural mix design.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۷/۱۲تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/٦/۸و از صفحه ۱۷ تا ۳٤ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.

**Email:** M.adresi@sru.ac.ir

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه مهندسان راه، طرح ضخامت روسازی‌های حاوی تراشهٔ آسفالت بازیافتی می‌باشد. این طرح ضخامت براساس درصد تراشهٔ آسفالتی موجود در قشر روسازی می‌تواند گامی مهم در اقتصادی‌بودن طرح روسازی باشد. به‌منظور اقتصادی‌بودن و انتخاب درصد مناسب تراشهٔ آسفالتی موجود در مخلوط باید به دو نکته یعنی هزینهٔ اجرا و برآورده نمودن حداقل دوام مورد انتظار مخلوط اساس تثبیت‌شده توجه داشت. یکی از کاربردهای مهم استفاده از تراشهٔ آسفالتی، استفاده از آن در قشر اساس می‌باشد که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش استفاده از مصالح طبیعی شود و هم‌چنین باتوجه به دارا بودن قشر نازک قیر اطراف سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش ضریب اصطکاک درونی مصالح لایهٔ اساس و هم‌چنین اتصال ضعیف قیر با مصالح اطراف خود، به نوعی مقاومت لایهٔ اساس حاوی تراشهٔ آسفالت افزایش می‌یابد و درنتیجه از ضخامت قشر رویهٔ آسفالتی کاسته می‌شود. این موضوع خصوصا باتوجه به رشد روزافزون قیمت قیر امری بسیار مهم تلقی می‌گردد. از جمله عوامل مؤثر در طرح ضخامت روسازی شامل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان، توجه به خصوصیات مقاومتی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان می‌باشد. از جمله مهم‌ترین خصوصیات مقاومتی که در قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان مدنظر است، مقاومت فشاری و کششی مخلوط‌های فوق می‌باشد. طاها و همکاران به بررسی تأثیر تراشهٔ آسفالت از صفر درصد تا ۱۰۰ درصد در کیفیت لایه‌های اساس و زیر اساس پرداختند. آنها دریافتند که با افزایش تراشهٔ آسفالت به مخلوط‌های اساس و زیر اساس تثبیت‌شده، چگالی خشک مخلوط به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. هم‌چنین با بررسی CBR دریافتند که در لایهٔ زیر اساس با افزایش ۱۰۰ درصدی تراشهٔ آسفالت به‌عنوان سنگدانه‌های لایهٔ زیر اساس، باز هم حداقل CBR مورد نظر قابل تأمین هست [1]. این مقدار برای لایهٔ اساس به ۱۰ درصد استفاده از تراشهٔ آسفالت برای رسیدن به CBR ۸۰ درصد محدود شد. هم‌چنین در تحقیق دیگری با اضافه کردن CKD (Cement kiln dust) به اساس حاوی تراشهٔ آسفالت به این نتیجه رسید که تا ۱۰۰ درصد تراشهٔ آسفالت می‌توان به مخلوط اساس اضافه کرد [2]. با این کار هزینهٔ لایهٔ اساس به‌شدت کاهش خواهد یافت [3] و لایهٔ اساس جدید از تراوایی بیشتری نسبت‌به لایهٔ اساس متداول بدون تراشهٔ آسفالت برخوردار است [4]. آدرسی و همکاران در یک تحقیق با بررسی رفتار اساس تثبیت‌شده با مقادیر متفاوت سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت و درنظر گرفتن اثرات دما و رطوبت بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های تثبیت‌شده دریافتند که با افزایش تراشهٔ آسفالت چگالی خشک مخلوط به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مطالعات نشان داد که با افزایش درصد تراشهٔ آسفالت در مخلوط با شرایط بحرانی مرطوب ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و خشک ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، مقاومت فشاری محدود نمی‌شود و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های تثبیت‌شده کاهش می‌یابد [6] ,[5]. لینگ‌یونگ و همکاران با اضافه کردن اساس ماکادمی بازیافتی که با سیمان تثبیت شده بود برای ساخت آسفالت گرم دریافتند که برای بهبود مقاومت در برابر رطوبت، از پرکننده‌های سیمان و آهک هیدراته می‌توان به‌طور مؤثری استفاده کرد. آنها ترکیب ۱٫۷۵٪ وزن سیمان/ آهک هیدراته (۱: ۱) را برای رسیدن به بهترین عملکرد مقاومت در برابر رطوبت پیشنهاد دادند [7]. علم و همکاران در تحقیقی سعی کردند خواص مکانیکی مخلوط‌های اساس با درصدهای مختلف تراشهٔ آسفالت از قبیل مدول برجهندگی این مخلوط‌ها را مورد بررسی قرار دهند. آنها دریافتند که با افزایش درصد تراشهٔ آسفالت در لایهٔ اساس، مدول برجهندگی لایهٔ اساس افزایش می‌یابد و درنتیجه استحکام لایهٔ زیرین لایهٔ آسفالتی ارتقا می‌یابد و از ضخامت لایهٔ آسفالتی می‌کاهد [8]. مسعود فرامرزی و همکاران اشاره دارند که روسازی‌های آسفالتی یا بتنی که از لایهٔ اساس تثبیت‌شده

با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت استفاده کرده‌اند دارای ترک‌های انعکاسی ناشی از تردشدگی لایهٔ اساس تثبیت‌شده هستند. آنها با پیشنهاد مخلوط اساس تثبیتی جدید حاوی تراشهٔ آسفالت، سیمان، قیر امولسیونی، اکرولیک پلیمر توانستند به عملکرد بهتری در این حوزه دست یابند و ترک‌های انعکاسی را تا حدود زیادی کنترل کنند [10] ,[9]. در تحقیقی دیگر مهتا و همکاران قطعات مختلف روسازی آسفالتی را که لایهٔ اساس آن توسط روش‌های مختلف به‌سازی عمقی تثبیت شده بود و توسط چسباننده‌های مختلف از قبیل قیر امولسیون، سیمان، CaCL2 و ژئوتکستایل به‌همراه تراشهٔ آسفالت اصلاح شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که روسازی آسفالتی شامل لایهٔ اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت نسبت‌به دیگر روش‌های تثبیت دربرابر ترک‌های خستگی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد [11]. ماهر و همکاران متوجه شدند که مصالح RAP نسبت‌به مصالح دانه‌ای از مدول برجهندگی و مدول الاستیک میدانی بیشتری برخوردارند [12]. طاها رمزی و همکاران اثر مقادیر متفاوت سیمان و تراشهٔ آسفالت را روی ضخامت روسازی بدون درنظر گرفتن اثرات دوامی و هم‌چنین مسائل اقتصادی طرح روسازی نهایی‌شده، بررسی کردند آنها به این نتیجه رسیدند که در تمام مخلوط‌های اساس حاوی تراشهٔ آسفالت بدون استفاده از سیمان، با افزوده شدن مقادیر تراشهٔ آسفالت در مقایسه با اساس ساخته شده با ۱۰۰درصد مصالح طبیعی، ضخامت لایهٔ رویه افزایش می‌یابد. این به‌دلیل ضعف بیشتر لایهٔ حاوی تراشهٔ آسفالت در مقایسه با لایهٔ بدون تراشهٔ آسفالت است. آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه مقادیر تراشهٔ آسفالت کمتر باشد و مقادیر سیمان بیشتر باشد، از ضخامت لایهٔ رویه و اساس تثبیت‌شده کاسته خواهد شد. هم‌چنین بر خلاف لایه تثبیت‌نشده که ضخامت لایهٔ رویه بیشتر از اساس تثبیت‌نشده است، با تثبیت لایهٔ اساس ضخامت لایهٔ رویه کمتر از ضخامت لایهٔ اساس تثبیت‌شده می‌شود بدین مضمون که نقش باربری از لایهٔ رویه به لایهٔ اساس تثبیت‌شده تغییر می‌کند [12].

تحقیقات زیادی برروی مخلوط های اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت به‌منظور تعیین مقدار بهینهٔ سیمان و تراشهٔ آسفالت براساس معیار مقاومت فشاری محدودنشدهٔ مجاز این‌گونه مخلوط‌ها و تأثیر آن بر عملکرد کل روسازی انجام شده‌است که همگی مقدار ۳ الی ۵ درصد سیمان را پیشنهاد نموده‌اند [13] ,[12] ,[6]. محدودهٔ مجاز مقاومت فشاری محدودنشده بین ۳۰۰ الی ۵۰۰ psi در بین مراجع مختلف پیشنهاد شده‌است [14]. بر این اساس حداکثر ۵۰۰ psi به‌منظور کنترل صلبیت لایهٔ تثبیت شده و جلوگیری از بروز ترک در لایهٔ تثبیت شده و کاهش ریسک ترک انعکاسی در لایهٔ رویه تعیین شده است.

طبق نظر مؤسسهٔ به‌سازی و بازیافت آسفالت (ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)، حداقل TSR برای مخلوط‌های آسفالتی به‌روش بازیافت سرد (cold recycled asphalt mixtures) CRAM باید ۰٫۷۰ باشد، با این حال ممکن است به ۰٫۶۰ کاهش یابد. هم‌چنین ARRA اظهار داشت که حداقل قدرت ITS CRAM در ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد باید ۳۱۰ کیلو پاسکال باشد [15].

ایار [16] با بررسی جامع مخلوط‌های تثبیت‌شده با قیر امولسیونی این‌طور جمع‌بندی کرد که استفاده از سیمان پوزولانی حاوی مخلوط های بازیافتی حاوی امولسیون قیری (RMBE (Recycled Mixture with Bitumen Emulsion) در مقایسه با سیمان پرتلند حاوی RMBE رفتار خستگی بالاتری دارد. چند سال بعد، نتایج مشابهی توسط اجوم گزارش شد که بااستفاده از سیمان تا ۳٪ می‌تواند مقاومت خستگی RMBE را بهبود بخشد در حالی که سطح کرنش کمتر از ۲۰۰ میکرون باشد. اگرچه نتایج این مطالعات نشان داد که به‌طور کلی افزودن سیمان به RMBE می‌تواند باعث کاهش عمر خستگی در جاده‌های پرترافیک شود. باید

توجه داشت که سطح کرنش RMBE که اغلب به‌عنوان یک لایهٔ زیرین در سیستم‌های روسازی استفاده می‌شود به‌ندرت از ۲۰۰ میکرون عبور می‌کند. بنابراین، استفاده از سیمان (تا ۳٪) به‌عنوان مادهٔ افزودنی در RMBE می‌تواند عمر خستگی را افزایش دهد.

باتوجه به مطالعات گذشته عموم معیارهای مورد پذیرش برای طرح سازه‌ای روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده، براساس مقادیر و محدودهٔ مجاز مقاومت فشاری محدودنشده استوار می‌باشد. نکته‌ای که در این‌جا باید بدان توجه کرد مطالعات محدودی است که به بررسی مسئلهٔ دوام و تأثیر آن بر طرح اختلاط و تعیین مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان و هم‌چنین طرح سازه‌ای این‌گونه روسازی‌ها می‌پردازد. نوآوری این تحقیق، تعیین درصد تراشهٔ آسفالت و سیمان بهینهٔ مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان تحت طیف وسیعی از بارگذاری ترافیک و با در نظر گرفتن دو دیدگاه دوام مخلوط و هزینه‌ی اجرای به‌صورت توأمان است.

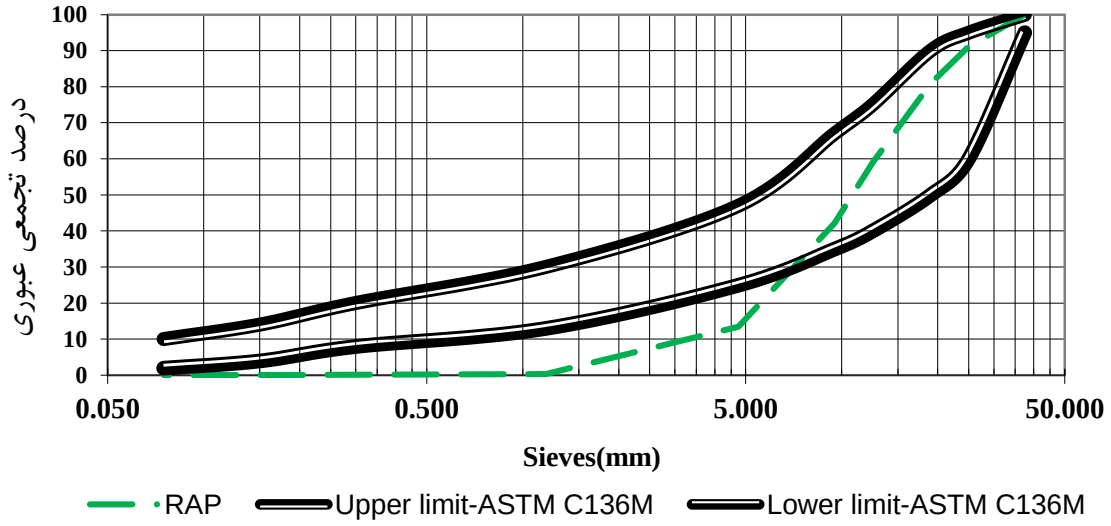
## روش انجام آزمایش و مواد و مصالح مصرفی

تراشهٔ آسفالت مورد استفاده در این تحقیق از مصالح تراش داده‌شدهٔ واقع در محور اردکان- عقدا در استان یزد تهیه گردید. محور فوق یکی از پرترددترین محورهای مواصلاتی بین شهری است و از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌دلیل اهمیت زیاد و خرابی نسبتا قابل توجه محور، لازم دیده شد تا محور فوق با تثبیت قشر اساس و سپس آسفالت برروی آن بازسازی شود. بررسی‌های انجام‌شده براساس آزمایش احیای قیر (آزمایش اکستراکشن به‌روش دستی) [17] روی چند نمونهٔ خرده آسفالتی نشان داد که به‌طور متوسط، میزان قیر مربوط به این تراشهٔ آسفالت برابر با ٤,٥٪ و سختی قیر پسماند در حدود ۳۰ دهم میلی‌متر براساس استاندارد [18] نفوذ سوزن تعیین شد. دانسیتهٔ مصالح تراشهٔ آسفالتی ۲٥٤۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب آن در حدود ۰,٤ درصد براساس استاندارد [19] تعیین شد.

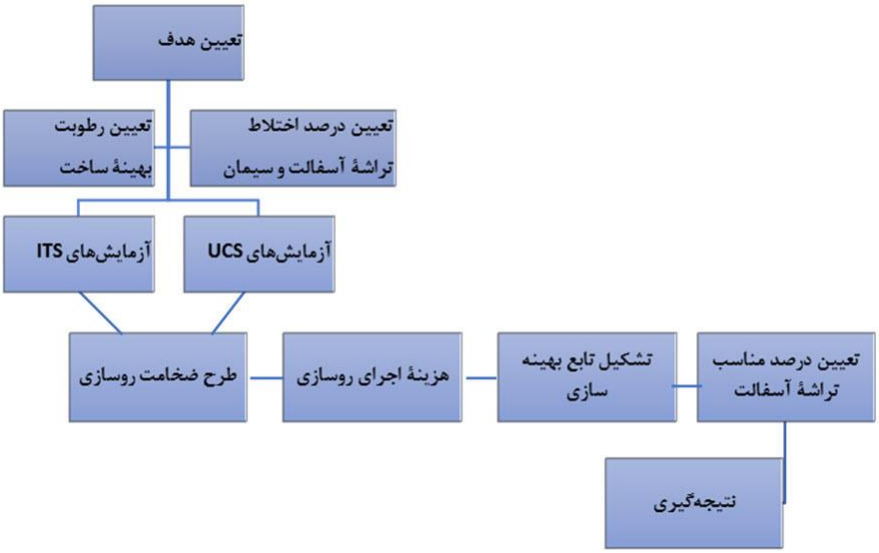
هم‌چنین نمودار دانه‌بندی مصالح تراشهٔ آسفالت براساس استاندارد [20] در شکل (۱) نشان داده شده است. در این نمودار محدودهٔ مجاز دانه‌بندی براساس استاندارد [19] نشان داده شده‌است.

در این مقاله ابتدا با درنظر گرفتن مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف تراشهٔ آسفالت شامل ۰٪، ٤۰٪، ٦۰٪ و ۸۰٪ و هم‌چنین مقادیر مختلف ۳٪، ٥٪ و ۷٪ سیمان اقدام به ساخت مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان شد. بدین ترتیب با درنظر گرفتن متغیرهای موردنظر، ۱۲ نوع طرح اختلاط مورد توجه است. به‌منظور تهیهٔ نمونه‌های مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم، مخلوط‌های تهیه‌شده در قالب‌های استوانه‌ای به‌قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در رطوبت بهینه [21] تحت تراکم استاندارد اصلاح‌شده کوبیده شدند. سپس بعد از ۷ روز عمل‌آوری نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری [22] و کششی [23] در دو وضعیت خشک و مرطوب قرار گرفتند. با تقسیم نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مرطوب به خشک شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR) که بیانگر حساسیت رطوبتی مخلوط تثبیت‌شده است، به‌دست آمد که به‌عنوان مبنایی برای بررسی دوام مخلوط‌های تثبیت‌شده مورد نظر است [24] ,[6]. در ادامه براساس نتایج مقاومتی به‌دست‌آمده و با بهره‌گیری از رابطهٔ ون‌تیل، اقدام به طرح ضخامت روسازی حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان در بارهای مختلف شد. نهایتا با تشکیل تابع هزینهٔ اجرای هر یک از روسازی‌های فوق، درصد مناسب تراشهٔ آسفالت با درنظر گرفتن دو دیدگاه اقتصادی بودن طرح و برآورده نمودن شاخص دوام مورد انتظار که در این مقاله برابر با ۷۰ لحاظ شد، به‌دست آمد.

فلوچارت روش تحقیق این مقاله را می‌توان در قالب شکل (۲) خلاصه نمود. (آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده (Unconfined compressive strength) UCS) و مقاومت کششی غیرمستقیم (Indirect tensile strength) ITS).




شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح تراشهٔ آسفالتی و محدودهٔ مجاز دانه‌بندی مصالح اساس حاوی تراشهٔ آسفالت

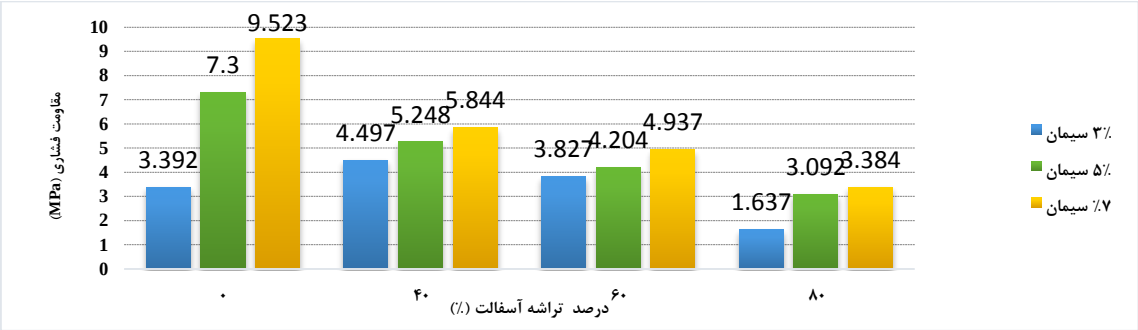



شکل ۲ فلوچارت روش تحقیق مقالهٔ فوق

## تحلیل و تفسیر نتایج

### نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

از جمله مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزهٔ آنها می‌باشد. از نتایج این آزمایش‌ها به‌منظور دست‌یابی به ضریب قشر معادل و مدول برجهندگی قشر فوق دررا ستای طراحی ضخامت رو سازی می‌توان بهره برد. بارگذاری وارده به نمونه‌ها به‌صورت کنترل کرنش بود و سر عت کرنش نمو نه ۱ mm/min تعیین شد. شکل (۳) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.




شکل ۳ تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد تراشهٔ آسفالت

مطابق با نمودار ترسیم شده ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد تراشهٔ آسفالت مقاومت فشاری محدودنشدهٔ نمونه‌ها کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدودنشده، افزایش می‌یابد. این روند با مطالعات انجام‌شدهٔ گذشته هم‌خوانی دارد [6], [14], [24], [25].

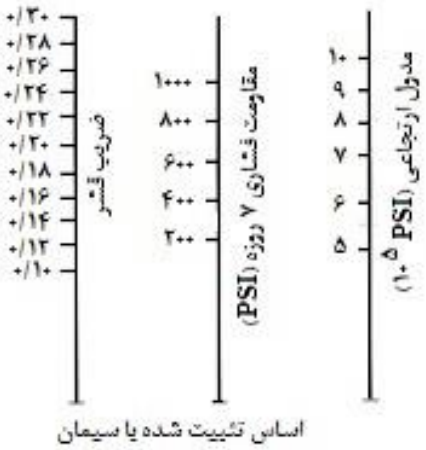
یکی از مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های حاوی قشر اساس تثبیت شده با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت، مدول ارتجاعی آنها می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داد که قشرهای اساس حاوی تراشهٔ آسفالت مدول ارتجاعی بالاتری دارند. از دیگر خصوصیات روسازی حاوی درصد تراشهٔ آسفالتی، تأثیر این مواد در تغییرات ضریب قشر لایهٔ شامل تراشهٔ آسفالتی می‌باشد که مستقیما تأثیر به‌سزایی در ضخامت به‌دست‌آمدهٔ روسازی دارد. براساس نتایج مطالعاتی توسط ون‌تیل، می‌توان رابطهٔ منا سبی بین مقاومت فشاری ۷ روزهٔ قشر اساس تثبیت شده با سیمان با مدول ارتجاعی و ضریب قشر اساس، بیان نمود [26]. شکل (٤) نمودار ون‌تیل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را نشان می‌دهد.

براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده که در نمودار شکل (۳) بیان شد، می‌توان یک رابطهٔ مناسب بین مقاومت فشاری محدودنشدهٔ مخلوط، درصد تراشهٔ آسفالتی و سیمان به‌شرح معادلهٔ (۱) بیان نمود.

$$UCS = 4.350 - 0.062 * Rap + 0.583 * Cement \quad (۱)$$

که در معادلهٔ فوق UCS مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط‌ها برحسب (MPa)، Rap درصد تراشهٔ آسفالتی موجود در مخلوط‌ها و Cement درصد سیمان موجود در مخلوط‌ها می‌باشد.

با بهره‌گیری از معادلهٔ (۱) و رابطه نموداری ارائه‌شده توسط ون‌تیل به‌سادگی می‌توان مدول ارتجاعی و ضریب قشر معادل اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت را به‌دست آورد و نهایتا به طرح ضخامت لایه‌های مختلف روسازی پرداخت.




شکل ٤ رابطهٔ بین مقاومت فشاری با ضریب قشر و مدول ارتجاعی [27]

## نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم

از دیگر خصوصیات مهم لایه‌های تثبیت شده با سیمان مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام آنها می‌باشد. در این مقاله به‌منظور بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها، اقدام به ساخت نمونه‌های استوانه‌ای به‌منظور بررسی این خصوصیت گردید. از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم و ضعیت مرطوب نسبت‌به خشک می‌توان به شاخص نسبی دوام مخلوط ها (TSR) دست‌یافت. با ضرب نمودن عدد فوق در ۱۰۰، عدد دوام مخلوط اساس تثبیت‌شده با سیمان به‌دست می‌آید. این عدد، دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را دربرابر نفوذ آب به مخلوط و کاهش چسبندگی بین چسب که در این‌جا فیلم قیر و ملات سیمان با سنگدانهٔ تحت افزایش فشار آب حفره‌ای در فرایند آزمایش می‌باشد، نشان می‌دهد. مراجع مختلف نظرات متفاوتی در رابطه با حد عدد دوام قشر تثبیت‌شده با سیمان دارند که عموما این آستانهٔ دوام بین ۵۰ تا ۷۰ تغییر می‌کند. در این مقاله آستانهٔ عدد دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان برابر با ۷۰ درنظر گرفته شده است [24], [28], [30].

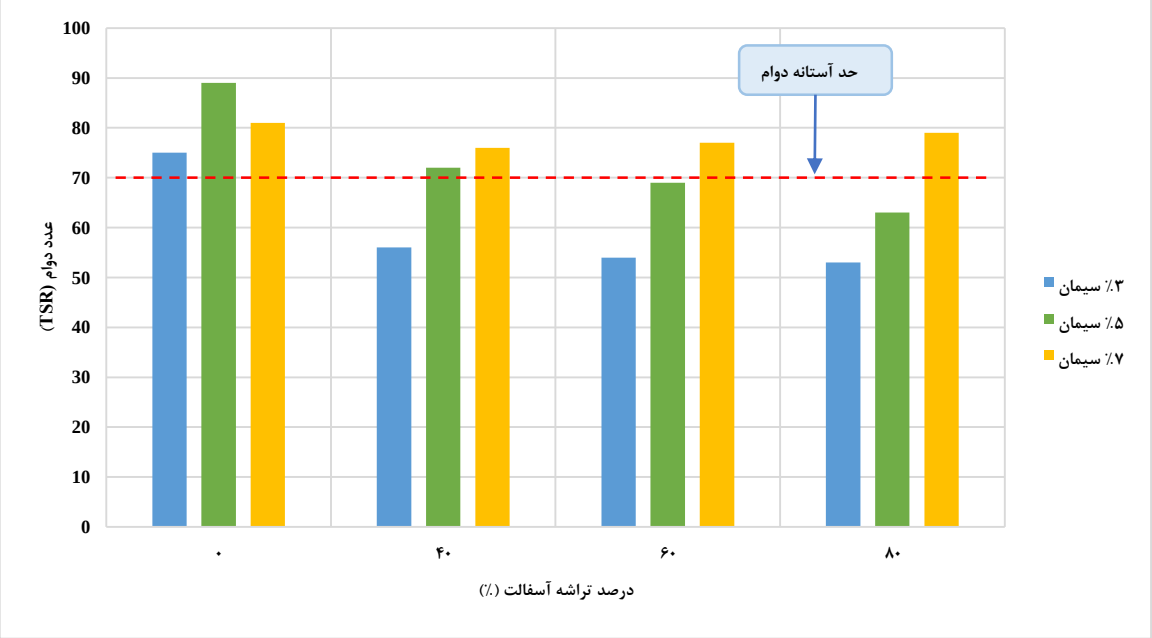
با درنظر گرفتن نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و تعیین پارامتر TSR می‌توان به معادلهٔ دوام به‌شرح معادلهٔ (۲) دست یافت.

$$TSR = 47.49 - 1.116 * Cement^2 + 0.0033 * Rap^2 + 13.029 * Cement - 0.769 * RAP + 0.061 * RAP * Cement \quad (۲)$$

که در معادلهٔ فوق TSR عدد دوام (مثلا ۷۰)، Cement درصد سیمان موجود در مخلوط، Rap درصد تراشهٔ آسفالت موجود در مخلوط است.

با در نظر گرفتن آستانه دوام برابر با ۷۰ و ترسیم نمودار عدد دوام مخلوط های مختلف در شکل (۵) خواهیم داشت.

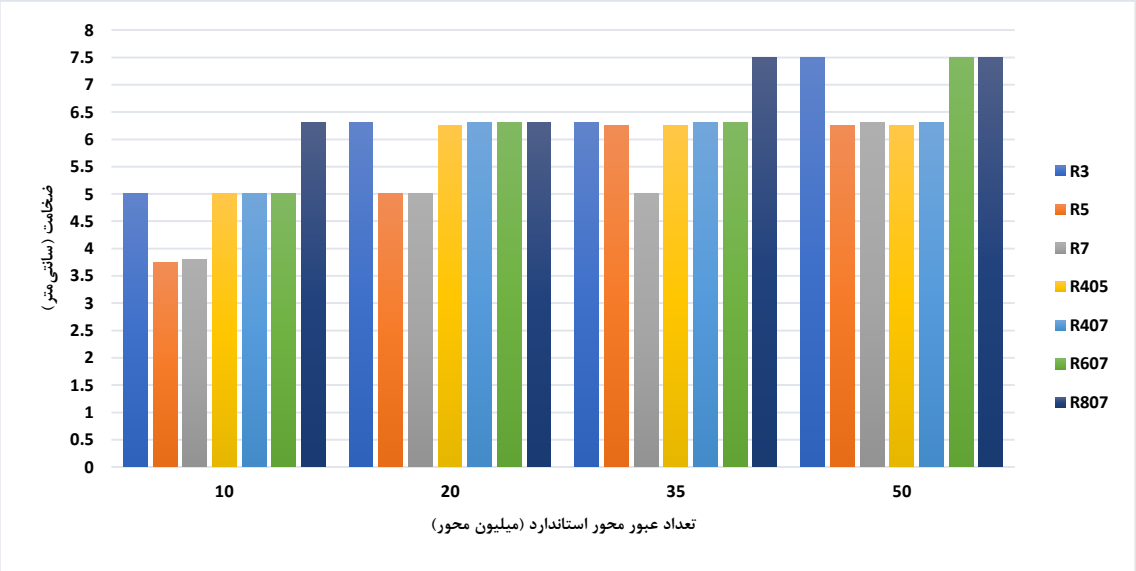
همان‌طور که مشاهده می‌شود بین مخلوط‌های مختلف فقط کدهای R3, R5, R7, R405, R407 , R607, R607 و R807 معیار دوام را برآورده می‌کنند.



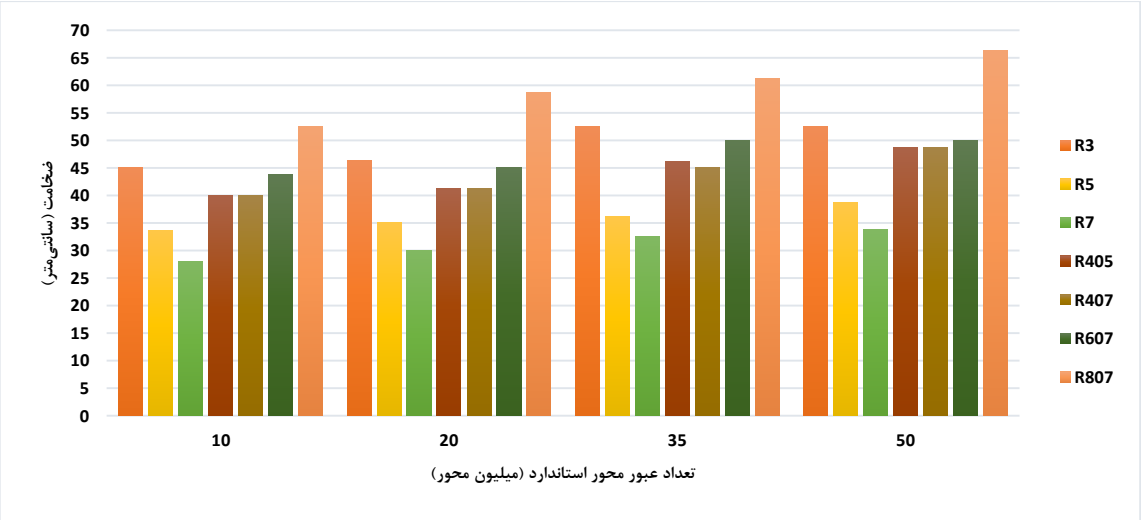

شکل ۵ تغییرات عدد دوام و بررسی مخلوط‌های باکیفیت ازلحاظ دوام

## طراحی روسازی‌های اساس تثبیت‌شده

در این بخش براساس نتایج آزمایش های دوام و مخلوط هایی که الزام عدد دوام را رعایت می‌کردند، اقدام به طرح روسازی‌ها گردید. طرح روسازی‌ها براساس رابطهٔ آشتو و با درنظر گرفتن معیار حداقل ضخامت هر قشر به‌منظور انتقال بار به لایه‌های زیرین انجام گرفت [26]. شکل‌های (٦) و (٧) به‌ترتیب نتایج طرح ضخامت قشر رویه، قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را نشان می‌دهند. قابل‌ذکر است که ضخامت قشر زیراساس براساس رعایت الزام حداقل ۱۵ سانتی‌متر نشریه ۲۳٤ برابر با مقدار زیر در نظر گرفته شد .[27]




شکل ٦ تغییرات ضخامت قشر رویه برحسب تعداد محور عبوری




شکل ٧ تغییرات ضخامت قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان برحسب تعداد محور عبوری

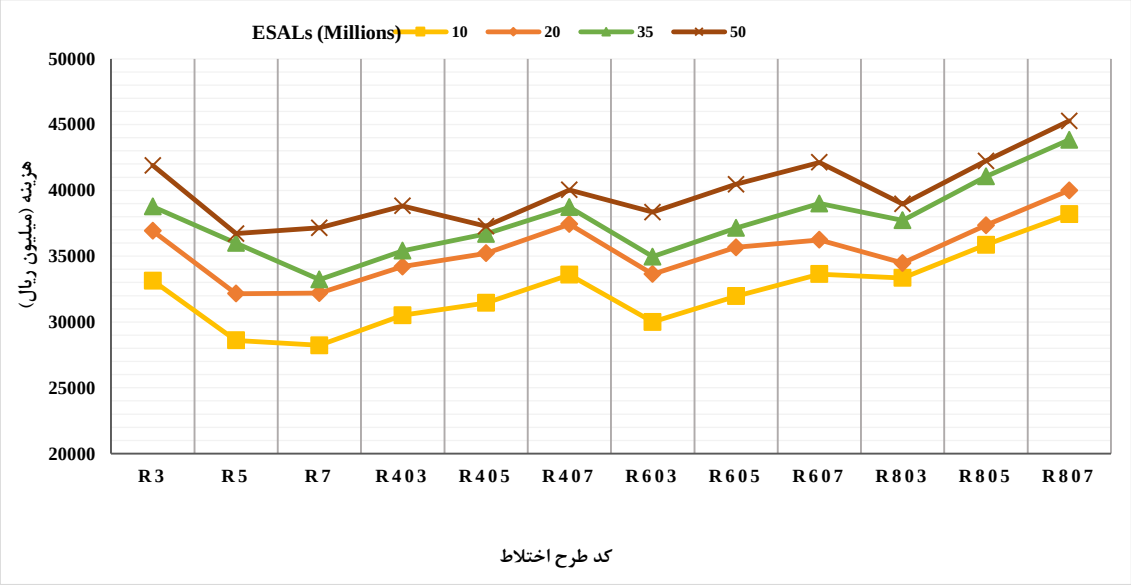
مطابق با نمودارهای ترسیم‌شده می‌توان فهمید، به‌طورکلی مخلوط‌های با کد R3، R5 و R7 نسبت‌به سایر مخلوط‌ها دارای ضخامت قشر رویه و اساس کمتری هستند. دلیل این موضوع عبارت است از این‌که، زمانی‌که قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان درصد تراشهٔ آسفالت بیشتری داشته باشد، ضریب قشر آن کمتر می‌شود و به‌موازات آن، ضخامت قشرهای فوق نیز کاهش می‌یابد. درواقع مطابق با رابطهٔ ون‌تیل هرچه مدول ارتجاعی و ضریب قشر لایهٔ اساس بیشتر باشد، به ضخامت کمتر رویه برای انتقال بار ترافیکی به لایه‌های زیرین نیاز داریم. از ضخامت‌های طراحی‌شدهٔ فوق به‌منظور تعیین هزینهٔ هر یک از رو سازی‌های طرح شده و نهایتا تشکیل تابع هزینه و به‌دست آوردن مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان در مخلوط استفاده می‌شود.

## آنالیز هزینهٔ روسازی‌های طرح‌شده

در این بخش براساس نتایج طرح ضخامت روسازی‌ها، اقدام به تشکیل تابع هزینهٔ روسازی‌ها می‌گردد. در این راستا ابتدا براساس روسازی‌های طرح‌شده و با بهره‌گیری از فهرست‌بهای راه و باند ۱۳۹۳، که در زمان ساخت این محور فهرست‌بهای پایهٔ پیمان بوده‌است، اقدام به متره و برآورد هزینه‌های ساخت راه به‌عرض ۵٫۵ متر (یک خط و شانهٔ مجاورش) و طول ۱۰ کیلومتر می‌گردد که در شکل (۸) نشان داده شده‌است. بدیهی است براساس ضرایب پیمان می‌توان هزینهٔ اجرا را در زمان‌های مختلف دیگر با دانستن ضریب پیمان پایه محاسبه نمود. برای محاسبهٔ هزینهٔ اجرای روسازی مواردی از قبیل، تراشه لایهٔ مضمحل‌شدهٔ موجود، دانه‌بندی مصالح تراشهٔ آسفالت، اضافه نمودن مصالح اساس با فاصلهٔ حمل ۴۰ کیلومتر، مخلوط مصالح اساس و تراشهٔ آسفالت به نسبت‌های (۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪) در درصدهای مختلف سیمان (۳٪، ۵٪ و ۷٪) با فاصلهٔ حمل ۱۲۰ کیلومتر براساس میزان آب بهینه با فاصلهٔ حمل ۴۰ کیلومتر توسط مخلوط‌کن KMA در محل پروژه و حمل به محل اجرا به فاصلهٔ ۱۰ کیلومتر و اجرا و پخش توسط فینیشر و کوبیدگی تا ۹۷٪ تراکم استاندارد اصلاح‌شده به ضخامت به‌دست‌آمده در شکل (۷) (ضخامت هر لایه حداکثر ۲۰ سانتی‌متر درنظر گرفته شد و ضخامت‌های بیشتر در چند لایه محاسبهٔ هزینه شد) و عمل‌آوری تا ۷ روز با آب و کاترزنی به فواصل ۵ متر از هم و پخش آسفالت براساس نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۶) به فاصلهٔ حمل ۴۰ کیلومتر مفروض است. این پژوهش براساس این فرضیات پایه‌ریزی شده‌است.

از آن‌جا که هدف از این پژوهش بررسی اثر میزان تراشهٔ آسفالت و سیمان بر هزینهٔ اجریا مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با احتساب شاخص دوام می‌باشد که در معادلهٔ (۵) فرمول‌بندی شد، هزینهٔ بقیه پارامترها در قالب مقدار ثابت در مدل هزینه وارد شده‌است. بدیهی است که باتوجه به زمان و مکان اجرا، تابع هزینه متفاوت خواهد بود.

در ادامه براساس هزینه‌های طراحی، تابع هزینه به‌صورت تابعی از درصد سیمان و درصد تراشهٔ آسفالت تشکیل‌شده و نهایتا بااستفاده از تکنیک بهینه‌سازی، مقدار درصد مناسب تراشهٔ آسفالت براساس هر دو دیدگاه دوام و هزینه به‌دست می‌آید. شکل (۸) هزینهٔ اجرای روسازی حاوی مقادیر مختلف تراشهٔ آسفالت و سیمان تحت تردد بارهای محوری مختلف شامل ۱۰ میلیون محور الی ۵۰ میلیون محور استاندارد عبوری بدون توجه به مسئلهٔ دوام را نشان می‌دهد. در نمودار شکل (۸) دوازده نوع طرح اختلاط شامل چهار متغیر درصد تراشهٔ آسفالت (۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪) و سه متغیر درصد سیمان (۳٪، ۵٪ و ۷٪) در نظر گرفته‌شده‌است. کدبندی مخلوط‌های نمودار شکل (۸) مشابه با کدبندی نمودار شکل‌های (۶) و (۷) می‌باشد. برای مثال R605 به‌معنای مخلوط حاوی ۶۰٪ تراشهٔ آسفالت و ۵٪ سیمان است.




شکل ۸ هزینه‌ی اجرای روسازی با اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت در تردد بارمحوری مختلف

با استفاده از نتایج هزینهٔ روسازی درج شده در شکل (۸)، می‌توان به تابع هزینه برحسب درصد تراشهٔ آسفالت و درصد سیمان و مقدار بارگذاری محور استاندارد در طول عمر طرح به فرم معادلهٔ (٤) و (٥) و (٦) مطابق زیر دست‌یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین خوبی برازش در مربع درصد تراشهٔ آسفالت (RAP) و توان اول سیمان (Cement) و ESALs توسط معادلهٔ (٥) تخمین زده می‌شود. از این‌رو این معادله به‌عنوان رابطهٔ منتخب برای تخمین مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان به‌منظور کمینه نمودن هزینهٔ اجرای لایهٔ تثبیت‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\text{Costs} = 26756.528 + 49.214 * \text{Rap} + 433.910 * \text{Cement} + 181.954 * \text{ESALs}$$

$R^2_{adj=0.76}$

(٤)

$$\text{Costs} = 34267.74 + 1.098 * \text{RAP}^2 - 201.00 * \text{Rap} + 33.793 * \text{RAP} * \text{Cement} - 1078.61 * \text{Cement} + 191.454 * \text{ESALs}$$

$R^2_{adj=0.94}$

(٥)

$$\text{Costs} = 35450.62 + 0.0436 * \text{RAP}^3 - 3.127 * \text{RAP}^2 - 134.41 * \text{RAP-} 0.293 * \text{RAP}^2 * \text{Cement} + 55.622 * \text{RAP} * \text{Cement} - 1217.93 * \text{Cement} + 181.83 * \text{ESALs}$$

$R^2_{adj=0.92}$

(٦)

در معادلات فوق، Costs هزینه‌ی اجرای روسازی برحسب میلیون ریال، Rap درصد تراشهٔ آسفالت (مثلا ۸۰) موجود در مخلوط قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان، Cement درصد سیمان موجود (مثلا ۷) در مخلوط قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان و ESALs تعداد محور استاندارد عبوری از راه مورد نظر برحسب میلیون محور می‌باشد.

شکل (۹) مقادیر هزینه در مقابل مربع مقادیر تراشهٔ آسفالت و توان اول سیمان در مقابل سطوح مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد که در بین گزینه‌های دیگر مدل‌سازی، بهترین پوشش و بالاترین خوبی برازش را نشان داد. مطابق با نمودار ترسیم‌شده می‌توان دریافت که روند تغییرات هزینهٔ اجرایی روسازی شامل اساس

تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر تراشهٔ آسفالت در تردد بار محوری استاندارد مختلف، شبیه هم می‌باشد. از شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه جواب بهینه (حداقل) هزینهٔ اجرا، تقریبا در محدودهٔ ۳۰ الی ۷۰ درصد تراشهٔ آسفالت به‌همراه ۵ الی ۷ درصد سیمان واقع شده‌است که این مجموعه جواب در شکل (۱۰) نشان داده می‌شود. درصورتی‌که محدودهٔ قابل قبول مخلوط‌های بادوام (TSR بزرگ‌تر مساوی ۷۰) برگرفته از نمودار (۵) را در شکل (۹) (به‌صورت کادر سیاه‌رنگ) ترسیم کنیم خواهیم دید که مجموعه پاسخ روسازی بادوام الزاما بر مجموعه جواب روسازی ارزان منطبق نیست که با رسم این مجموعه جواب در شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که این دو مجموعه پاسخ، دارای فصل مشترکی هستند. به‌نظر می‌رسد پاسخ ساخت یک روسازی کم‌هزینه و بادوام در این محدودهٔ پاسخ واقع شده باشد. از آن‌جا که استفادهٔ حداکثری از تراشهٔ آسفالت هزینهٔ حمل و خرید مصالح جدید را کاهش می‌دهد شاید یک پاسخ منطقی استفاده از ۳۰ درصد تراشهٔ آسفالت به‌همراه ٤ درصد سیمان یا به عبارتی کد R304 باشد.

براساس نمودارهای ترسیم شده (۸)، بیشترین هزینهٔ ساخت مربوط به استفاده از مقادیر زیاد تراشهٔ آسفالت و استفاده از مقادیر زیاد سیمان می‌باشد. این موضوع با تحقیقات طاها هم‌خوانی دارد [12] ,[3]. مشخص است که با افزایش تراشهٔ آسفالت در مخلوط اساس تثبیت شده، مقاومت و ضریب قشر روسازی نیز کاهش می‌یابد و نیاز به ضخامت بیشتر می‌باشد. از طرفی افزایش سیمان علاوه‌بر افزایش هزینهٔ اجرا از بعد هزینهٔ مصالح مصرفی و هزینهٔ حمل، نشان داد که به‌طور خطی باعث افزایش مقاومت و درنتیجه کاهش ضخامت روسازی نخواهد شد.

باید توجه داشت که نمودار (۱۰) با فرضیاتی ترسیم شده‌است که مجموعه پاسخ براساس این فرضیات معتبر است. درصورتی‌که نیازمند مجموعه جواب جامع‌تری باشیم می‌توانیم با فرمول‌بندی تابع هزینه و استفاده از تکنیک‌های بهینه‌یابی به مجموعه جواب جامع‌تری دست یابیم. به‌منظور یافتن پاسخ بهینه می‌توان معادلات هزینه و دوام را به‌همراه شروط مختلف به یکی از روش‌های متداول غیرخطی بهینه نمود.

برنامه‌سازی غیرخطی (Nonlinea programming) NLP فرایند حل مسئلهٔ بهینه‌سازی است که در آن برخی از محدودیت‌ها یا خود تابع هدف غیرخطی است. این مسئلهٔ بهینه‌سازی، یک سیستم از برابری‌ها و نابرابری‌ها برروی مجموعه‌ای از متغیرهای ناشناختهٔ حقیقی، در یک تابع هدف است که باید کمینه یا بیشینه شود. یکی از روش‌های حل این مسئله استفاده از روش لاگرانژ است. شرایط لازم برای حل مسئله را می‌توان از طریق یافتن نقاط بحرانی تابع لاگرانژ (ماکزیمم‌سازی بدون قید) به‌دست آورد. در این روش یکی از محدودیت‌ها (محدودیت TSR) با تکنیک لاگرانژ به داخل تابع هدف برده می‌شود و مسئله ساده‌تر حل خواهد شد.

همان‌طور که در رابطهٔ (۷) مشخص است می‌توان تابع هزینه را بااستفاده از شروط مطرح‌شده حل نمود و جواب بهینهٔ تابع هزینهٔ متناظر با آن محدودیت‌ها را استخراج نمود. در این رابطه حداقل TSR مورد پذیرش ۷۰ و حداکثر قابل قبول آن ۱۰۰ می‌باشد. هم‌چنین دیگر شروط اضافه‌شده، حدود تغییرات مصالح تراشهٔ آسفالت، سیمان و بارگذاری می‌باشد. در این تحقیق از Solver اکسل برای بهینه نمودن تابع هزینه در رابطهٔ (۷) استفاده شد. به‌منظور استخراج کلیهٔ جواب‌های محتمل دامنهٔ مقدار TSR بزرگ‌تر از توصیهٔ آیین‌نامه‌های مختلف ($100 \geq TSR \geq 70$) درنظر گرفته شد. اگر TSR را در بین محدودهٔ 50<=TSR<=100 در نظر بگیریم مقادیر پاسخ بهینه تابع هزینه مطابق جدول (۱) محاسبه خواهد شد. در این حالت برای TSR کوچک‌تر از ۵۵ و بزرگ‌تر از ۸۵ تابع هزینه نقطهٔ بهینه‌ای ندارد. براساس جدول (۱) با کاهش محدودیت TSR می‌توان از تراشهٔ آسفالت بیشتر و سیمان کمتری استفاده نمود. باید توجه نمود که روند تغییرات پاسخ کمینه تابع هزینه، خطی نیست و با توان دوم در TSR=٦٥ دارای بیشینه است.

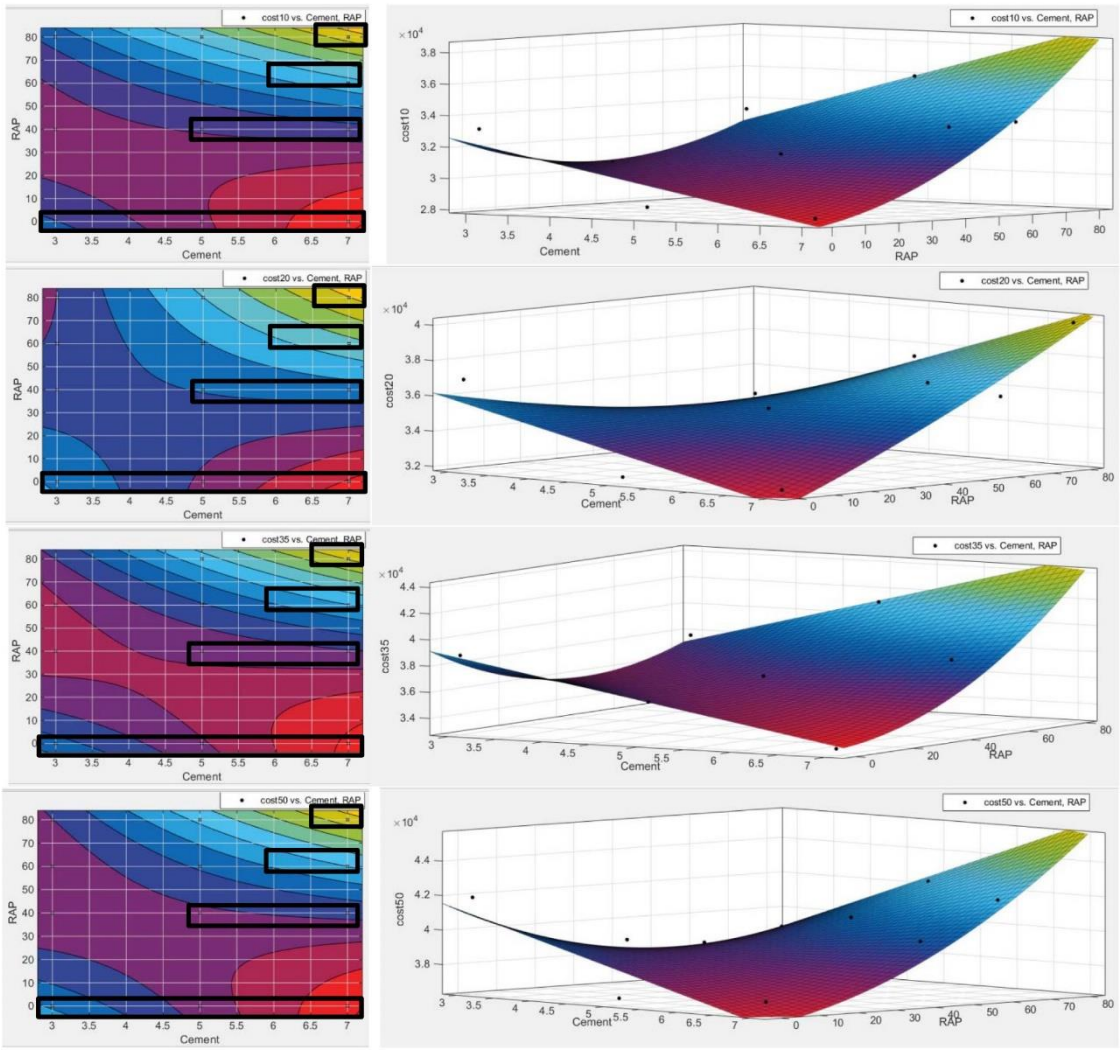
$$Costs = 34267.74 + 1.098 * RAP^2 - 201.00 * Rap + 33.793 * RAP * Cement -$$

$$\begin{aligned} &1078.61 * \text{Cement} + 191.454 * \text{ESALs} \\ &\text{TSR} = 47.49 - 1.116 * \text{Cement}^2 + \\ &0.0033 * \text{Rap}^2 + 13.029 * \text{Cement} - \\ &0.769 * \text{RAP} + 0.061 * \text{RAP} * \text{Cement} \\ &100 \geq \text{TSR} \geq 50 \end{aligned} \quad (۷)$$

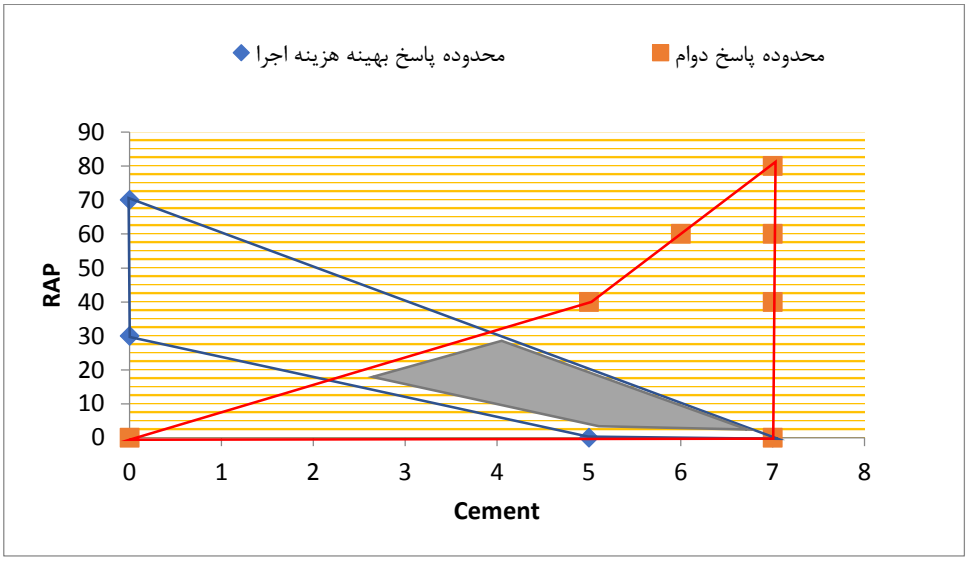
3≤Cement≤7

0≤RAP≤80

10E6≤ESALs≤50E6




شکل ۹ ترسیم رابطه بین هزینهٔ اجرا در مقابل درصد تراشهٔ آسفالت مصرفی و سیمان در سطوح مختلف بارگذاری ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلیون محور استاندارد به‌همراه ترسیم محدودهٔ مخلوط‌های قابل قبول از نظر دوام (کادر مشکی)




شکل ۱۰ مجموعهٔ جواب بهینه (حداقل هزینه) ساخت روسازی بادوام (TSR>70)

جدول ۱ جواب‌های بهینهٔ تابع هزینه از مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت و سیمان باتوجه به محدودیت‌های TSR

| TSR | RAP | Cement | cost |
|---|---|---|---|
| 55 | 51.93498492 | 3 | 30,734.21 |
| 60 | 38.93417509 | 3.149876835 | 30,767.75 |
| 65 | 34.33919233 | 3.606159305 | 30,869.88 |
| 70 | 29.60648301 | 4.157165515 | 30,869.07 |
| 75 | 24.89388374 | 4.933766096 | 30,687.91 |
| 80 | 15.88964307 | 6.272153618 | 29,868.37 |
| 85 | 0 | 6.518339883 | 29,151.53 |

محاسبات نشان داد که جواب بهینهٔ مقادیر RAP و سیمان به‌دست آمده مستقل از سطوح مختلف بارگذاری است؛ یعنی اگر مقدار حداقل بارگذاری را افزایش دهیم فقط تابع هزینه تغییر می‌کند ولی مقدار بهینه RAP و سیمان ثابت می‌ماند. این نکته را می‌توان با بررسی شکل (۹) نیز مشاهده نمود. با مقایسهٔ نتیجهٔ به‌دست‌آمده از فرایند محاسباتی رابطهٔ (۷) و نتیجهٔ به‌دست‌آماده از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت درصورتی‌که حداقل TSR=70 را درنظر بگیریم، درصدهای بهینهٔ مقادیر RAP و سیمان به‌دست‌آمده برای ساخت مخلوط با کد R304 معتبر است. باید توجه داشت که جواب به‌دست‌آمده یکی از جواب‌های قابل قبول از بین مجموعه پاسخ‌های محتمل می‌باشد. درصورتی‌که حدود اولیهٔ مقادیر متغیرهای RAP و سیمان را عوض کنیم قطعا به پاسخ‌های دیگری خواهیم رسید.

نکته‌ای که بعد از بررسی شکل (۸) به‌نظر می‌رسد نشان‌دهندهٔ این است که حداقل هزینهٔ ساخت در بار محور حداقل و در نبود تراشهٔ آسفالت و با صرف سیمان در بازهٔ ۵ الی ۷ درصد حادث خواهد شد. ولی با بررسی جواب‌های بهینهٔ جدول (۱) مشاهده می‌شود درنظر

گرفتن عامل دوام در طرح سازه‌ای روسازی باعث کاهش هزینه و مصرف مقدار محدود (۳۰٪) تراشهٔ آسفالت در TSR=70 درصد خواهد شد. این یافته با یافته‌های پیشین آدرسی و همکاران هم‌خوانی دارد که در سطوح کم مصرف سیمان و استفاده از ۳۰ الی ٤۰ درصد تراشهٔ آسفالت، مقاومت فشاری مخلوط‌های تثبیت‌شده بیشتر از حالتی است که فقط از سیمان استفاده شده‌است و این به‌دلیل اضافه شدن مقاومت چسبندگی قیر به مقاومت چسبندگی سیمان می‌باشد [6].

نتایج نشان داد درصورتی‌که شاخص TSR از ۷۰ به ۸۰ ارتقا یابد مقدار بهینهٔ تابع هزینه تغییری نمی‌کند و فقط مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت به ١٦ درصد کاهش می‌یابد و مقدار سیمان تا ٦,۳ درصد افزایش می‌یابد. از آن‌جا که تابع هزینه به ضخامت روسازی وابسته است و این پارامتر خود به پارامترهایی چون عدد قشر، عدد سازه‌ای و بارگذاری وابسته است. مشاهده می‌شود در این مسئلهٔ خاص تابع هزینه بیشتر به تغییرات بارگذاری حساس می‌باشد و دوام لایهٔ تثبیت‌شده (در قالب شاخص TSR) به‌مقدار تراشهٔ آسفالت و سیمان مصرفی وابسته است؛ لذا با افزایش TSR مقدار تراشهٔ آسفالت کاهش و مقدار سیمان افزایش می‌یابد ولی هزینهٔ نهایی روسازی تغییر چندانی نمی‌کند. درواقع محدودهٔ جواب هزینهٔ حداقل اجرای روسازی، با محدودهٔ جواب روسازی بادوام دارای اشتراک می‌باشد و درصورت کاهش تراشهٔ آسفالت از ۲۹,٦ به ١٦ درصد و افزایش سیمان از ٤,١٦ به ٦,۳ درصد هزینهٔ اجرای روسازی با دوام خیلی کم تغییر می‌کند.

هنگام انتخاب طرح اختلاط مناسب باید به دسترس بودن مصالح تازه و تراشهٔ آسفالت توجه اکید شود. مطالعات انجام‌شده توسط سازمان‌های مختلف حمل‌ونقل آمریکا بیانگر این موضوع است که حداکثر درصد تراشهٔ آسفالت مناسب مخلوط‌های آسفالتی حدودا برابر با ٪۵۰ انتخاب شود.[31] [24] اهمیت این موضوع در تعداد تکرار محور استاندارد بالا، افزایش می‌یابد. درواقع ازآن‌جایی‌که در روسازی حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان نقش اصلی باربری روسازی به‌عهدهٔ قشر اساس است، با افزایش قابل‌توجه تکرار محور استاندارد عبوری از راه، ضخامت قشر اساس تثبیت‌شده نیز افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به‌وضوح در شکل (۷) یافت. به‌علاوه از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که شدت این افزایش ضخامت به ازای افزودن ٪۸۰ تراشهٔ آسفالت به مخلوط، نسبت‌به سایر موارد بیشتر است. ازآن‌جایی‌که افزایش ضخامت لایهٔ اساس تثبیت‌شده باعث افزایش هزینهٔ اجرا خواهد شد (تبدیل شدن از یک لایهٔ اساس به دو لایهٔ اساس در فرایند اجرا که هزینهٔ اجرایی را تقریبا دو برابر می‌کند)، پیشنهاد می‌شود که حداکثر میزان استفاده از تراشهٔ آسفالت به ٪۳۰ محدود شود.

## نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله به‌دست آوردن درصد تراشهٔ آسفالت و سیمان به‌منظور بهینه نمودن هزینهٔ اجرای مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان در اثر تردد بارمحوری استاندارد متغیر و با درنظر گرفتن دیدگاه دوام مخلوط بود. در این راستا تعدادی آزمایش‌های مقاومت فشاری مختلف انجام شد که نتیجهٔ آن دست‌یابی به یک رابطهٔ مناسب مقاومت فشاری برحسب درصد تراشهٔ آسفالت و سیمان بود به‌گونه‌ای که بتوان با کمک آن ضریب قشر و مدول ارتجاعی معادل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را به‌دست آورد. در ادامه آزمایش‌های مقاومت کششی نیز در دو حالت مرطوب و خشک انجام گردید و از نتایج آزمایش‌های به‌عمل‌آمده، شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به‌عنوان معیاری برای دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان محاسبه شد. نهایتا براساس ضریب قشر معادل و مدول ارتجاعی قشر اساس تثبیت‌شده و مفروضات منطقی درمورد خصوصیات لایه‌های رویه و زیراساس، ضخامت روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده با سیمان در اثر تردد بار محوری مختلف به‌دست آمد. در پایان معادلهٔ هزینه که هم‌زمان عامل دوام و هزینه‌ی اجرا را درنظر بگیرد تشکیل گردید. بر این اساس مهم‌ترین نتایج به‌شرح

زیر حاصل گردید:

تابع هزینهٔ به‌دست‌آمده در این تحقیق براساس فرضیاتی استوار است و اساسا در هر پروژه می‌بایست براساس الزامات اجرایی، فواصل حمل و قیمت روز مصالح یا فهرست‌بهای پایهٔ پیمان این معادله بازنویسی گردد.

از دو روش برای تعیین جواب بهینه در این تحقیق استفاده شد که نتیجهٔ هر دو روش بسیار به هم نزدیک است.

جواب بهینهٔ تابع هزینه در مقدار ۲۹,٦ درصد تراشهٔ آسفالت، ٤,١٦ درصد سیمان و در حداقل سطح بارگذاری حاصل شد که برای ۱۰ کیلومتر طول راه به‌عرض ۵,۵ متر (یک خط و شانه) براساس فهرست‌بهای پایهٔ پیمان موضوع مطالعهٔ حاضر و براساس شاخص دوام TSR=70 برابر ۳۰۸٦,۹۰۷ میلیون ریال تعیین شد. نتایج نشان داد که حداقل هزینه در حداقل سطح بارگذاری حاصل می‌شود که کاملا بدیهی است.

نتیجهٔ بهینه‌سازی نشان داد درصورتی‌که حداقل بارگذاری را افزایش دهیم تنها تابع هزینه افزایش می‌یابد و تغییرات بارگذاری بر مقدار جواب بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان اثرگذار نیست و این مورد در شکل (۹) قابل مشاهده است.

نتایج نشان داد در صورتی‌که شاخص TSR از ۷۰ به ۸۰ ارتقا یابد مقدار بهینهٔ تابع هزینه تغییری نمی‌کند و فقط مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت به ١٦ درصد کاهش می‌یابد و مقدار سیمان به ٦,۳ درصد افزایش می‌یابد.

به‌عنوان نتیجهٔ نهایی می‌توان پیشنهاد نمود در هر پروژه تثبیت لایهٔ اساس با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت باتوجه به شرایط پروژه، اهمیت آن و... سطح معیار دوامی تعیین گردد و بر این اساس مقادیر بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان تعیین شوند به‌گونه‌ای که حداقل معیار دوامی برآورده شود و در ادامه باتوجه به سطح بارگذاری وارده، روسازی طراحی شود. نتایج این تحقیق نشان داد هزینهٔ طرح روسازی با این روش، هزینهٔ حداقلی خواهد بود.

## تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق قرارداد شمارهٔ ۷۳٤۱ مورخ ۱٤۰۰/۰۵/۲۳ انجام گردیده‌است.

## مراجع

1. Taha, R., Ali, G., Basma, A. and Al-Turk, O., "Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases.", in *Transportation Research Records*, pp. 1652, Vol. 264–269, (1999).
2. R. Taha, "Evaluation of Cement Kiln Dust-stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate Systems in Road Bases.", *in Transportation Research Records*, pp. 1819, Vol. 11-17, (2003).
3. M. Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. and Al-Zubeidi, "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 14, No. 3, pp. 239–245, (2002).
4. C. H. Trzebiatowski, B.D., and Benson, "Saturated Hydraulic Conductivity of Compacted Recycled Asphalt Pavement", *Geotech. Test. J.*, Vol. 28, No. 5, pp. 1–6, (2005).
5. M. Adresi, A. Hassani, A. Khishdari, and M. Zeini, "Determination of Optimum Mix Design for Cement Treated Base Containing High Volume of Reclaimed Asphalt Pavement", *Transp. Infrastructures Eng. J.*, Vol. 3, No. 1, pp. 53–68, (2017).

6. Adresi, M., Ahmadi, A., and Rooholamini, H., "Influence of High Content of Reclaimed Asphalt on the Mechanical Properties of Cement-treated Base under Critical Environmental Conditions", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 8436, No. October, pp. 1–8, (2017).
7. L. You, K. Yan, Y. Yue, and T. Yu, "Comparisons of Natural and Enhanced Asphalt Mixtures Containing Recycled Cement-Stabilized Macadam as Aggregates", *Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 30, No. 34,pp. 502003, (2020).
8. Taylor, P., Alam, T. B., Abdelrahman, M., and Schram, S. A., "International Journal of Pavement Engineering Laboratory Characterisation of Recycled Asphalt Pavement as a Base Layer", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 11, No. 2, pp. 37–41, (2010).
9. Faramarzi, M., Lee, K. W., Kim, Y., and Kwon, Y., "A Case Study on a Cement Treated RAP Containing Asphalt Emulsion and Acryl Polymer", *Case Stud. Constr. Mater.*, Vol. 9, pp. 1-25, (2018).
10. Faramarzi, M., Kim, Y., Kwon, S., and Lee, K.-W. W., "Evaluation of Cold Recycled Asphalt Mixture Treated with Portland Cement as Base-Layer Materials", *Am. Soc. Civ. Eng. Author*, Vol. 30, No. 73, pp. 502002, (2020).
11. Francois, A., Ali, A., and Mehta, Y., "Evaluating the Impact of Different Types of Stabilised Bases on the Overall Performance of Flexible Pavements", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 8436, No. September, pp. 1–9, (2017).
12. Taha, R., Asce, A. M., Al-harthy, A., Al-shamsi, K., and Al-zubeidi, M., "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 1561, No. 14, pp. 239–245, (2002).
13. Faysal, M., *et al.*, "Determination of the Structural Coefficient of Different Combinations of Cement-Treated/Untreated Recycled Base Materials", in *Geotechnical and Structural Engineering Congress*, pp. 1198–1208, (2016).
14. Abdo, F. Y., "Cement-stabilized Base Courses-concrete Airport Pavement Workshop", (2009).
15. ARRA, "Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Basic asphalt recycling manual," (2001).
16. Ayar, P., "Effects of Additives on the Mechanical Performance in Recycled Mixtures with Bitumen Emulsion: an Overview", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 178, pp.551-561, (2018).
17. ASTMD2172/D2172M-17e1, "ASTM D2172 / D2172M-17e1, Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org", (2017).
18. ASTMD5/D5M-19a, "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org", (2019).
19. ASTMC29/C29M-16, "Standard Test Method for Bulk Density (‘Unit Weight’) and Voids in Aggregate", (2016).

20. ASTMD1633/D1633M, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2014).
21. ASTMD1557-12e1, "Tandard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3))", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2012).
22. ASTMD1633-00, "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2007).
23. ASTM C496/C496M-11, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2004).
24. Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., and Amirkhanian, S., "A literature Review on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 180, pp. 579–604, (2018).
25. Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., and Canestrari, F., "Performance Evaluation of a Cold- recycled Mixture Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt", *Road Mater. Pavement Des.*, Vol. 14, No. S1, pp. 149–161, (2013).
26. AASHTO, "Mechanistic– Empirical Pavement Design Guide A Manual of Practice", (2008).
27. "The Ministry of Roads and Urban Development", "Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234", (2011).
28. Newcomb, D. E., Brown, E. R., and Epps, J. A., "Designing HMA Mixtures with High RAP Content A Practical Guide", (2007).
29. Mary Stroup-Gardiner and Tanya Wattenberg-Komas, "Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications Volume 6: Reclaimed Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, and Construction Demolition Waste", (2013).
30. "AASHTO T 283, RESISTANCE OF COMPACTED ASPHALT MIXTURES TO MOISTURE-INDUCED DAMAGE", (2014).
31. Taha, R., Asce, A. M., Al-harthy, A., Al-shamsi, K., and Al-zubeidi M., "C Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 1561, No. September 2015, (2002).

# مقاومت جریان در یک رودخانهٔ شنی- قلوه سنگی در حضور توده‌های گیاهی موضعی و شکل‌های بستر گوداب و خیزاب (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ ماربر پادنا) *

**پژوهشی**

کورش نصرتی[۱] حسین افضلی مهر[۲] مروان حسن[۳] مسعود کاظم[٤]

**چکیده** *هدف از این پژوهش برآورد مقاومت جریان در یک رودخانهٔ شنی قلوه‌سنگی از طریق خصوصیات نیم‌رخ سرعت در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر گوداب و خیزاب و توده‌های گیاهی پراکندهٔ انعطاف‌پذیر مستغرق است. برای نیل به این هدف ۳۹ نیم‌رخ سرعت در نقاط مختلف چهار بازهٔ کاملا مستقل رودخانهٔ ماربر پادنا مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که عمق اعتبار قانون لگاریتمی به موقعیت محل اندازه‌گیری‌ها شامل ورودی گوداب و خروجی از آن بستگی دارد. شکل غالب میزان انحراف از این قانون در ورودی گودآب به‌سمت بالا، در خروجی گوداب به‌سمت پایین و خیزاب غالبا به‌سمت پایین مشاهده شده‌است که اثر مستقیم در برآورد مقاومت جریان دارد. هم‌چنین نتایج حاصل از بررسی مقاومت جریان حاکی از آن است که ضریب مقاومت جریان با نسبت انسداد به‌صورت نمایی با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر از ۰/۸ در ارتباط است و نسبت انسداد می‌تواند پارامتر مناسبی در برآورد مقاومت جریان در رودخانه‌های شنی با توده‌های گیاهی پراکنده و شکل بسترهای سه‌بعدی گوداب و خیزاب باشد.*

**واژه‌های کلیدی** گوداب و خیزاب، مقاومت جریان، ماربر پادنا، تودهٔ گیاهی مستغرق، قانون لگاریتمی، نسبت انسداد.

# Resistance to Flow in a Cobble-Gravel Bed River with Irregular Vegetation Patches and Pool-Riffle Bedforms (Case study: Padena Marbor River)

K. Nosrati H. Afzalimehr MA. Hassan M. Kazem

**Abstract** *This study was intended to estimate resistance to flow through velocity profile characteristics in a cobble-gravel bed river with 3D-Pool-Riffle bedforms and irregular distribution of flexible-submerged vegetation patches. To this end, a total of 39 velocity profiles consisting of four independent sections of Padena Marbor River have been studied. The finding showed that the depth of validity logarithmic law depends on the location of measurements including both inlet and outlet of the Pool. The predominant form of deviation from this law is frequently observed upwards at the inlet of the Pool and downwards at the outlet of the Pool and Riffle, which has a direct effect on the estimation of resistance to flow. Moreover, the results of resistance to flow revealed that the coefficients of resistance to flow are exponentially related to blockage area with a correlation coefficient greater than 0.8. Therefore, blockage area can be a suitable parameter in estimating resistance to flow in cobble-gravel bed rivers with 3D bedforms and irregular vegetations patches.*

**Key Word** Pool and Riffle, Resistance to flow, Padena Marbor River, Submerged vegetation patches, Logarithmic law, Blockage area.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/٦/۲۷ و از صفحه ۳۵ تا ۵۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری رشتهٔ مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران.

**Email:** hafzali@iust.ac.ir

(۳) استاد دانشکدهٔ جغرافیای دانشگاه بریتیش کلمبیای کانادا.

(٤) دانشجوی دکتری رشتهٔ مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران.

**مقدمه**

اثر متقابل جریان و پوشش گیاهی بسیار پیچیده است و تحت تأثیر عوامل زیست‌محیطی و هیدرولیکی زیادی هم‌چون خصوصیات پوشش گیاهی، متوسط سرعت جریان، میزان آشفتگی، هندسهٔ کانال، دمای آب، توزیع ذرات بستر و نحوهٔ توزیع توده‌های گیاهی بستر رودخانه قرار دارد [1]. بررسی اثر متقابل جریان و پوشش گیاهی برای طرح‌های مهندسی رودخانه از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. شرایط جریان بر نقش توده‌های گیاهی در انتقال رسوب، حل مواد مغذی و آلودگی‌های آبی، زیستگاه آبزیان و سایر عوامل زیست‌محیطی اثرگذار است. در مقابل شرایط و موقعیت توده‌های گیاهی بر عمق جریان، انتقال سیلاب، گنجایش انتقال رسوب و سایر پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی نیز اثرگذار است.

بررسی مطالعات مربوط به مقاومت جریان در چند دههٔ اخیر کانال‌های با پوشش گیاهی نشان می‌دهد که نگرش‌های تئوری و مفهومی زیادی در این رابطه وجود دارد [2]. یک اتفاق نظر کلی در این رابطه است که ضرایب مقاومت از قبیل ضریب مانینگ، ضریب شزی و ضریب دارسی وایسباخ به پارامترهای جریان (عدد رینولدز، عدد فرود و عمق نسبی)، مصالح بستر (قطر ذرات)، شکل‌های بستر، شکل کانال و هندسهٔ پوشش گیاهی بستگی دارند [3]. کمی‌سازی این وابستگی‌های در مطالعات هیدرولیک کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌است. مطالعاتی به‌منظور تخمین مقاومت جریان در کانال‌های با پوشش‌گیاهی انعطاف‌پذیر انجام شده‌است [4,5]. اگرچه روابط لگاریتمی به‌راحتی قابل استخراج هستند، اما عواملی هم‌چون، تراکم گیاهی، اندازهٔ توده‌های گیاهی، خصوصیات حجمی و خصوصیات سطحی پوشش‌گیاهی را مورد نظر قرار نمی‌دهند. کوون و همکاران (۱۹۶۹) نسبت سطحی پوشش‌گیاهی به سطح کل کانال بااستفاده از قانون لگاریتمی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این رابطه نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. بر این اساس روابط لگاریتمی برای بررسی جریان در بالای توده‌های گیاهی، کاربردی نیستند [6]. نیکورا و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر پوشش‌گیاهی بر مقاومت هیدرولیکی جریان را مورد بررسی قرار دادند و روشی به‌منظور تخمین ضریب اصطکاک بااستفاده از پارامترهای پوشش‌گیاهی ارائه دادند. این محققان نشان دادند که پارامترهای فیزیکی متوسط‌گیری‌شده در محل بررسی پوشش‌گیاهی ممکن است پارامترهای اصلی تخمین مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های پوشیده از پوشش‌گیاهی باشند [3]. بررسی تأثیر ارتفاع پوشش‌گیاهی مستغرق بر مقاومت هیدرولیکی جریان توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۰) از طریق یک رابطهٔ خطی بین عدد رینولدز و مقاومت جریان صورت گرفته‌است [7]. لی و همکاران (۲۰۱۵) اظهار داشتند که در رودخانه‌ها، پوشش‌گیاهی تأثیر زیادی بر آشفتگی و اصطکاک بستر دارد [8]. زمانی که جریان در قسمت فوقانی توده‌های گیاهی حرکت می‌کند، یک لایهٔ مرزی روی تودهٔ گیاهی شکل می‌گیرد. چنانچه طول تودهٔ گیاهی کوتاه باشد، جریان روی تودهٔ گیاهی کاملا توسعه یافته نیست بلکه در حال توسعه است. سطح ناهموار بالای تودهٔ گیاهی باعث ایجاد جریان غیریکنواخت می‌شود که توسط توزیع سرعت غیریکنواخت قابل اندازه‌گیری است. جریان‌های توسعه‌یافته اغلب در قسمت فوقانی توده‌های گیاهی کوچک در رودخانه‌ها ملاحظه می‌شوند. اشکال بستر و حضور پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر غیرمستغرق در جدارهٔ کانال تأثیر به‌سزایی بر ساختار جریان در رودخانه‌ها و مجاری روباز دارد. حضور پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر غیرمستغرق در جدارهٔ کانال [9]، تأثیر پوشش گیاهی قرار گرفته برروی شکل‌های بستر در رودخانه‌های شنی [10]، تخمین مقاومت جریان در حضور توده‌های گیاهی مستغرق به‌صورت آزمایشگاهی [11] توسط محققان انجام شده‌است. اما در هر صورت اثر حضور پوشش گیاهی بر ساختار جریان برروی برخی از عوامل هیدرولیکی از جمله شکل‌های

بستر گوداب (Pool) و خیزاب (Riffle) هنوز روشن نیست و میزان عمق اعتبار قانون لگاریتمی، تغییرات ثابت فون کارمن و برآورد مقاومت جریان در حضور شکل بسترهای سه‌بعدی نظیر گوداب و خیزاب در رودخانه‌های شنی دارای توزیع توده‌های گیاهی پراکنده، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات نیم‌رخ سرعت در حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب همراه با توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه و ارائهٔ رابطهٔ نیمه‌تحلیلی مقاومت جریان است.

## منطقهٔ مورد مطالعه و اندازه‌گیری‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در چهار بازهٔ مختلف در تابستان ۱۳۹۹ از رودخانهٔ ماربر پادنا در جنوب استان اصفهان جمع‌آوری شده است. بازهٔ اول، دوم و سوم شامل شکل بسترهای بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب است که از میان این سه بازه، بازهٔ اول فاقد توده‌های گیاهی در بستر و بازه‌های دوم و سوم شامل توده‌های گیاهی در بستر به‌ترتیب در سمت راست و چپ رودخانه هستند. در مقیاس‌های کوچک قانون لگاریتمی برای نیم‌رخ‌های سرعت جوابگو نیست و از توابع توانی سرعت به‌جای تابع لگاریتمی بهره گرفته می‌شود. این در حالی است که در مقیاس‌های متوسط و بزرگ عمق نسبی قانون لگاریتمی سرعت به‌خوبی جوابگو است [2]. در این پژوهش در بازه‌های اول تا سوم عمق نسبی بزرگ‌تر از ۱۰ است و در بازهٔ چهارم در ٦٤ درصد نقاطی که نیم‌رخ سرعت برداشت شدند، عمق نسبی کمتر از ۱۰ و در نقاط باقی‌مانده عمق نسبی بزرگ‌تر از ۱۰ محاسبه شده‌است.

شکل (۱) بازه‌های انتخابی برای اندازه‌گیری داده‌ها در رودخانهٔ ماربر پادنا را نشان می‌دهد. به‌منظور برداشت مختصات و مقادیر ارتفاعی بستر از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن استفاده شده‌است.

شکل ۱ بازه‌های برداشت داده در رودخانهٔ ماربر پادنا

جدول (۱) مشخصات هندسی شکل‌های بستر گوداب و خیزاب شامل طول شکل بستر (فاصلهٔ تاج تا تاج)، عرض متوسط شکل بستر، قطر متوسط ذرات بستر در هر بازه، شیب ورودی گوداب، شیب خروجی گوداب و تعداد نقاط برداشت شدهٔ ارتفاعی برای ترسیم توپوگرافی بستر را نشان می‌دهد. در این جدول منظور از طول گام، طول گام نقشه‌برداری است. بدین صورت که برای نقشه‌برداری در هر بازه، ابتدا هر بازه به شبکه‌های مربعی ۰/۵ در ۰/۵ متر تقسیم‌بندی شده‌است و ارتفاع مرکز هر مربع توسط دوربین نقشه‌برداری برداشت شده‌است.

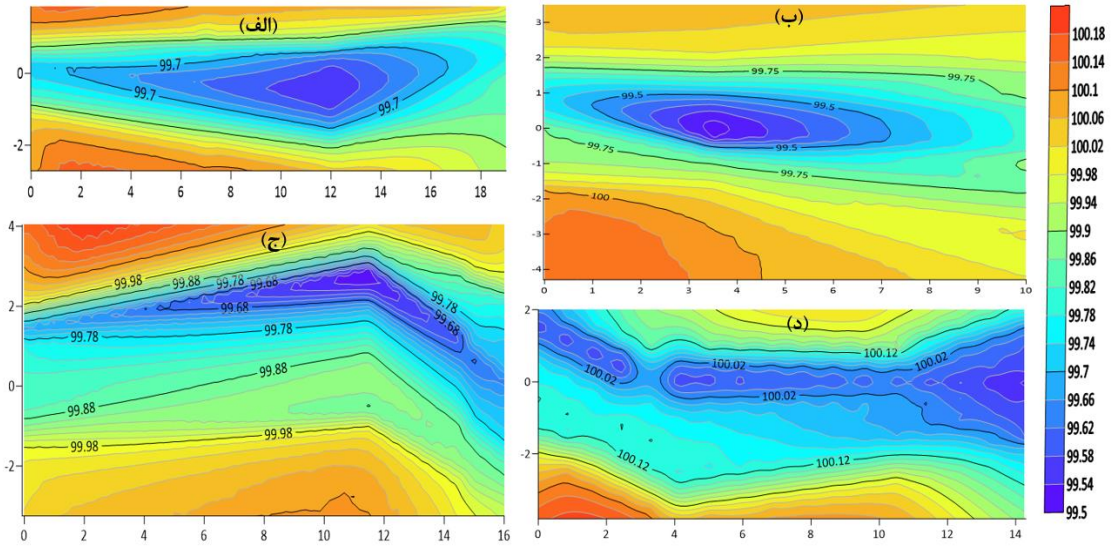
جدول ۱ ابعاد هندسی بازه‌های برداشت‌داده

| شمارهٔ بازه | طول بازه (m) | طول شکل بستر (m) | عرض متوسط شکل بستر (m) | قطر متوسط ذرات (mm) | طول گام (m) | شیب ورودی گوداب | شیب خروجی | تعداد نقاط برداشتی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۹ | ۱۲ | ۳/۱۵ | ۲۳/۸ | ۰/۵ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰٤٤ | ۵۳۰ |
| ۲ | ۱۰ | ۸/۵ | ٤/۳٦ | ۲۲/۳۲ | ۰/۵ | ۰/۱۳ | ۰/۰۷ | ٤٤۱ |
| ۳ | ۱٦ | ۱۱ | ٤/۹۵ | ۲٤/۵ | ۰/۵ | ۰/۰٤۱ | ۰/۰٤ | ٦۲٤ |
| ٤ | ۱٤/۲۵ | – | ٤/۰٤ | ۱۹/۸ | ۰/۵ | – | – | ۲۳۹ |

شکل (۲) نقشهٔ توپوگرافی بستر را که در نرم‌افزار سورفر ترسیم شده‌است نشان می‌دهد. در شکل (۲- الف) می‌توان دریافت که عمیق‌ترین بخش بازه که گوداب نامیده می‌شود، در فاصلهٔ ۳/۸ متری از ابتدای بازه قرار گرفته‌است. این مقدار برای بازه‌های (۲- ب)، (۲- ج) به‌ترتیب ۳/۵، ۱۰/۵ متر از ابتدای هر بازه است. شکل (۲- د) بازهٔ چهارم را با طول ١٤ متر و شیب متوسط ۰/۰۳ نشان می‌دهد. اختلاف بین عمیق‌ترین و کم‌عمق‌ترین نقاط در بازه‌های اول، دوم، سوم و چهارم باتوجه به شکل (۲) به‌ترتیب ٦٨، ۹۰، ٦۰ و ٤٦ سانتی‌متر محاسبه شده‌است.

برداشت دانه‌بندی بستر به‌روش ولمن (١٩٥٤) انجام گرفته‌است [12]. در سه بازهٔ اول برداشت داده، سه دانه‌بندی به‌ترتیب در ورودی گوداب، وسط گوداب و خروجی گوداب برداشت شده‌است. هم‌چنین در بازهٔ چهارم در چهار مقطع از پایین‌دست بازه به‌سمت بالادست بازه، منحنی دانه‌بندی ترسیم شده‌است.

جدول (۲) دانه‌بندی بستر را به‌روش شمارش شنی در بازه‌های برداشت داده نشان می‌دهد. قابل ذکر است که انحراف معیار هندسی به‌صورت $\sigma_g = (d_{٨٤}/d_{١٦})^{٠.٥}$ تعریف می‌شود. که $d_{٨٤}$ و $d_{١٦}$ به‌ترتیب قطری از ذرات بستر هستند که ٨٤ و ١٦ درصد ذرات از آن‌ها کوچک‌تر هستند.




شکل ۲ نقشه‌های توپوگرافی ترسیم‌شده در نرم‌افزار سورفر

جدول ۲ دانه‌بندی بستر به‌روش شمارش شنی وولمن

| شمارهٔ بازه | قطر متوسط (mm) | تعداد منحنی دانه‌بندی | انحراف معیار هندسی |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰/۷–۲۸/۱ | ۳ | ۲/٤٥–۳/۱۳ |
| ۲ | ۲۲–۲۲/٥ | ۳ | ۲/۱۸–۳/۱۹ |
| ۳ | ۲۱/۹–۲٦/۲ | ۳ | ۲/۰۳–۲/۲ |
| ٤ | ۱٥–۲۱/۲۱ | ٤ | ۳–۲/۱۲ |

جدول ۳ پارامترهای هیدرولیکی محاسبه‌شده در بازه‌های مختلف برداشت داده

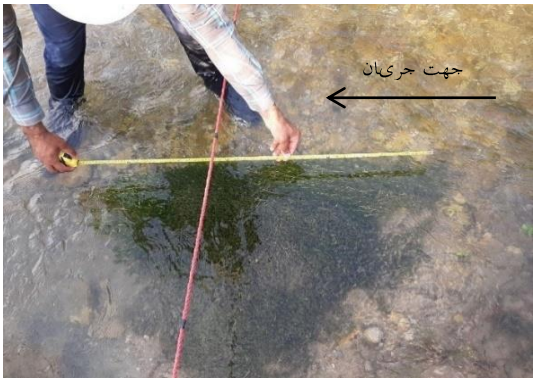
| بازه | B(m) | $S_0$ | Fr | u(m/sec) | $u\,sec)_{max}$ | $Q(m^3/sec)$ | تعداد نیم‌رخ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲/۳٦- ۳/٦۳ | ۰/۰۱٤- ۰/۰۳۷ | ۰/۳٤- ۰/٤۸ | ۰/۷۵- ۰/۹ | ۰/۸۹- ۱/۳٤ | ۰/۷۷- ۱/۳۷ | ۳ |
| ۲ | ٤/۲۲- ۷/۷۹ | ۰/۰۲۸- ۰/۱۲۸ | ۰/٤٤- ۰/۷٤ | ۱/۰۱- ۱/۱۷ | ۱/۳۵- ۱/٦۸ | ۱/۷۹- ۳/۰۹ | ۸ |
| ۳ | ۳/٦۳- ٤/۸ | ۰/۰۱۱- ۰/۰۲۲ | ۰/۵٤- ۱/۰۹ | ۰/۹۸- ۱/۳٦ | ۱/۱۷- ۱/۸۲ | ۰/۸۵- ۲/۱۸ | ۳ |
| ٤ | ۳/۸۸- ۵/۸۵ | ۰/۰۲- ۰/۰٦۵ | ۰/۳۸- ۰/۸۵ | ۰/٦- ۱/۰۲ | ۰/۷- ۱/۲۵ | ۰/۵٤- ۰/۸۷ | ۲۵ |

باتوجه به این‌که $\sigma_g > 1.4$ توزیع ذرات به‌صورت کاملا غیریکنواخت است [13]. اندازه‌گیری سرعت جریان به‌منظور ترسیم نیم‌رخ‌های سرعت توسط میکرو مولینه با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه انجام گرفته‌است. مدت زمان اندازه‌گیری ۳۰ ثانیه و به‌منظور افزایش دقت آزمایشات سه بار تکرار در هر نقطه از نیم‌رخ سرعت جریان انجام شد. جدول (۳) خلاصهٔ پارامترهای هیدرولیکی محاسبه‌شده در هر چهار بازه را نشان می‌دهد.

در بازهٔ اول، دوم و سوم حضور ایستگاه پمپاژ که در شکل (۱- ب) نیز مشهود است، کانال بتنی که آب آن از رودخانهٔ اصلی تأمین می‌شود و حضور مزارع پرورش ماهی در بالادست بازه‌های برداشت داده، سبب متغییر بودن مقادیر دبی در هر بازه، علی‌رغم دائمی بودن جریان رودخانه است. متغییر بودن عمق در هر نقطه، غیریکنواخت بودن مصالح بستر، حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر و متغیر بودن عرض رودخانه در هر نقطه که نیم‌رخ سرعت برداشت شده‌است، دلایل اصلی متفاوت بودن سرعت و دامنهٔ تغییرات شیب در هر بازه است.

در جدول (۳) B عرض رودخانه، $S_0$ شیب طولی بستر، $Fr = u/(gh_w)^{0.5}$ عدد فرود جریان در عمق متوسط جریان $h_w$، u سرعت متوسط جریان، $u_{max}$ مقدار حداکثر سرعت در هر نیم‌رخ، Q دبی جریان و $g = 9.81\ m/s^2$ ثابت گرانش تعریف می‌شود. قابل ذکر است که در مجموع ۳۹ نقطه در بخش‌های مختلف هر بازه به‌منظور ترسیم نیم‌رخ‌های سرعت، برداشت شده‌است.

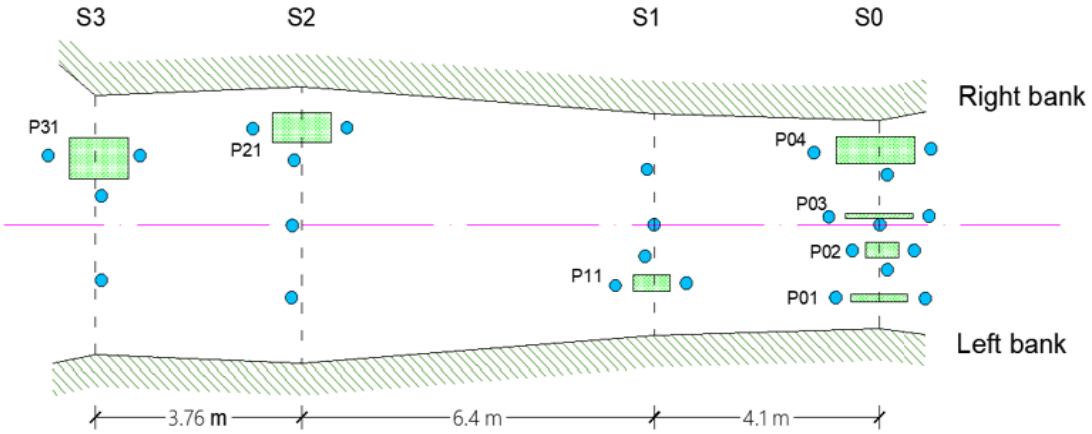
نوع پوشش گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر غالب که در بستر رودخانهٔ ماربر پادنا به‌وفور یافت می‌شود نوعی جلبک است که به‌شکل توده‌های گیاهی متراکم در بستر رودخانه رشد می‌کند. نمونه‌ای از آن در شکل (۳) مشاهده می‌شود.




شکل ۳ اندازه‌گیری ابعاد تودهٔ گیاهی مستغرق توسط متر با دقت یک سانتی‌متر در بازهٔ چهارم

باتوجه به این‌که اندازه‌گیری ابعاد دقیق تودهٔ گیاهی در رودخانه مشکل است، در این پژوهش تنها حداکثر طول و حداکثر عرض هر تودهٔ گیاهی توسط متر با دقت یک سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌است (شکل ۳).

همان‌گونه که در ذیل اشاره شده‌است، اندازه‌گیری سرعت توسط میکرومولینه، در بخش‌های مختلف هر بازه و در اطراف توده‌های گیاهی به‌منظور ترسیم نیم‌رخ صورت گرفت. به‌طور نمونه شکل (٤) نمایش اندازه‌گیری از یک طول ۱٤/۲۵ متر از بازهٔ چهارم در اطراف توده‌های گیاهی را نشان می‌دهد.




شکل ٤ جانمایی توده‌های گیاهی مستغرق در بازهٔ چهارم

در شکل (٤) مستطیل‌های سبزرنگ توده‌های گیاهی مستغرق و نقاط دایره‌ای آبی محل‌های برداشت سرعت در بازهٔ چهارم را نمایش می‌دهند. $S۰$ تا $S۳$ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ شمارهٔ مقطع (Section) از صفر تا سه است. نشانه‌گذاری هر تودهٔ گیاهی در این بازه به‌صورت PXY نام‌گذاری شده‌است. به این صورت که تودهٔ گیاهی شمارهٔ Y در مقطع X قرار گرفته‌است.

به‌طور مثال P۰۱ به‌معنای اولین تودهٔ گیاهی (Patch) در مقطع صفر است. سایر نمادها نیز به‌همین صورت تعریف می‌شوند. جدول (٤) ابعاد هندسی توده‌های گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر در بازه‌های شامل پوشش گیاهی (بازه‌های دوم، سوم و چهارم) را ارائه می‌دهد. در این جدول، $L_p^{max}$ طول حداکثر، $B_p^{max}$ عرض حداکثر و $\bar{h}_p$ ارتفاع متوسط هر تودهٔ گیاهی را نشان می‌دهد. نام‌گذاری در بازه‌های دوم و سوم مستقل از بازهٔ چهارم است بدین صورت که P1، P2 توده‌های گیاهی واقع در بازهٔ دوم و P۳ توده‌های گیاهی واقع در بازهٔ سوم اندازه‌گیری هستند. لازم به ذکر است که برداشت داده‌های سرعت به فاصلهٔ ۱۰ سانتی متر از ورودی هر تودهٔ گیاهی، ۱۰ سانتی‌متر از خروجی تودهٔ گیاهی و ۱۰ سانتی‌متر در اطراف تودهٔ گیاهی صورت گرفته‌است.

جدول ٤ ابعاد هندسی توده‌های گیاهی در هر بازه

| نام توده | $L_p^{max}$ | $B_p^{max}$ | $\bar{h}_p(m)$ |
|---|---|---|---|
| P۱ | ٤ | ۰/۲۵ | ۰/۱ |
| P۲ | ۰/۳۲ | ۰/۸ | ۰/۳۲ |
| P۳ | ۱/٦ | ۰/۲٦۵ | ۰/۰۳ |
| P۰۱ | ۱/۰۵ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ |
| P۰۲ | ۰/۵۹ | ۰/۲۷ | ۰/۰۵ |
| P۰۳ | ۰/۲٤ | ۰/۰۹ | ۰/۰۵ |
| P۰٤ | ۱/٤٦ | ۰/٤۷ | ۰/۰٦ |
| P۱۱ | ۰/٦۷ | ۰/۲۹ | ۰/۱ |
| P۲۱ | ۱/۰۷ | ۰/۵۳ | ۰/۱٦ |
| P۳۱ | ۱/۰۸ | ۰/۷۲ | ۰/۲۱ |

## بحث و نتایج

### تخمین ثابت انتگرال قانون جهانی سرعت و ثابت فون کارمن

در تئوری لایهٔ مرزی جریان در کانال‌های روباز دو لایهٔ مرزی آشفتگی در حالت کلی وجود دارد. در لایهٔ مرزی آشفتهٔ داخلی نیم‌رخ سرعت از قانون دیوار تبعیت می‌کند و توسط رابطهٔ (۱) بیان می‌شود:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B_r \qquad (۱)$$

که در این رابطه $u$ سرعت متوسط جریان در عمق

$z$ ، $u_*$ سرعت برشی ، $\kappa$ ثابت فون کارمن، $k_s$ ارتفاع زبری معادل و $B_r$ ثابت انتگرال است. در این پژوهش ارتفاع معادل زبری بستر $k_s = d_{50}$ است که برای هر بازه و در هر قسمتی که نیمرخ سرعت برداشت شده، متفاوت است.

قانون دیوار نخستین بار توسط فون کارمن (۱۹۳۰) برای نواحی نزدیک بستر (کمتر از ۲۰ درصد عمق) ارائه شده‌است. در رودخانه‌های درشت‌دانه ضخامت لایهٔ مرزی معادل یا کمتر از عمق جریان است و به دو قسمت تقسیم می‌شود: ناحیهٔ نخست که در نزدیکی بستر قرار دارد و در آن اثر زبری و لزجت قابل‌توجه است که به آن لایهٔ داخلی گفته می‌شود. با فاصله از بستر اثر لزجت کاهش و اثر گرادیان فشار افزایش می‌یابد. از این لایه تحت عنوان لایهٔ خارجی یاد می‌شود [14]. لایهٔ خارجی توسط قانون سهمی بیان می‌شود که به‌طور مفصل توسط افضلی مهر و آنکتیل (۱۹۹۹) بررسی شده و در این مقاله به آن پرداخته نمی‌شود [15].

به‌منظور تجزیه و تحلیل تئوری نیمرخ سرعت از سرعت برشی $u_*$ استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش مشخصات لایهٔ مرزی که نخستین بار توسط افضلی‌مهر و آنکتل (۲۰۰۰) برای رودخانه‌های شنی ارائه شد، استفاده شده‌است [16]:

$$u_* = \frac{u^*_{max}}{4.4\times\delta_*} \qquad (۲)$$

که در این رابطه $\delta_*$ و $\theta$ به‌ترتیب ضخامت جابه‌جایی و ضخامت مومنتوم لایهٔ مرزی به‌فاصلهٔ $z$ از بستر هستند:

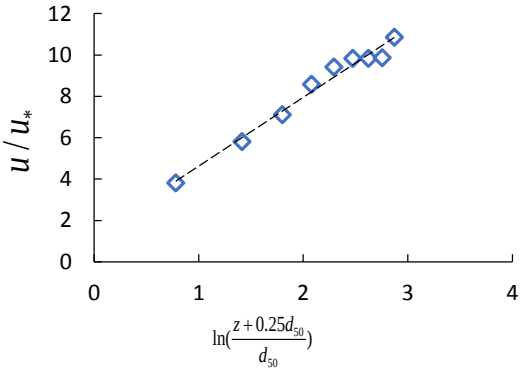
$$\delta_* = \int^{\int} \left(1 - \frac{u}{u_{max}}\right. \qquad (۳)$$

$$\theta = \int \frac{u}{u_{max}}\left(1 - \frac{u}{u_{max}}\right)dz \qquad (٤)$$

همچنان که در کتاب مرجع هینز (۱۹۷۵) برای بسترهای زبر پیشنهاد شده‌است، شنی و قلوه‌سنگی بودن بستر رودخانهٔ مورد مطالعه و یکسان نبودن قطر ذرات بستر ایجاب می‌کند تا عمق جریان از یک بستر فرضی اندازه‌گیری گردد [17]. براساس تمامی روابط ارائه شده فرض شده‌است که در عمق صفر، سرعت جریان صفر است و برای ارائهٔ عمق صفر در رودخانه‌های درشت‌دانه از یک خط فرضی تحت عنوان خط مرجع استفاده می‌شود. به همین دلیل عمق اندازه‌گیری‌شده توسط رابطهٔ کلی زیر اصلاح می‌شود و عمق اصلاحی ($y_*$) از رابطهٔ (۵) محاسبه می‌شود [16]:

$$y_* = y_m + a \times d_p \qquad (۵)$$

در این رابطه $y_m$ اعماق اندازه‌گیری‌شده، a ضریب تعدیل پروفیل لگاریتمی سرعت و $d_p$ قطر مشخصهٔ ذرات بستر است. مقادیر متفاوتی برای a و $d_p$ در منابع لحاظ شده‌است [14]. در این پژوهش $a = ۰.۲۵$ و $d_p = d_{50}$ درنظر گرفته شده‌است [14]. توزیع سرعت در ناحیهٔ نزدیک بستر موسوم به ناحیهٔ داخلی توسط قانون لگاریتمی (قانون دیوار) برروی بستر شنی و قلوه‌سنگی توسط رابطهٔ (۱) ارائه می‌شود [18]. در این پژوهش به‌منظور تخمین ثابت انتگرال $B_{r-River}$، ابتدا نمودار $u/u_*$ برحسب $\ln((z + 0.25d_{50})/d_{50})$ برای داده‌های سرعت جریان نزدیک بستر (داده‌هایی که قانون لگاریتمی بدون انحراف بر آنها برازش می‌یابد) ترسیم شده و یک معادلهٔ رگرسیونی به‌دست آمد. از مقایسهٔ رابطهٔ (۱) با معادلهٔ رگرسیونی حاصل مقدار $B_{r-River}$ به‌دست آمد. شکل (۵) نحوهٔ محاسبهٔ $B_{r-River}$ در ورودی بازهٔ اول را نشان می‌دهد.




شکل ۵ تعیین مقادیر ثابت انتگرال و ثابت فون کارمن در ورودی بازهٔ اول

باتوجه به شکل (۵) در ورودی بازهٔ اول مقدار ثابت انتگرال $B_{r-River} = ۱.۳$ و ثابت فون کارمن $\kappa = ۰.۳$ براساس قانون لگاریتمی سرعت تخمین زده شده‌است.برای محاسبهٔ سرعت برشی از روش مشخصات لایهٔ مرزی استفاده شده‌است که توسط افضلی و رنیه (۲۰۰۹) برای رودخانه های ایران و کانادا به‌کار برده شده‌است. خوانندهٔ علاقمند می‌تواند به این مقاله برای جزئیات محاسبهٔ سرعت برشی از روش مشخصات لایهٔ مرزی مراجعه کند [19].

جدول (۵) مقادیر متوسط $B_{r-River}$ محاسبه‌شده در بازه‌های مختلف رودخانهٔ ماربر پادنا و مقدار گزارش‌شده $B_{r-Re}$ توسط رینولدز (۱۹۷٤) [20] به‌همراه مقادیر متوسط ثابت جهانی فون کارمن برای ۳۹ نیم‌رخ سرعت در قسمت‌های مختلف هر بازه را نشان می‌دهد. RMSD به‌صورت رابطهٔ (٦) تعریف می‌شود.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=۱}^{N\sum}(B_{r_River} - B_{r-Re}}{N}} \qquad (٦)$$

که N تعداد نیم‌رخ های برداشت سرعت در بازه های مختلف است. RMSD میزان انحراف جذر متوسط مقادیر مشاهده‌شده و محاسبه‌شده را نشان می‌دهد. هر اندازه این مقدار بزرگ‌تر باشد، میزان انحراف مقادیر مشاهده‌شده و محاسبه‌شده بیشتر خواهد بود.

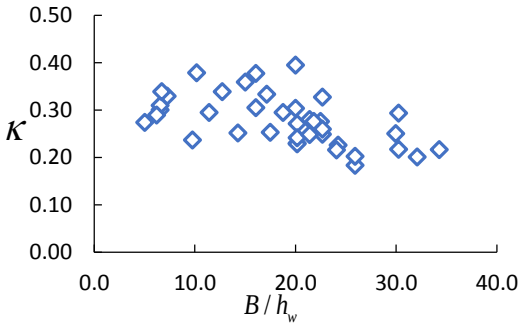
در جدول (٤) مقایسهٔ مقادیر $B_{r-River}$ بازهٔ دوم و سوم نسبت‌به بازهٔ اول نشان می‌دهد که حضور توده‌های گیاهی مستغرق در حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب می‌تواند مقدار $B_{r-River}$ را به مقدار قابل‌توجهی کاهش دهد. از طرفی در بازهٔ چهارم زمانی که بستر فاقد شکل‌های بستر گوداب- خیزاب‌های بزرگ‌مقیاس است، مقدار $B_{r-River}$ در حضور توده‌های گیاهی پراکنده به‌میزان کمتری نسبت‌به نتایج رینولدز (۱۹۷٤) کاهش یافته‌است. $B_r$ با تغییرات گرادیان فشار به‌صورت جزئی تغییر می‌کند [21]. حضور شکل‌های بستر سه‌بعدی گوداب و خیزاب و توده‌های نامنظم گیاهی پراکنده در بستر رودخانه منجر به ایجاد غیریکنواختی جریان می‌شود که پی‌آمد آن تفاوت‌های محسوس در تخمین مقدار $B_r$ است. هم‌چنین مشاهدات نشان می‌دهد که شکل‌های بستر گوداب و خیزاب بر مقدار $B_{r-River}$ در بازه‌های دارای توده‌های گیاهی پراکنده کاهش بیشتری نسبت‌به نتایج رینولدز (۱۹۷٤) دارند. کیرنوتو و گراف (۱۹۹۰) مقدار $B_r = ۸.۸$ را برای بسترهای شنی تحت شرایط آزمایشگاهی کاملا کنترل‌شده گزارش کردند [18]. تفاوت نتایج مقدار $B_r$ در بازه‌های مختلف نسبت‌به مطالعات پیشین به این دلیل است که محققان قبلی مقدار $B_r$ را در حالتی تخمین زده‌اند که توزیع مؤلفه‌های سرعت جریان و تانسور تنش به‌صورت هم‌شکل بوده‌است، به‌عبارتی جریان لایهٔ مرزی متعادل بوده‌است که تحقق آن در رودخانه‌ها به‌دلیل تغییرات هندسی و هیدرولیکی امکان‌پذیر نیست بنابراین در این پژوهش جریان لایهٔ مرزی نامتعادل است.

ضریب κ موسوم به ثابت فون کارمن از طریق مقایسهٔ معادلهٔ رگوسیونی که برای محاسبهٔ $B_{r-River}$ استفاده شده با رابطهٔ (۱) به‌صورت $\kappa = \alpha u_*$ محاسبه می‌شود که در این رابطه $u_*$ از روش مشخصات لایهٔ مرزی به‌دست می‌آید و α ضریب رگرسیون است. شکل (۵) تغییرات κ در مقابل نسبت ظرافت $(B/h_w)$ در هر بازه را نشان می‌دهد.

جدول ۵ میزان RMSD برای بازه‌های مختلف

| شمارG بازه | $B_{r-Re}$ | $B_{r-River}$ | $RMSD_{Br}$ | $RMSD_{\kappa}$ | N |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۸/۵ | ۷/۸۷ | ٤/۷٤ | ۰/۲٤ | ۳ |
| ۲ | ۸/۵ | ۱/۳۷ | ۸/۳۷ | ۰/۱۲ | ۸ |
| ۳ | ۸/۵ | ۵/۱٤ | ٤/٦۸ | ۰/۵٤ | ۳ |
| ٤ | ۸/۵ | ٦/۲۸ | ٦/۹ | ۰/٤۹ | ۲۵ |

باتوجه به شکل (٦) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار κ را به‌راحتی نمی‌توان مقدار ثابت ۰/٤ درنظر گرفت. مقدار κ در این پژوهش بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۹ نوسان داشته‌است. این دامنهٔ وسیع تغییرات مقدار $\kappa$ توسط محققان مختلف در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی تأیید شده‌است [13]. یکی از دلایل این تفاوت‌ها حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب و توده‌های گیاهی پراکنده در بستر می‌باشد.

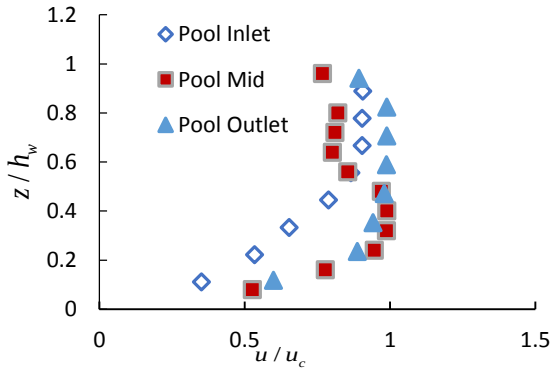



شکل ٦ تغییرات ثابت جهانی فون کارمن در برابر نسبت ظرافت در بازه‌های مختلف اندازه‌گیری

## بررسی محل وقوع سرعت حداکثر

در نسبت‌های ظرافت کوچک ( نسبت عرض به عمق کمتر از پنج) به‌دلیل تأثیر جریان‌های ثانویه بر ساختار جریان، محل وقوع سرعت حداکثر ممکن است تغییر کند [14]. درحالی‌که در نسبت‌های ظرافت بزرگ‌تر از ۵ این تأثیر کمتر مشاهده می‌شود. قرار گرفتن حداکثر سرعت جریان در زیر سطح آب پدیدهٔ فرورفتگی (Dip) نامیده می‌شود. پدیدهٔ فرورفتگی نسبت عمقی که در آن سرعت حداکثر رخ می‌دهد را به عمق کل جریان نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین محل وقوع سرعت حداکثر در بازه‌های مختلف نمودار $z/h_w$ بر مقابل $u/u_c$ در هر نیم‌رخ ترسیم شده‌است.

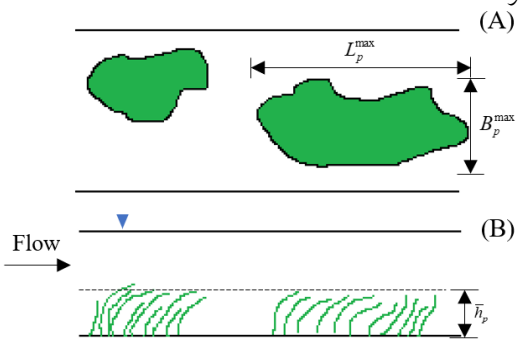
شکل (۷) نمونه‌ای از پدیدهٔ فرورفتگی جریان در بازهٔ اول اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. محل وقوع پدیدهٔ فرورفتگی در وسط و خروجی بازه به‌ترتیب در $۰.٤h_w$ و $۰.۸h_w$ حادث شده‌است. کیرنوتو و گراف (۱۹۹٤) برای جریان غیریکنواخت در آزمایشگاه بیان نمودند که در نسبت‌های ظرافت کمتر از پنج جریان سه‌بعدی است و پدیدهٔ فرورفتگی رخ می‌دهد [18]. با مقایسهٔ بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ دوم و سوم مشاهده می‌شود که اضافه شدن توده‌های گیاهی مستغرق در حضور شکل‌های بستر بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب، پارامتر فرورفتگی را افزایش داده‌است. از طرفی با مقایسهٔ سه بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ چهارم می‌توان نتیجه گرفت که حذف شکل‌های بستر بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب باعث افزایش پارامتر فرورفتگی و نزدیک‌تر شدن محل حادث سرعت حداکثر به سطح آب شده‌است. لکشمینارایانا و همکاران (۱۹۸٤) پارامتر فرورفتگی را برای جریان یکنواخت با بستر زبر تا $۰.٦۷h_w$ برای نیم‌رخ‌های محور مرکزی گزارش دادند [22]. هم‌چنین کیرنوتو و گراف (۱۹۹٤) این مقدار را حدود $۰.۲۲h_w$ برای جریان‌های غیریکنواخت ارائه نمودند [18]. در این پژوهش در بازهٔ دوم و سوم مقدار پارامتر فرورفتگی به‌طور متوسط در قسمت‌های مختلف بازه $۰.۸h_w$ اندازه‌گیری شده‌است که نسبت‌به بازهٔ اول حدود ۱۱ درصد افزایش و نسبت‌به بازهٔ چهارم حدود ۱۲ درصد کاهش داشته‌است. دلیل این نوسانات پارامتر فرورفتگی به تغییرات موضعی ناشی از حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر و حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه بستگی دارد. مطالعات نظری براساس معادلات ناویه- استوکس نشان می‌دهد که وقوع پدیدهٔ فرورفتگی در جریان‌های غیریکنواخت تندشونده مانند خیزاب‌ها بیشتر از جریان‌های یکنواخت و غیریکنواخت کندشونده (گوداب‌ها) می‌باشد [23].




شکل ۷ وقوع پدیدهٔ فرورفتگی جریان در خروجی و وسط گوداب بازهٔ اول

## برآورد مقاومت جریان

هدف از برآورد مقاومت جریان در این پژوهش بررسی ارتباط مقاومت جریان با تأکید بر ضریب‌های مانینگ، شزی، ضریب دارسی- ویسباخ و ضریب دراگ و ابعاد هندسی توده‌های گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر در رودخانه است. بیشتر مطالعات مربوط به مقاومت جریان در شرایط پوشش گیاهی مصنوعی در آزمایشگاه صورت پذیرفته و اثر پو شش گیاهی طبیعی کمتر برر سی شدها ست [1]. برای نیل به این هدف ۱۰ تودهٔ گیاهی مستغرق طبیعی با ابعاد هندسی منطبق با جدول (٤) مورد بررسی قرار گرفته‌است.




شکل ۸ نمای شماتیک توده‌های گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر (A) نمای پلان، (B) نمای کنار

شکل (۸) نمای شماتیک توده‌های گیاهی منطبق‌بر شکل (٤) در بازهٔ چهارم و سایر بازه‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است از آنجایی که اندازه‌گیری ابعاد دقیق توده‌های گیاهی در برخی از قسمت‌ها از جمله بازهٔ دوم که آب عمق زیادی داشت میسر نبود، تنها به اندازه‌گیری حداکثر طول، حداکثر عرض و ارتفاع متوسط تودهٔ گیاهی در تمامی بازه‌ها اکتفا شده‌است. آنالیزهای مربوط به مقاومت جریان بااستفاده از ضریب مانینگ (n)، ضریب شزی (C) و ضریب دار سی وایسباخ (f)برای کانال مستطیلی عریض در این پژوهش صورت گرفته‌است [3]:

$$\frac{u}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}}, C = \frac{u}{(h_w S_f)^{1/2}}, n = \frac{h_w^{1/6}}{C} \qquad (۷)$$

هم‌چنین ضریب دراگ ($C_D$) محا سبه شده در این پژوهش بااستفاده از رابطهٔ (۸) تخمین زده شده‌است [24].

$$C_D = 2\frac{u_*^2}{u^2} \qquad (۸)$$

به‌منظور افزایش دقت در برآورد مقاومت جریان از داده‌های صحرایی نیکورا و همکاران (۲۰۰۸) در کنار داده‌های برداشت‌شده در رودخانهٔ ماربر پادنا استفاده شده‌است [3]. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری سرعت در رودخانه‌های مورد مطالعهٔ این محقق بااستفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی در مقاطع عرضی مختلف که توده‌های گیاهی مستغرق حضور داشته‌اند، صورت گرفته‌است. محدودهٔ اعداد فرود و عدد رینولدز در بازه‌های مختلف نشان می‌دهد که رژیم جریان غالبا زیر بحرانی و آشفته کاملا زبر است.

پارامتر فیزیکی اساسی تأثیرگذار بر مقاومت جریان در این پژوهش نسبت انسداد (BF) که به‌صورت نسبت مساحت جلویی تودهٔ گیاهی عمود بر مسیر جریان ($A_p$) به مساحت مقطع عرضی جریان (A) تعریف می‌شود [3]:

$$BF = \frac{A_p}{A} = \frac{W_p^{max} \times p}{h_w \times B} \qquad (۹)$$

در این پژوهش ارتباط بین ضرایب دراگ، مانینگ، شزی و دارسی ویسباخ به‌عنوان ضرایب مقاومت (RC) با نسبت انسداد دارای ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۸ با معادلهٔ توانی به‌شکل معادلهٔ (۱۰) است:

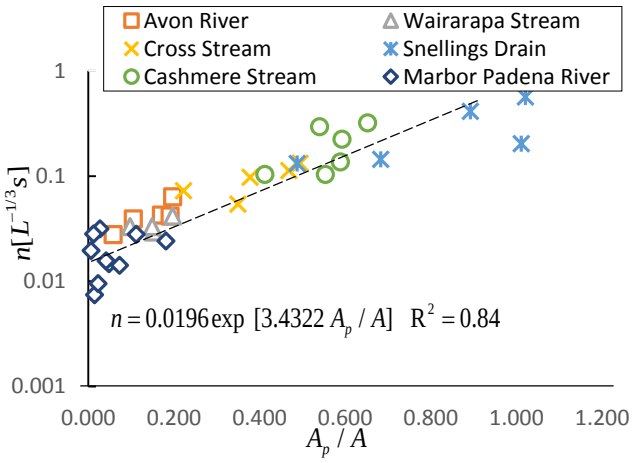
$$RC = m\exp(nBF) \quad R^2 \geq 0.8 \qquad (۱۰)$$

که m و n ضرایب ثابت هستند. نسبت انسداد در مطالعات کوان و همکاران (۱۹٦۹)، واتسون (۱۹۸۷)، بارکی و همکاران (۱۹۹۲)، چمپیون وتنر (۲۰۰۰) و گرین (۲۰۰۵) بالاترین ضریب هم‌بستگی را با کاربرد تابع توانی نشان می‌دهند [3]. شکل‌های (۹) تا (۱۱) ارتباط بین ضرایب مقاومت و نسبت انسداد را با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر مساوی ۰/۸ نشان می‌دهد.

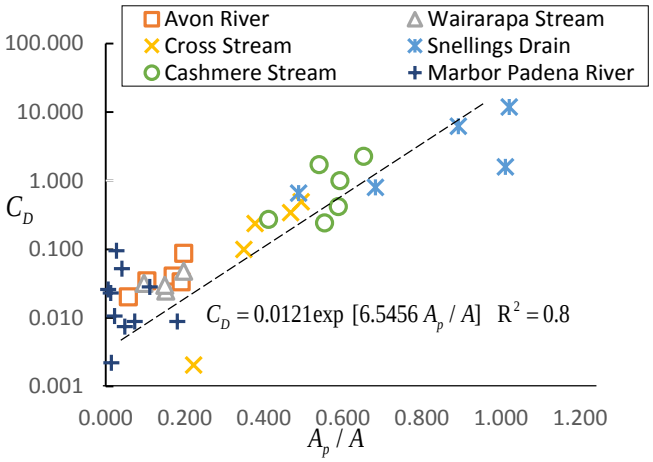
ارتباط بین ضریب مانینگ، ضریب شزی و نسبت انسداد با نتایج حاصل از گرین (۲۰۰٦) با ضریب

هم‌بستگی ۰/۷۴ و نتایج نیکورا (۲۰۰۸) با ضریب هم‌بستگی ۰/۸۹ در یک مطالعهٔ صحرایی مقاومت جریان مشاهده شده است [25]. در تمامی نمودارها ارتباط بین ضرایب مقاومت جریان با نسبت انسداد به‌صورت نمایی با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر مساوی ۰/۸ تغییر کرده‌است. این ارتباط غیرخطی می‌تواند نشئت گرفته از حضور شکل های سه‌بعدی گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر (ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از ٤ در اطراف توده های گیاهی) و پراکندگی توده های گیاهی در بستر باشد. در واقع حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر گوداب و خیزاب و پراکندگی توده های گیاهی به‌طور خاص در بازهٔ چهارم و دوم همانند مانعی دربرابر جریان عمل کرده و باعث افزایش نیروی مالشی وارد بر جریان، کاهش سرعت جریان، افزایش سرعت برشی و به‌دنبال آن افزایش مقاومت جریان شده‌است.

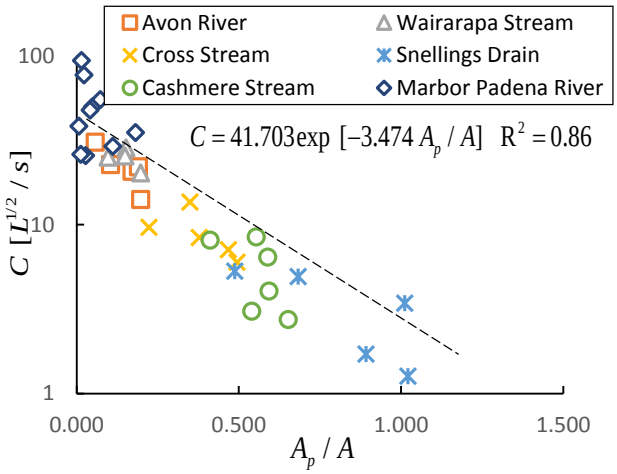
همان‌گونه که در شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۲) مشاهده می شود، افزایش نسبت انسداد (حضور مانع دربرابر جریان) باعث افزایش ضریب دراگ، ضریب مانینگ و افزایش سرعت برشی جریان گردیده‌است. افزایش سرعت برشی به‌معنای افزایش ضریب دارسی ویسباخ و به‌دنبال آن، افزایش مقاومت جریان است.



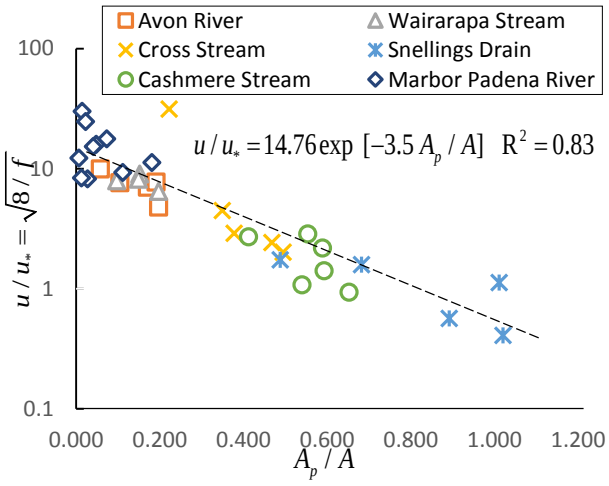

شکل ۹ ارتباط بین ضریب مانینگ و نسبت انسداد




شکل ۱۰ ارتباط بین ضریب دراگ و نسبت انسداد




شکل ۱۱ ارتباط بین ضریب شزی و نسبت انسداد




شکل ۱۲ ارتباط بین ضریب دارسی ویسباخ و نسبت انسداد

نیروی مالشی نیرویی مساوی و مختلف الجهت نیروی دراگ (نیروی وارد از سمت آب به بستر) است که از طرف بستر به جریان وارد می‌شود. مقایسهٔ مقدار متوسط ضریب دراگ در بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ دوم و سوم نشان می‌دهد که اضافه شدن توده‌های گیاهی مستغرق در حضور شکل‌های بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب می‌تواند تقریبا تا ٤٠ درصد مقاومت جریان را افزایش دهد.

در شکل (۱۱) بر خلاف ضریب دراگ و ضریب مانینگ، افزایش نسبت انسداد باعث کاهش ضریب شزی شده‌است. حضور هر نوع مانعی در مسیر جریان باعث کاهش انتقال جریان و به‌دنبال آن کاهش ضریب شزی می‌شود. بنابراین از دیدگاه انتقال جریان حضور توده‌های گیاهی پراکنده در مسیر جریان باعث کاهش ضریب شزی می‌شود. مقایسهٔ مقدار متوسط ضریب شزی در بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ دوم و سوم نشان می‌دهد که حضور توده‌های مستغرق گیاهی در بستر می‌تواند انتقال جریان را به‌طور متوسط تا ۱۸ درصد کاهش دهد. به‌نظر می‌رسد که در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر در رودخانه‌های شنی که توده‌های گیاهی به‌صورت پراکنده در بستر رودخانه قرار گرفته‌اند، ضریب شزی با ضریب هم‌بستگی نسبتا بالا در مقایسه با سایر ضرایب مقاومت می‌تواند نمایندهٔ مناسبی برای مقاومت جریان در رودخانهٔ مورد مطالعه باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش نیم‌رخ سرعت در بازه‌های مختلف یک رودخانهٔ درشت‌دانهٔ شنی قلوه‌سنگی در حضور شکل‌بسترهای سه‌بعدی گوداب و خیزاب و توده‌های گیاهی پراکندهٔ مستغرق طبیعی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. هم‌چنین روابطی نمایی به‌صورت تابعی از نسبت انسداد برای برآورد مقاومت جریان پیشنهاد شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که حضور توده‌های گیاهی مستغرق روی شکل‌های بستر گوداب و خیزاب می‌تواند جملات توزیع جهانی سرعت شامل سرعت جریان، سرعت برشی، مقدار ثابت ون کارمن و مقدار ثابت $B_r$ را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد که پی‌آمد آن برآورد متفاوت مقاومت جریان است.

مقدار ثابت فون کارمن $\kappa$ تو سط پو شش گیاهی و شکل‌های بستر تغییر کرده‌ا ست و نمی‌تواند معادل ۰/٤ در نظر گرفته شود. مقدار $\kappa$ در این پژوهش بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۹ نوسان داشته‌است. بر این اساس حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب و توده های گیاهی پراکندهٔ انعطاف‌پذیر در بستر رودخانه مقدار $\kappa$ را کاهش می دهد.

مقدار پارامتر فرورفتگی به‌طور متوسط در قسمت‌های مختلف بازهٔ دوم $0.8h_w$ اندازه‌گیری شده که نسبت‌به بازهٔ اول حدود ۱۱ درصد افزایش و نسبت‌به بازه چهارم حدود ۱۲ درصد کاهش داشته‌است. دلیل این نوسانات پارامتر فرورفتگی را می‌توان به ناپایداری‌های ناشی از حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر و حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه ارتباط داد.

ارتباط بین ضریب مقاومت جریان با نسبت انسداد به‌صورت نمایی با ضریب هم‌بستگی معادل ۰/۸ محاسبه شد. این ارتباط غیرخطی می‌تواند نشئت گرفته از حضور شکل‌های سه‌بعدی گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذارت بستر (ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از ٤ در اطراف توده‌های گیاهی) و پراکندگی توده‌های گیاهی در بستر باشد. ضریب شزی با ضریب هم‌بستگی نسبتا بالا در مقایسه با سایر ضرایب مقاومت می‌تواند نمایندهٔ مناسبی برای مقاومت جریان در رودخانهٔ شنی قلوه‌سنگی مورد مطالعه باشد.

## مراجع


1. Yen, B.C., "Open Channel Flow Resistance", *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 128(1), pp. 20-39, (2002).
2. Afzalimehr, H., Riazi, P., Jahadi, M., Singh, V.P., "Effect of Vegetation Patches on Flow Structures and the Estimation of Friction Factor", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*:019, Vol. 27, pp. 1-11, (2019).
3. Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G., Reid, M., "Hydraulic Resistance due to Aquatic Vegetation in Small Streams: Field Study", *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 134(9), pp. 1326-1332, (2008).
4. Afzalimehr, H., Moghbel, R., Gallichand, J., Jueyi, S.U., "Investigation of Turbulence Characteristics in Channel with Dense Vegetation", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 26(3), pp. 269-282, (2011).
5. Nikora, V., Larned, S., Debnath, K., Cooper, G., Reid, M., Nikora, N., "Effects of Aquatic and Bank-side Vegetation on Hydraulic Performance of Small Streams", in River Flow: *Proceedings of the*

*International Conference on Fluvial Hydraulics,* Lisbon, Portugal, 6-8 September 2006. 2006. Taylor & Francis, Vol. 1, pp. 639-646,(2006).

6. Kouwen, N., Unny, T. and Hill, H.M., "Flow Retardance in Vegetated Channels", *Journal of the Irrigation and Drainage Division,* Vol. 95(2), pp. 329-342, (1969).
7. Wang, P. f., Wang, C. and Zhu, D.Z., "Hydraulic Resistance of Submerged Vegetation Related to Effective Height", *Journal of Hydrodynamics,* Vol. 22(2), pp. 265-273, (2010).
8. Li, S., Shi, H., Xiong, Z., Huai, W., Cheng, N., "New Formulation for the Effective Relative Roughness Height of Open Channel Flows with Submerged Vegetation, Advances in Water Resources", Vol. 86, pp. 46-57, (2015).
9. Fazlollahi, A., Afzalimehr, H. and Sui, J., "Effect of Slope Angle of an Artificial Pool on Distributions of Turbulence", *International Journal of Sediment Research,* Vol. 3(2) ,pp. 93-99, ( 2015).
10. Afzalimehr, H., Maddahi, M.R., Sui, J., Rahimpour, M., "Impacts of Vegetation over Bedforms on Flow Characteristics in Gravel-bed Rivers", *Journal of Hydrodynamics,* Vol. 31(5), pp. 986-998, (2019).
11. Jahadi, M., Afzalimehr, H. and Rowinski, P.M., "Flow Structure within a Vegetation Patch in a Gravel-Bed River", *Journal of Hydrology and Hydromechanics,* Vol. 67(2), pp. 154-162, (2019).
12. Wolman, M.G., A Method of Sampling Coarse River- bed Material, EOS, "Transactions American Geophysical Union", Vol. 35(6), pp. 951-956, (1954).
13. Maddahi, M.R., Afzalimehr, H. and Rowinski, P.M., "Flow Characteristics over a Gravel Bedform: Kaj River case study, Acta Geophysica", Vol. 64(5), pp. 1779-1796, (2016).
14. Afzalimehr, H., Barahimi, M. and Sui, J., "Non-uniform Flow over Ccobble Bed with Submerged Vegetation Strip", in Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management. Thomas Telford Ltd.(2019)
15. Afzalimehr, H., Anctil, F., "Velocity Distribution and Shear Velocity Behaviour of Decelerating Flows over a Gravel Bed", *Canadian Journal of Civil Engineering,* Vol. 26(4), pp. 468-475, (1999).
16. Afzalimehr, H. and Anctil, F., "Accelerating Shear Velocity in Gravel-bed Channels", *Hydrological sciences journal,* Vol. 45(1), pp. 113-124, (2000).
17. Hinze, J.O., Turbulence (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering), Mcgraw-Hill College, (1975).
18. Kironoto, B., Graf, W. H., and Rreynolds, "Turbulence Characteristics in Rough Uniform Open-channel Flow", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy,* Vol. 106(4), pp. 333-344, ( 1994).
19. Afzalimehr, H. and Rennie, C.D., "Determination of Bed Shear Stress in Gravel-bed Rivers Using Boundary-layer Parameters", *Hydrological sciences journal,* Vol. 54(1), pp. 147-159, (2009).

20. Hinze, J., Turbulence 2’nd edition, MacGraw Hill, New-York, (1975)
21. Coleman, H. W., Moffat, R. J., and Kays, W.M., "The Accelerated Fully Rough Turbulent Boundary Layer", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 82(3), pp. 507-528, (1977).
22. Bassey, O. B., and Agunwamba, J., "Derived Models for the Prediction of Cole’s and Dip Parameters for Velocity Gradients Determination in Open Natural Channels", (1998).
23. Afzalimehr, H., Mohammadzade, N., and Singh, V. P., "Experimental Investigation of Influence of Vegetation on Flow Turbulence", (2015).
24. Afzalimehr, H., Heidarpour, M., and Farshi, S., "Resistance to Flow in Gravel-bed Rivers", *Isfahan University of Technology-Journal of Crop Production and Processing*, Vol. 7(1), pp. 19-31, (2003).
25. Green, J. C., "Comparison of Blockage Factors in Modelling the Resistance of Channels Containing Submerged Macrophytes", *River research and applications,* Vol. (6)21, pp. 671-686, (2005).

# تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ بااستفاده از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری* پژوهشی

هادی فتاحی[۱] فرشاد ملک محمودی[۲] حسین قائدی[۳]

**چکیده** *پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره یک پارامتر مهم و کلیدی در مهندسی ژئومکانیک است که در طبقه‌بندی مهندسی سنگ، بررسی معیارهای شکست سنگ و در مرحلهٔ طراحی بسیاری از پروژه‌های عمرانی و معدنی کاربرد دارد. در بسیاری از موارد به‌دلیل عدم دسترسی به مغزه‌های باکیفیت، تعیین این پارامترها در آزمایشگاه با سختی‌های زیادی همراه است و اغلب این پارامتر به‌صورت غیرمستقیم از روابط رگرسیونی تخمین زده می‌شود که این روابط از دقت بالایی برخوردار نیستند. هدف از این تحقیق، استفاده از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری گرگ خاکستری (GWO) و الگوریتم مگس میوه (FFOA) به‌منظور تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، از داده‌های ۱۲۴ نمونه سنگ گرانیت از پروژهٔ تونل انتقال آب شیرین ایالت سلانگور در مالزی استفاده شده‌است. در انتها برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های فراابتکاری از شاخص‌های آماری مختلفی استفاده شده‌است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله و هم‌چنین اعتبارسنجی مدل‌ها، مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ مقاومت فشاری تک‌محوره توسط الگوریتم‌های جدید فراابتکاری مذکور با مقادیر واقعی منطقه بسیار نزدیک است که نشان‌دهندهٔ خطای کم مدل‌های به‌دست‌آمده می‌باشد. به‌علاوه در این مقاله آنالیز حساسیت برروی پارامترهای مؤثر در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره نیز انجام شد که نتایج بررسی‌ها نشان داد مقادیر برگشتی چکش اشمیت ($R_n$)، در میان سایر پارامترهای ورودی، بیشترین تأثیر را برروی مقاومت فشاری تک‌محوره دارد.*

**واژه‌های کلیدی** سنگ گرانیت، مقاومت فشاری تک‌محوره، تخمین غیرمستقیم، الگوریتم مگس میوه، الگوریتم گرگ خاکستری.

# Indirect Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Using New Meta-Heuristic Algorithms

H. Fattahi F. Malekmahmoudi H. Ghaedi

**Abstract** *The uniaxial compressive strength parameter is an important and key parameter in geomechanical engineering that is used in rock engineering classification, study of rock fracture criteria and in the design stage of many construction and mining projects. In many cases, due to the lack of access to quality cores, determining these parameters in the laboratory is associated with many difficulties, and often this parameter is indirectly estimated from regression relationships that these relationships are not very accurate. The aim of this study is to use the new meta-heuristic algorithms of gray wolf (GWO) and fruit fly algorithm (FFOA) to indirectly estimate uniaxial compressive strength. To achieve this goal, data from 124 granite rock samples from the Selangor freshwater transfer tunnel project in Malaysia, have been used. Finally, to evaluate and validate the models obtained by intelligent algorithms, the indices of statistical are used. According to the results obtained in this paper as well as the validation of the models, the predicted values of uniaxial compressive strength are very close to the real values of the region, indicating the low error of the models in indirect estimation. In addition, in this paper, sensitivity analysis was performed on the effective parameters in estimating uniaxial compressive strength. The results showed that the return values of Schmidt hammer (Rn), among other input parameters, have the greatest effect on uniaxial compressive strength.*

**Key Word** Granite rock, Uniaxial compressive strength, Indirect estimation, FFOA, GWO.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۲/۴ تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۲۷ و از صحفه ۵۱ تا ۷۰ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک. **Email:** h.fattahi@arakut.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

**مقدمه**

مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ یکی از کاربردی‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی و عمرانی است که در اغلب طراحی‌ها و مدل‌سازی‌ها مورد نیاز مبرم مهندسان می‌باشد. تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره در آزمایشگاه به نمونه‌های مغزه با کیفیت مناسب نیاز دارد که تهیهٔ آن برمبنای استانداردهای لازم کاری زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. از طرفی نتایج مقادیر آزمایشگاهی نیز به‌شدت به ابعاد نمونه، نحوهٔ بارگذاری، خطاهای انسانی و عوامل خارجی دیگری نیز بستگی دارد. از طرفی باتوجه به عدم امکان تهیهٔ نمونهٔ مناسب از سنگ‌های ضعیف، متورق و خردشده، تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوره امری ضروری به‌نظر می‌رسد. اصولا تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره، بااستفاده از روش‌های آماری مانند رگرسیون خطی ساده، رگرسیون چندگانهٔ غیرخطی و یا بااستفاده از روش‌های تجربی، برای تخمین غیرمستقیم انجام می‌شود که در ادامه به برخی از این مطالعه‌ها اشاره می‌شود:

آندره و همکاران[1] یک مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از پارامتر شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) پیشنهاد کردند. کارگیل و شکور [2] برای ارزیابی هم‌بستگی و ارائهٔ رابطه‌ای بین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره با پارامترهایی نظیر چکش اشمیت ($R_n$)، شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) آزمایش‌هایی را برروی پنج سنگ مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که بین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره هم‌بستگی قوی وجود دارد. توگرول و ظریف [3] بااستفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیونی ساده برای به‌دست آوردن روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سایر خواص سنگ از جمله سرعت موج p ($V_p$)، از شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) استفاده کردند. کاراکوس و توتمز [4] از مدل رگرسیونی چند متغیره برای ارائهٔ رابطه‌ای برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره براساس چند پارامتر استفاده نمودند. این محققان با مطالعهٔ سنگ‌های مختلف و انجام آزمایش‌هایی نظیر مقادیر برگشتی چکش اشمیت ($R_n$)، شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$)، سرعت موج p ($V_p$) و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (در مجموع ۳۰۵ آزمایش)، مدلی را برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره ارائه دادند. باسیو و آیدین[5] بااستفاده از روابط تجربی، هم‌بستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) را برای سنگ گرانیت در هنگ‌کنگ بررسی کردند. کهرمان و گایناداین [6] هم‌بستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) را برای سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی از طریق تحلیل رگرسیونی به‌دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که هم‌بستگی معناداری بین آنها وجود دارد. علاوه‌بر این باسو و کامران [7] به‌کمک تحلیل رگرسیونی برروی سنگ‌های شیستوزیته، از شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده کردند. یاگیز[8] بااستفاده از آزمون غیرمخرب به برآورد و تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از پارامترهای سختی اشمیت ($R_n$)، سرعت موج p ($V_p$)، تخلخل مؤثر و چگالی خشک پرداختند. سینگ و همکاران [9] رابطه‌ای تجربی بین شاخص بار نقطه‌ای ($I_{s(50)}$) و مقاومت فشاری تک‌محوره برای برخی از سنگ‌های هند پیشنهاد دادند. امان‌الابجاری [10] بااستفاده از مدل‌های تجربی به تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره پرداخت. او از داده‌های مقادیر برگشت چکش اشمیت ($R_n$)، شاخص بار نقطه‌ای($I_{s(50)}$)، شاخص پانچ بلوک (BPI)، تخلخل مؤثر و چگالی به‌عنوان ورودی برای برآورد تجربی مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده کرد. سپس مقادیر تخمینی مقاومت فشاری تک‌محورهٔ حاصل از معادلات تجربی را با روش‌های رگرسیونی مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که روش‌های تجربی به‌دلیل رفتار

متفاوت سنگ‌ها در هر منطقه نسبت‌به روش‌های رگرسیونی از دقت کمتری برخوردار می‌باشند. جدول (۱) برخی از روابط رگرسیونی منتشر شده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ را نشان می‌دهد.

جدول ۱ خلاصه ای از مطالعات انجام شده قبلی با استفاده از روش‌های رگرسیونی به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره

| مرجع | رابطه ارائه شده | R2 |
|---|---|---|
| بروچ و فرانکلین [22] | $UCS = 23.7I_{S(50)}$ | ۰/۷۷٤ |
| میشرا و باسو [23] | $UCS = 14.63I_{S(50)}$ | ۰/۸۸ |
| اسمیت [24] | $UCS = 14.3I_{S(50)}$ | ۰/۷۸ |
| لشکری‌پور [25] | $UCS = 21.43I_{S(50)}$ | ۰/۷۳۳ |
| فورستر [26] | $UCS = 14.5I_{S(50)}$ | ۰/۹٤۱ |
| فنر و همکاران [27] | $UCS = 9.08I_{S(50)} + 39.32$ | ۰/۷۲۲ |
| کارگیل و شاکور [2] | $UCS = 23I_{S(50)} + 13$ | ۰/۸۸٤ |
| اولوسای و تورلی [28] | $UCS = 19I_{S(50)} + 12.7$ | ۰/۸۱ |
| حسنی و همکاران [29] | $UCS = 29I_{S(50)}$ | ۰/۸۸٤ |
| کوبان‌اوغلو و سلیک [30] | $UCS = 8.66I_{S(50)} + 10.85$ | ۰/۵۸٤ |
| ژو و همکاران [31] | $UCS = 2.98e^{(0.06R_n)}$ | ۰/۹۵ |
| ساچپازیس [32] | $UCS = 4.29R_n - 67.52$ | ۰/۹٦ |
| سینگ و همکاران [33] | $UCS = 2R_n$ | ۰/۵۱۸ |
| یاگیز [34] | $UCS = 0.0028R_n^{2.584}$ | ۰/۸۵ |
| توگرول و ظریف [3] | $UCS = 8.36R_n - 4.16$ | ۰/۸۷ |
| شلابی و همکاران [35] | $UCS = 3.201R_n - 46.59$ | ۰/۵۷۸ |
| یاسر و اردوغان [36] | $UCS = 4 \times 10^{-6}{R_n}^{4.2917}$ | ۰/۷۹۲ |
| اوفموت [37] | $UCS = 0.33(R_n\rho)^{1.35}$ | ۰/۸۰ |
| ییلماز و سندیر [38] | $UCS = 2.27e^{0.059R_n}$ | ۰/۹٦ |
| گوپتا [39] | $UCS = 14.1R_n - 642$ | ۰/۷۹ |
| شارما و سینگ [40] | $UCS = 64.2V_p - 117.99$ | ۰/۹۰۲ |
| جاهد ارمغانی و همکاران [41] | $UCS = 0.0308V_p - 61.61$ | ۰/٤۷ |
| مرادیان و بهنیا [42] | $UCS = 165.05\exp(-4.452/V_p)$ | ۰/۷۰ |
| دی‌دیامانتیس و همکاران [43] | $UCS = 0.11V_p - 515.56$ | ۰/۸۱ |
| خاندلوال [44] | $UCS = 33V_p - 34.83$ | ۰/٤۷ |
| انتویسلی و همکاران [45] | $UCS = 0.78e^{0.88V_p}$ | ۰/۵۳ |
| مینابیان و آهنگری [46] | $UCS = 0.005V_p$ | ۰/۹٤ |
| هورسراد [47] | $UCS = 0.77V_p^{2.93}$ | ۰/۹۸ |
| یاگیز [8] | $UCS = 0.258V_p^{3.543}$ | ۰/۸۵ |
| خاندلوال و سینگ [48] | $UCS = 0.1333V_p - 227.19$ | ۰/۹٦ |

به‌علاوه طی سالیان اخیر با پیشرفت‌هایی که درزمینهٔ هوش مصنوعی در دنیا ایجاد شده‌است، محققان مختلفی از روش‌های هوشمند برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از پارامترهایی نظیر شاخص بار نقطه‌ای، سرعت موج p و سختی چکش اشمیت استفاده کردند که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره خواهد شد. گوکگلو یک نمودار مثلثی فازی برای پیش‌بینی مقاومت فشردگی تک‌محوری در سنگ آگلومرا آنکارا از ترکیب سنگ‌شناسی آنها ارائه داد. وی برای کنترل عملکرد ظرفیت پیش‌بینی مثلث، از محاسبهٔ واریانس VAF و میانگین مربعات خطا RMSE استفاده کرد که به نتایج خوبی دست پیدا کرد [11]. تیریاکی پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی مقاومت سنگ سالم برای حفاری مکانیکی بااستفاده از آمار چندمتغیره، شبکه‌های عصبی مصنوعی و درخت‌های رگرسیونی ارائه داد. برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره برای سنگ‌های مورد استفاده در این تحقیق، از آزمون هم‌بستگی دو متغیره و آزمون‌های برازش منحنی استفاده شد [12]. سارکار و همکاران[13] از روش شبکهٔ عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره با پارامترهای ورودی سرعت موج دینامیکی، شاخص دوام‌پذیری، سرعت موج p و چگالی استفاده کردند. منوچهریان و همکاران[14] کاربرد شبکهٔ عصبی مصنوعی و آمار چند متغیره برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از ویژگی‌های بافتی سنگ را بررسی کردند. سهولت استفاده از این روش‌ها به‌سبب محبوبیت آنها برای تخمین پارامترهای مختلف سنگ مانند خواص مکانیکی، خواص فیزیکی و خواص مغناطیسی، قابل قبول است. سینگ و ورما [15] در سنگ‌های شیستوزیته بااستفاده از یک الگوریتم هوشمند برای هم‌بستگی مقاومت فشاری تک‌محوره از پارامترهایی نظیر پوکی، تخلخل، مقاومت کششی و شاخص بار نقطه‌ای استفاده کردند. یاگیز و همکاران[16] بااستفاده از روش‌های هوشمند یک مدل توعه‌یافته برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ کربناته بااستفاده از خواص سنگ‌ها ارائه کردند. آنها بیان کردند که سرعت موج p، چگالی و مقادیر چکش اشمیت ($R_n$) سنگ‌ها می‌تواند برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین سینگ و همکاران[17] یک مقالهٔ جامع و کاربردی درمورد پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از روش‌های هوش محاسباتی منتشر کردند. سزر و همکاران [18] پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ گرانیت توسط ابزارهای مختلف غیرخطی و مقایسهٔ عملکرد آنها ارائه دادند که در آن از سه روش آنالیز مختلف رگرسیونی چندمتغیره، شبکهٔ عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی برای تخمین این پارامتر استفاده کردند. آرماقندی و همکاران بااستفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به تخمین مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ برروی ٤٧ نمونه ماسه‌سنگ در مالزی پرداختند. در این تحقیق به‌منظور نشان دادن قابلیت الگوریتم GEP، مدل را با رگرسیون خطی مقایسه کردند که نتایج نشان داد مدل GEP برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد [19]. سعیدی و همکاران به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره از پارامترهایی نظیر مقاومت کششی برزیلی (BSI)، شاخص بار نقطه‌ای ($I_s(50)$) و سرعت موج p (به‌عنوان پارامترهای ورودی) برای سنگ‌های مختلف استفاده کردند. در این تحقیق برای مدل‌سازی از روش‌های تحلیل رگرسیونی چندگانه، شبکهٔ عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش رگرسیون چندگانه نسبت‌به شبکهٔ عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی از دقت کمتری برخوردار است [20]. وانگ و ون[21] با الگوریتم GEP به تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از مقادیر برگشتی چکش اشمیت (به‌عنوان پارامتر ورودی) پرداختند. جدول (۲) خلاصهٔ برخی از مطالعاتی که برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از روش‌های هوشمند انجام شده‌است را نشان می‌دهد.

جدول ۲ خلاصه‌ای از مطالعات قبلی در مورد پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از روش‌های هوشمند

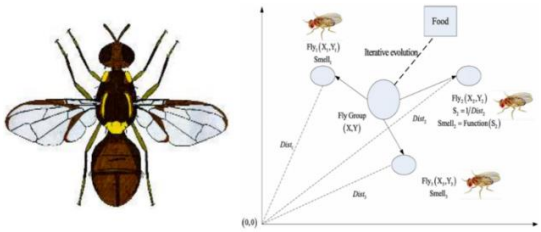
| مرجع | روش هوشمند مورد استفاده | $R^2$ |
|---|---|---|
| مولنکمپ و گریما [49] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۹۵ |
| گوکچه‌اوغلو و زورلو [50] | منطق فازی | ۰/٦۷ |
| زورلو و همکاران [51] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۷٦ |
| ییلماز و یوکسک [52] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۹۳ |
| ییلماز و یوکسک [53] | سیستم استنتاج فازی عصبی | ۰/۹٤ |
| دهقان و همکاران [54] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۸٦ |
| رضایی و همکاران [55] | منطق فازی | ۰/۹۵ |
| تانیزام محمد و همکاران [56] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۹۷ |
| میشرا و باسو [57] | سیستم استنتاج فازی عصبی | ۰/۹۸ |
| ترابی-کاوه و همکاران [56] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۹۵ |
| یاگیز و همکاران [16] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۵۰ |
| سیرین و همکاران [58] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۸۸ |
| ربانی و همکاران [59] | شبکه عصبی مصنوعی | ۰/۹٦ |

بنابراین از آنجا که روش‌های الگوریتم‌های هوشمند نسبت‌به روش‌های تجربی و آماری از دقت پیش‌بینی بالاتری برخوردار هستند در این مقاله نیز برای تخمین دقیق مقاومت فشاری تک‌محورهٔ سنگ گرانیت از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری گرگ خاکستری و مگس میوه استفاده شده‌است.

## مختصری از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری مورد استفاده در این تحقیق الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه (FFOA)

الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه اولین بار توسط پن ارائه شد [60]. الگوریتم مگس میوه روشی نوین برای جستجوی جواب بهینهٔ سراسری است که برپایهٔ رفتار غذایابی مگس میوه مدل‌سازی و ارائه شده‌است. مراحل این الگوریتم براساس خصوصیات غذایابی مگس‌ها که شمای کلی آن در شکل (۱) ارائه شده‌است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

گام اول: موقعیت مکانی اولیهٔ هر یک از اعضای جمعیت مگس‌های میوه به صورت تصادفی تعیین می شود (مانند مگس‌های مشخص شده در شکل (۱) که با اسامی Fly1، Fly2 و Fly3 نشان داده شده‌اند).




شکل ۱ مثالی از حرکت دسته جمعی مگس میوه برای یافتن غذا

گام دوم: بااستفاده از مکانیزم بویایی حشرات به هر حشره یک جهت و فاصلهٔ تصادفی برای جستجو اختصاص پیدا می‌کند.

$$X_i = X_{axis} + RandomValue \quad (۱)$$

$$Y_i = Y_{axis} + RandomValue \quad (۲)$$

گام سوم: از آنجایی که محل غذا در مرحلهٔ اول قابل شناسایی نیست، فاصله تا مبدأ تخمین زده می‌شود،

سپس مقدار غلظت بو (Si) محاسبه می‌شود که این مقدار معکوس فاصله است:

$$Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (۳)$$

$$S_i = \frac{1}{Dist_i} \quad (٤)$$

گام چهارم: میزان تشخیص شدت بویایی (Si) به‌عنوان تابع تشخیص شدت بویایی (که تابع برازندگی این الگوریتم است) در نظر گرفته می‌شود و برای یافتن شدت بویایی (Smalli) برای موقعیت مکانی هر مگس از آن بهره گرفته می‌شود:

$$Small_i = Function(S_i) \quad (۵)$$

گام پنجم: مگس میوه‌ای که بیشترین غلظت بو را در دستهٔ مگس‌ها حس کرده‌است مشخص می‌شود:

$$[bestSmellbestIndex] = max(smell) \quad (٦)$$

گام ششم: بهترین میزان شدت بویایی و مختصات X و Y آن در نظر گرفته می شود و دستهٔ مگس‌های میوه از بینایی خود برای حرکت به‌سمت آن موقعیت استفاده می‌کند:

$$Smellbest = bestSmell \quad (۷)$$

$$X_{axis} = X(bestIndex) \quad (۸)$$

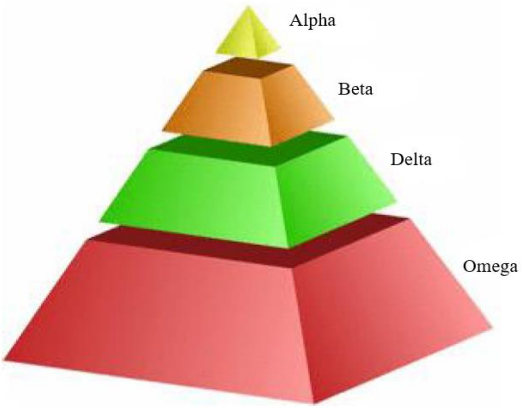
$$Y_{axis} = Y(bestIndex) \quad (۹)$$

گام‌های دوم تا پنجم زمانی‌که غلظت بوی بهتری نسبت‌به غلظت بوی قبلی به‌دست آید تکرار می شوند، در این صورت گام ششم اجرا می‌شود.

## الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم گرگ خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران برمبنای شکار دسته‌جمعی آنها ارائه شده‌است. زندگی گروهی گرگ‌ها دارای سلسله‌مراتب اجتماعی دقیق و بسیار منظمی است که در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

مطابق با شکل، رأس هرم متعلق به گروه آلفا (α) می‌باشد، که به‌عنوان رهبران گروه مسئولیت تمام تصمیم‌گیری‌ها و مدیریت گله از قبیل شکار را برعهده دارند. سطح دوم در سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری، بتا (β) است. گرگ بتا، گرگ‌های زیردست گرگ آلفا است که در تصمیم‌گیری‌ها یا فعالیت‌های دیگر گروه کمک می‌کند. در صورتی‌که گرگ آلفا خیلی پیر شود یا بمیرد، احتمالا بهترین نامزد برای جایگزینی گرگ آلفا هست. پایین‌ترین دسته در این سلسله‌مراتب، گرگ‌های امگا (ω) هستند. گرگ‌های امگا همیشه مطیع دیگر گرگ‌های غالب می‌باشند. آنها اخرین گروه از گرگ‌هایی هستند که مجاز به خوردن هستند. سطح دیگری از این سلسله‌مراتب به دستهٔ گرگ‌های دلتا (δ) تعلق دارد. این دسته از گرگ‌ها تحت پیروی از فرمان گرگ‌های آلفا و بتا هستند اما با این حال بر گرگ امگا غالب می‌باشند [62].




شکل ۲ ساختار سلسله مراتبی شکار گروهی گرگ‌ها [61]

باتوجه به بررسی‌های مورو و همکارانش، مراحل اصلی شکار گرگ‌های خاکستری به شرح زیر می‌باشد:

۱. ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه.
۲. تعقیب، محاصره و آزار طعمه تا زمانی که از حرک بازایستد.
۳. حمله به‌سمت طعمه.

## مدل‌سازی فرآیند محاصرهٔ طعمه توسط گرگ‌های خاکستری

همان‌طور که گفته شد، گرگ‌های خاکستری طعمه را در طول شـــکار محاصـــره می‌کنند. به‌منظور مدل کردن این رفتار محاصره به‌صورت ریاضی، معادلات (۱۰) و (۱۱) ارائه شده‌است [62]:

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۱۰)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D} \quad (۱۱)$$

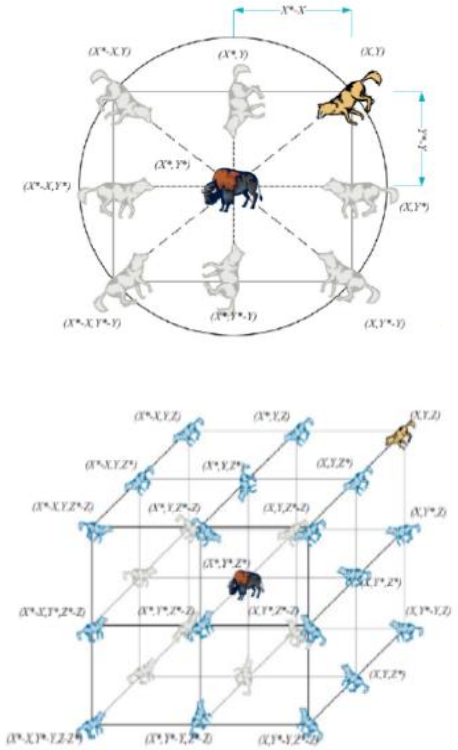
در روابط فوق، t شـــماره تکرار، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردارهای ضریب، $\vec{X}_p$ بردار موقعیت شکار و $\vec{X}$ بردار موقعیت یک گرگ خاکستری ا ست. بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند [62]:

$$\vec{A} = 2\vec{\alpha}.\vec{r}_1 - \vec{\alpha} \quad (۱۲)$$

$$\vec{C} = 2.\vec{r}_2 \quad (۱۳)$$

$$\vec{\alpha} = 2 - \text{iter} \times \left(\frac{2}{\text{Max-iter}}\right) \quad (۱٤)$$

که در آن، مؤلفه‌های $\vec{\alpha}$ به‌صـــورت خطی و در طی تکرارهای متوالی از ۲ تا صـــفر کاهش می‌یابد. همچنین $r_1$ و $r_2$ بردارهای تصـــادفی بین صـــفر و یک هســـتند. معادلات (۱۰) و (۱۱) به‌همراه یک بردار مکان دوبعدی و تعدادی همسایگی احتمالی در شکل (۳- الف) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود یک گرگ خاکستری که در مکان $(X, Y)$ قرار دارد، می‌تواند موقعیت خود را باتوجه به موقعیت طعمه $(X^*, Y^*)$ عوض کند. مکان‌های مختلف موجود در اطراف بهترین عامل را می‌توان باتوجه به موقعیت‌های فعلی آن و تنظیم و تغییر مقدار بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ به د ست آورد. مکان‌های احتمالی بروز شـــده مربوط به یک گرگ خاکســـتری در فضای سه‌بعدی در شکل (۳- ب) نشان داده شده‌است. باید توجه داشـــت که بردارهای تصـــادفی $r_1$ و $r_2$ به گرگ‌ها اجازهٔ دست‌یابی به هر موقعیتی مابین نقاط نشان داده شده در شکل (۳) را می‌دهند.



شکل ۳ بردارهای مکانی دوبعدی و سه‌بعدی و موقعیت احتمالی بعدی آن‌ها [63]

## مدل‌سازی فرآیند شکار

در این فرآیند، با فرض اینکه گرگ های آلفا، بتا و دلتا دانش بهتری در مورد موقعیت بالقوه طعمه دارند. ســـایر عوامل جســـتجو از جمله امگا- مطابق روابط (۱۵) تا (۱۷) ملزم به بروزر سانی موقعیت مکانی خود باتوجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو هستند [62]:

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1.\vec{X}_\alpha - \vec{X}\right|, \vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2.\vec{X}_\beta - \vec{X}\right|, \vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3.\vec{X}_\delta - \vec{X}\right| \quad (۱۵)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1.(\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2.(\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3.(\vec{D}_\delta) \quad (۱٦)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۱۷)$$

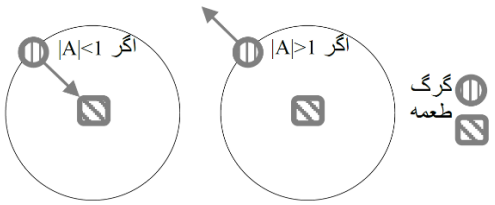
مدل کردن این فرآیند بااســـتفاده از کاهش بردار $\alpha$ انجام می‌شـــود. از آنجا که $\vec{A}$ در رابطهٔ (۱۳)، برداری تصـــادفی در بازهٔ ما بین $[-2\alpha, 2\alpha]$ اســـت، در حالت

$|A| < 1$ گرگ آلفا به شکار نزدیک می‌شود و در حالت $|A| > 1$ گرگ از شکار دور خواهد شد. در این الگوریتم الزام آن است که تمامی گرگ‌ها موقعیت خود را برحسب موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا به‌روزرسانی کنند [62].

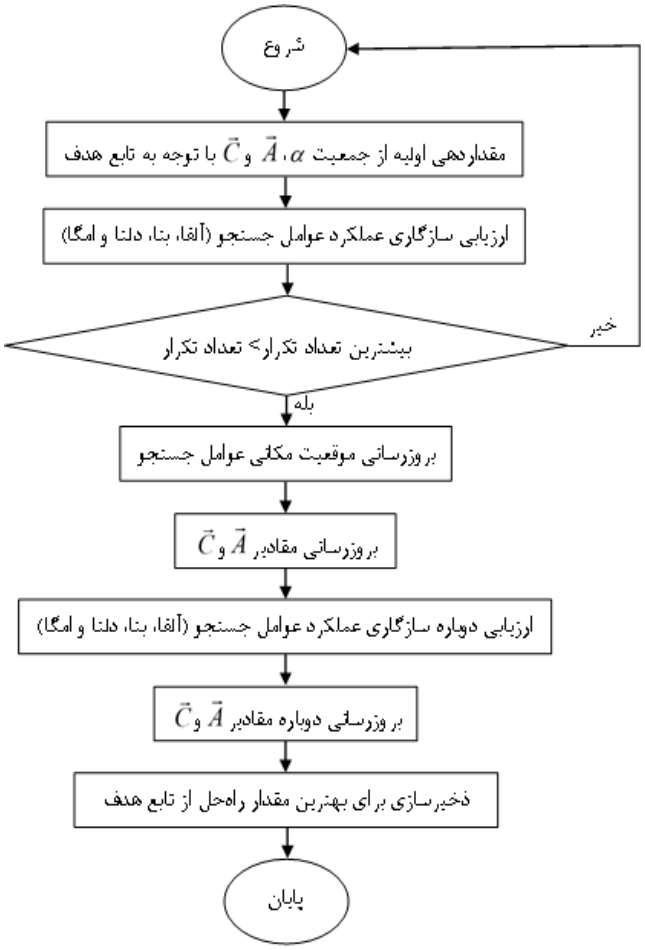
## مرحلهٔ جستجوی شکار

مرحلهٔ جستجوی شکار سازوکاری دقیقا عکس فرآیند حمله دارد، به‌طوری‌که در هنگام جستجوی گرگ‌ها از یکدیگر دور می‌شوند تا شکار را ردیابی کنند ($|A| > 1$) و این در حالی است که پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در فاز حمله به یکدیگر نزدیک می شوند ($|A| < 1$). به این استراتژی، سازوکار واگرایی در جستجوی و هم‌گرایی در حمله اطلاق می شود. شکل (٤) هم‌گرایی و واگرایی در یافتن و جستجوی شکار را نشان می‌دهد [62].

مطابق با توضیحات فوق، فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در شکل (۵) آورده شده‌است.



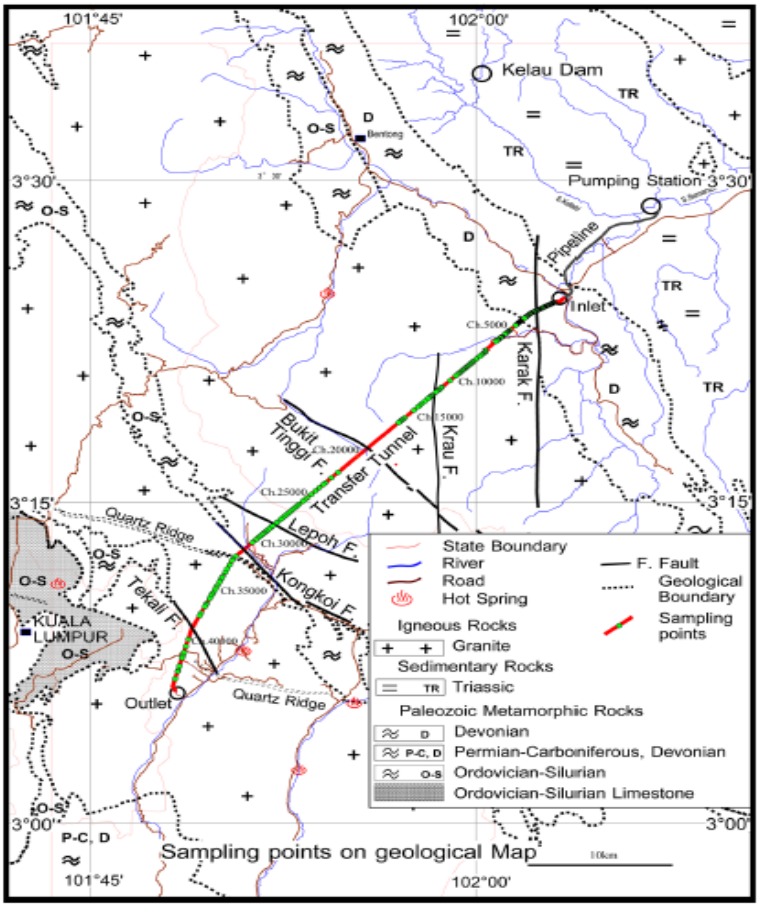

شکل ٤ حمله به طعمه در مقابل جستجو برای شکار [61]




شکل ۵ فلوچارت الگوریتم گرگ خاکستری

## منطقهٔ مورد مطالعه

در این مقاله، از داده‌های تونل آب شیرین پاهانگ- سلانگور در مالزی [64] به‌منظور تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده شده‌است. طول این تونل ٤٤/٦ کیلومتر با قطر ۵/۲ متر و شیب طولی ۱/۱۹۰۰ است. این تونل برای کار در شرایط جریان آزاد با حداکثر دبی ٦/۲۷ مترمکعب در ثانیه طراحی شده است. ۳۵ کیلومتر از تونل بااستفاده از سه دستگاه مختلف ماشین حفاری تمام مقطع (TBM) حفر شده‌است، درحالی‌که ۹/٦ کیلومتر باقی‌مانده بااستفاده از روش چالزنی- انفجار حفاری شده است. سه دستگاه TBM برای حفاری شرایط مختلف زمین، برای مثال زمین با سینه‌کار مختلط، زمین بسیار سخت در تونل آب شیرین پاهانگ- سلانگور مورد استفاده قرار گرفته است. نقشهٔ زمین شناسی محل تونل و نقاط نمونه‌برداری در شکل (٦) آورده شده‌است. غالب سنگ منطقه گرانیت است و طبیعی است بیشترین سنگی که توسط دستگاه TBM و روش چالزنی- انفجار حفاری می‌شود گرانیت است. برای دست‌یابی به پارامترهای ژئومکانیکی منطقه ١٢٤ نمونه گرانیت از سطح تونل در محل‌های مختلف زمین گرفته شده‌است. این نمونه سنگ‌های گرانیتی (بدون شکستگی و ناپیوستگی) به‌منظور تست‌های آزمایشگاهی از جمله مقادیر برگشتی چکش اشمیت ($R_n$)، شاخص بار نقطه‌ای ($I_s(50)$) و سرعت موج p ($V_p$) به آزمایشگاه برده شده و مطابق با استانداردهای ISRM و ASTM آزمایش‌های مربوط به آنها انجام شده‌است. بخشی از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۳) نشان داده شده‌است [65].




شکل ٦ نقشه زمین‌شناسی محل تونل و نقاط نمونه‌برداری [64]

جدول ۳ بخشی از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه بر روی سنگ گرانیت [64]

| پارامتر خروجی | پارامترهای ورودی مدل‌ها | | | شماره داده |
|---|---|---|---|---|
| مقاومت فشاری تک محوره (UCS) (MPa) | شاخص بار نقطه‌ای ($Is_{(50)}$) (MPa) | سرعت موج p ($V_p$) (m/s) | مقادیر برگشتی چکش اشمیت (Rn) | |
| ۸۲/۶ | ۲/۳۱ | ۵۵۰۶ | ۴۰ | ۱ |
| ۷۵ | ۲/۸۷ | ۶۴۵۰ | ۳۹ | ۲ |
| ۶۲/۹ | ۳/۸۹ | ۳۰۵۰ | ۳۷ | ۳ |
| ۵۵/۴ | ۱/۸۲ | ۲۹۲۰ | ۴۵ | ۴ |
| ۱۳۲/۹ | ۳/۱۲ | ۵۹۵۰ | ۴۸ | ۵ |
| ۸۷/۹ | ۲/۴ | ۳۷۸۰ | ۵۵ | ۶ |
| ۷۷/۹ | ۴/۵۶ | ۳۱۰۲ | ۳۴ | ۷ |
| ۶۴/۲ | ۳/۰۱ | ۳۰۲۰ | ۳۳ | ۸ |
| ۶۹/۹ | ۰/۵ | ۶۹۱۰ | ۳۵ | ۹ |
| ۹۷/۹ | ۳/۲۲ | ۵۲۱۷ | ۵۰ | ۱۰ |

## تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوره توسط الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و مگس میوه

از آنجا که استفاده از روش‌های رگرسیونی به‌منظور تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشند، بنابراین روش‌های هوشمند جایگزین مناسبی از نظر دقت مدل‌سازی برای روش‌های رگرسیونی می‌باشند. به همین منظور در این مقاله، بااستفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و مگس میوه برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده شده‌است. در این مدل‌سازی از مقادیر برگشتی چکش اشمیت ($R_n$)، شاخص بار نقطه‌ای ($I_s(50)$) و سرعت موج p ($V_p$) به‌عنوان ورودی‌مدل‌ها استفاده شده‌است. در این مدل‌سازی داده‌های ورودی به‌صورت تصادفی به دو گروه داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شدند. بدین منظور از مجموع ۱۲۴ داده، ۸۰ درصد مجموعه داده (۹۹ داده) به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد مجموعه داده (۲۵ داده) به‌عنوان داده‌های آزمون برای ارزیابی صحت و دقت مدل استفاده شد.

در روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر داده، معمولا قبل از هرگونه محاسبات و مدل‌سازی، برای حذف داده‌های پرت و دست‌یابی به نتایج قابل قبول، داده‌ها نرمال‌سازی می شوند تا کاملا برای مدل سازی آماده شوند. به همین منظور، بااستفاده از معادلهٔ (۱۸)، مقادیر بین ۰ و ۱ نرمال می‌شوند. در این معادله، $X_n$ مقدار نرمال‌شده، $X_{mea}$ مقدار واقعی، $X_{max}$ حداکثر مقدار و $X_{min}$ حداقل مقدار می‌باشد.

$$X_n = [\frac{(X_{mea}-X_{min}}{(Xmin_{max}]} \quad (۱۸)$$

پس از نرمال‌سازی داده‌های آموزش و آزمون، برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی گرگ خاکستری و مگس میوه دو معادلهٔ یکسان غیرخطی بااستفاده از نرم‌افزار MATLAB به‌صورت زیر به‌دست آمده‌است:

$$UCS = (w_1 \times {R_n}^{w_2}) \times (w_3 \times {V_p}^{w_4}) + (w_5 \times Is^{w_6}) \quad (۱۹)$$

که در آن $w_i$ عوامل وزن‌دهی متناظر با پارامترهای ورودی هستند. به‌منظور رسیدن به یک رابطهٔ دقیق برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (معادلهٔ ۱۹) علاوه‌بر فرم رابطه به یکسری از پارامترهای تنظیم در هر دو

الگوریتم گرگ خاکستری و مگس میوه که با روش آزمون و خطا و توسط کاربر مشخص می‌شود، نیاز است. بهترین مدل‌های گرگ خاکستری و مگس میوه بااستفاده از پارامترهای مشخص‌شده توسط کاربر به‌ترتیب در جدول (٤) و (٥) ارائه شده‌است.

جدول ٤ پارامترهای تنظیم برای الگوریتم GWO

| پارامترها | مقدار |
|---|---|
| ماکزیمم تعداد تکرار | ۷۰۰۰ |
| تعداد گرگ‌ها | ۱۶ |

جدول ٥ پارامترهای تنظیم برای الگوریتم مگس میوه

| پارامترها | مقدار |
|---|---|
| ماکزیمم تعداد تکرار | ۵۰۰۰ |
| اندازه جمعیت | ۲۰ |

پس از ساخت معادله و پارامترهای تنظیم، ضرایب روابط پیش‌بینی زیر به‌صورت غیرخطی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره بااستفاده از دو الگوریتم گرگ خاکستری و مگس میوه به‌ترتیب به‌صورت زیر به‌دست آمده‌است:

$$UCS = \left(1.0023 \times R_n^{1.0086}\right) \times \left(0.2729 \times V_p^{0.2182}\right) + \left(1.7621 \times Is^{1.9846}\right) \quad (۲۰)$$

$$UCS = \left(0.0404 \times R_n^{0.0472}\right) \times \left(0.0515 \times V_p^{0.0625}\right) + \left(0.1366 \times Is0.0734\right) \quad (۲۱)$$

## صحت‌سنجی مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی عملکرد و دقت مدل‌های ایجاد شده توسط الگوریتم‌های گرگ خاکستری و مگس میوه چندین شاخص و معیار شامل ضریب هم‌بستگی مربع (R2)، شمول واریانس (VAF)، میانگین در صد خطای مطلق (MAPE)، جذر میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) معرفی شده‌اند. در تمامی این معادلات (معادلات ۲۲ تا ۲٦) Ymea و Ypre به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هستند و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{n}(Y_{mea}-Y_{pre})^2}{\sum_{k=1}^{n} Y_{mea}^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_{pre}^2}{n}} \quad (۲۲)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{var(Y_{mea}-Y_{pre})}{var(Y_{mea})}\right] \quad (۲۳)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}\left|Y_{mea} - Y_{pre}\right| \quad (۲٤)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_{mea} - Y_{pre})^2} \quad (۲٥)$$

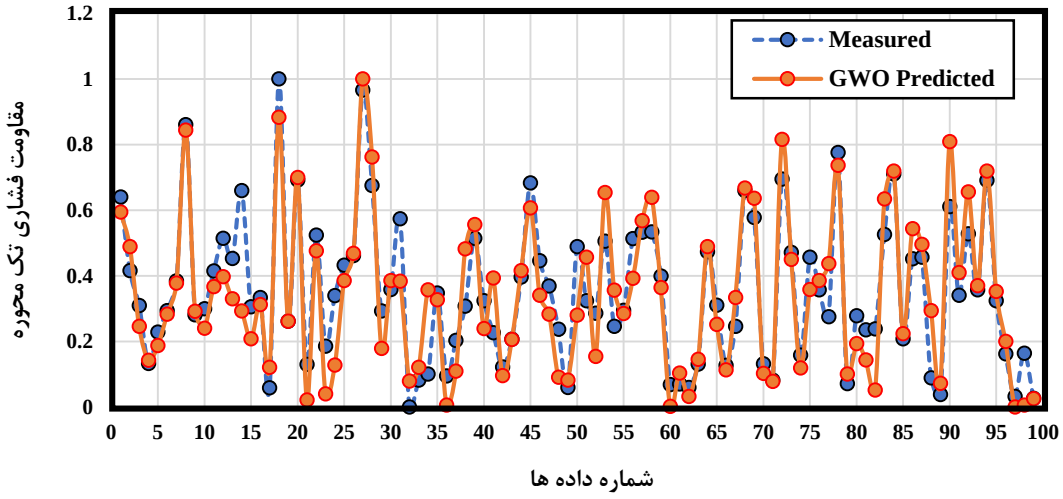
$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_{mea} - Y_{pre})^2 \quad (۲٦)$$

مطابق با روابط فوق، هر چه‌قدر مقادیر MAPE، RMSE و MSE به صفر نزدیک‌تر و مقادیر $R^2$ و VAF به‌سمت عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی‌شده به مقدار واقعی نزدیک‌تر می‌شود و به‌عنوان یک مدل ایده‌آل پذیرفته می‌شود. به عبارت دیگر در این حالت خطای آن بسیار کم است و به واقعیت مسئله نزدیک‌تر می باشد. به همین‌منظور صحت‌سنجی روابط به‌دست‌آمده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (روابط پیش‌بینی ۲۰ و ۲۱) به‌صورت جدول (٦) محاسبه شده‌است.

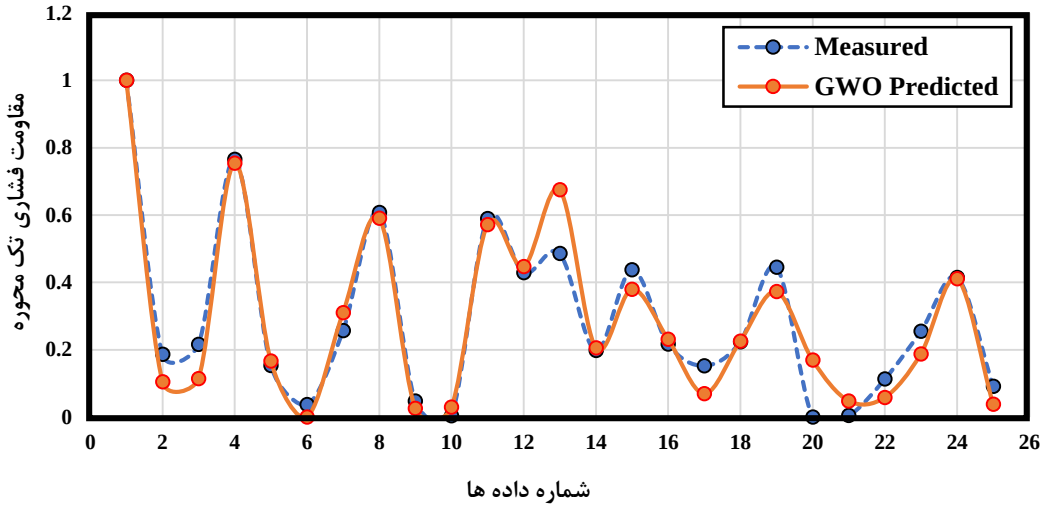
باتوجه به جدول (٦)، همان‌طور که مشخص است روابط پیش‌بینی غیرخطی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های گرگ خاکستری و مگس میوه از دقت مطلوبی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره برخوردار می‌باشند. هم‌چنین، شکل‌های (۷) و (۸) مقایسه بین مقاومت فشاری تک‌محورهٔ پیش‌بینی و اندازه‌گیری را در دو مرحلهٔ آموزش و آزمایش برای ۱۲٤ داده نشان داده‌اند. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از این شکل‌ها می‌توان فهمید مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه با مقادیر مدل‌های پیش‌بینی از انطباق بالایی برخوردار می‌باشند.

جدول ٦ صحت‌سنجی روابط پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری و مگس میوه

| نوع الگوریتم | شرح | $R^2$ | VAF | MAPE | RMSE | MSE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| گرگ خاکستری | آموزش | ۰/۸۱۹۳ | ۰/۸۷۲۳ | ۰/۰۲۸۰ | ۰/۰۹۷۷ | ۰/۰۰۹۵٤۷ |
| | آزمون | ۰/۹۳۰۷ | ۰/۹۳۷۷ | ۰/۰۲۰۵ | ۰/۰۱٤٦ | ۰/۰۰۰۲۱٦ |
| مگس میوه | آموزش | ۰/۷۲٦٤ | ۰/۸٦٤۰ | ۰/۰٤۸٤ | ۰/۱٦٤۰ | ۰/۰۲٦۹۱۸ |
| | آزمون | ۰/۹۱٤۰ | ۰/۹۲۷۲ | ۰/۰۲۵۳ | ۰/۰۱۸۰۷ | ۰/۰۰۰۳۲۷ |

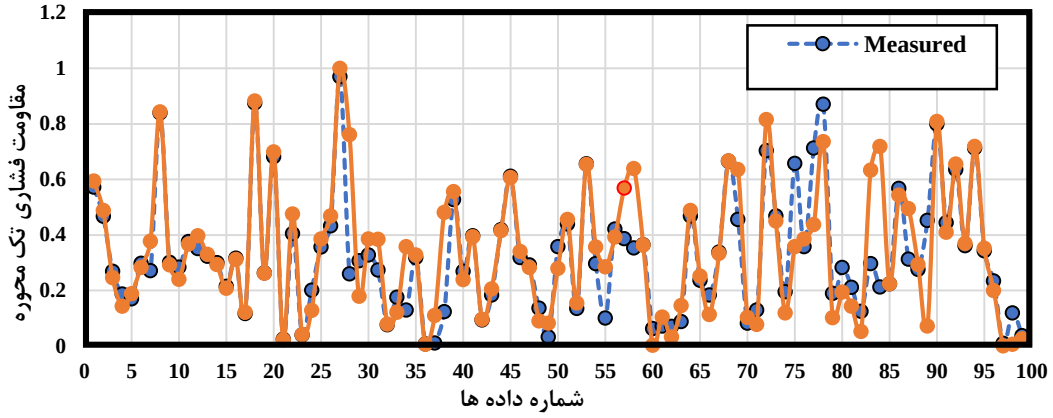



(الف)

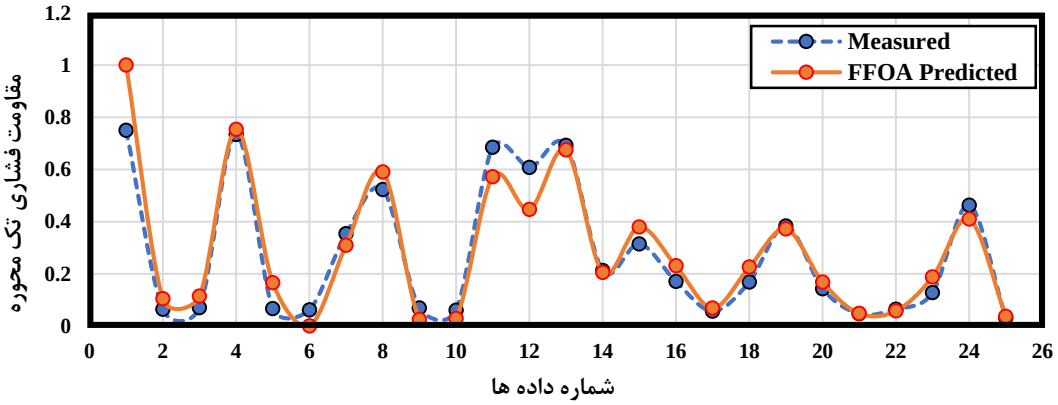



(ب)

شکل ۷ مقایسه بین مقاومت فشاری تک محوره اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری برای: (الف) داده‌های آموزش، (ب) داده‌های آزمون




(الف)

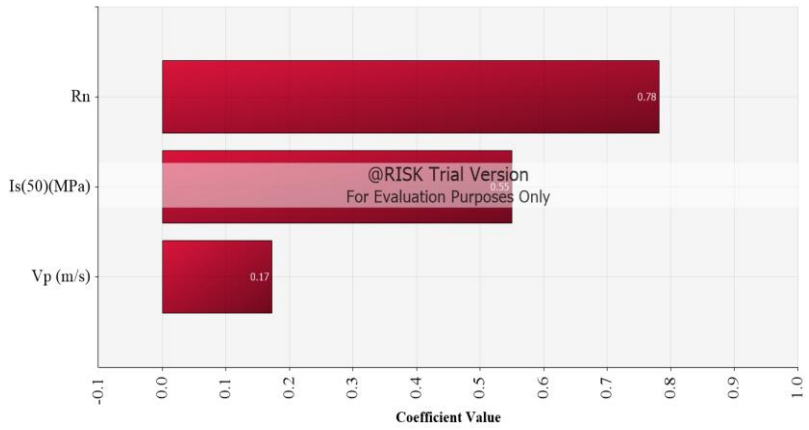



(ب)

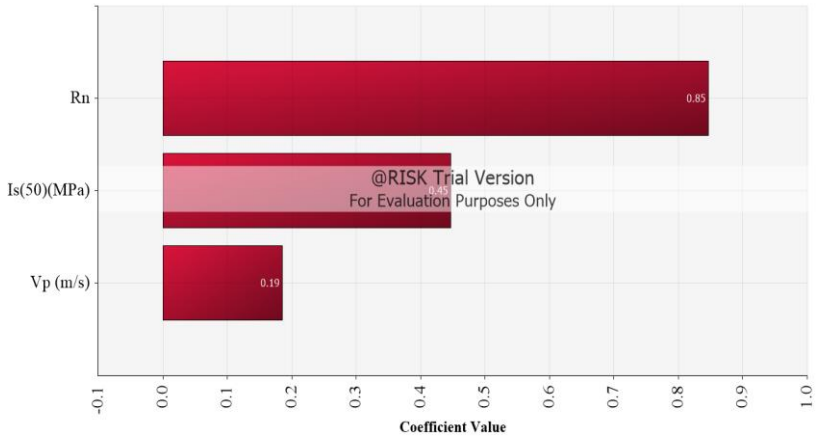
شکل ۸ مقایسه بین مقاومت فشاری تک محوره اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم مگس میوه برای: (الف) داده‌های آموزش، (ب) داده‌های آزمون

## آنالیز حساسیت

از آنجا که مقاومت فشاری تک‌محوره به تمام پارامترهای $R_n$، $I_s(50)$ و $V_p$ وابسته است، تجزیه و تحلیل هم‌بستگی برای شناسایی پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری تک‌محوره دارند، انجام شد. در این تجزیه و تحلیل، از نرم‌افزار Risk@ برای پیدا کردن هم‌بستگی‌ها و هم‌چنین رتبه‌بندی پارامترها استفاده شد. بایستی به این نکته توجه شود که مقادیر هم‌بستگی، که از طریق نرم‌افزار Risk@ به‌دست می‌آید، می‌تواند در محدودهٔ بین ۱- تا ۱+ باشند به‌طوری‌که هر چه قدر مقادیر پارامترها به عدد ۱ نزدیک‌تر شوند نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی مثبت بیشتر با مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشد و هم‌چنین در حالتی‌که مقادیر پارامترها به عدد ۱- نزدیک‌تر شوند نشان‌دهنده هم‌بستگی منفی بیشتر با مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشند که در این حالت در رتبه بالاتری قرار می‌گیرند و تغییر در آنها بیشترین تأثیر را برروی مقاومت فشاری تک‌محوره خواهد گذاشت. شکل (۹) و (۱۰) به‌ترتیب نتایج آنالیز حساسیت مربوط به معادلهٔ ایجاد شده توسط الگوریتم گرگ و مگس میوه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است $R_n$ بیشترین تأثیر را برروی مقاومت فشاری تک‌محوره در مقایسه با ورودی‌های دیگر مدل دارد [66].




شکل ۹ نتایج آنالیز حساسیت رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری




شکل (۱۰): نتایج آنالیز حساسیت رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم مگس میوه

## بحث و نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در حوزهٔ ژئومکانیک، ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشد. این ارزیابی، در طراحی سازه‌های سطحی و زیرزمینی و اجرای پروژه‌های مهندسی سنگ ضروری می‌باشد. تعیین مستقیم این پارامتر/پارامترها امری هزینه‌بر، زمان‌بر و مستلزم وجود امکانات آزمایشگاهی خاص می‌باشد. این امر باعث می‌شود برای کاهش هزینه و زمان، از روش های غیرمستقیم از جمله مقاومت فشاری تک‌محوره برای تخمین این پارامترها استفاده شود.

در این مقاله، از پارامترهای مختلف به‌دست‌آمده از آزمایشگاه شامل مقادیر برگشتی چکش اشمیت ($R_n$)، شاخص بار نقطه‌ای ($I_s(50)$) و سرعت موج p ($V_p$) در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره توسط دو الگوریتم هوشمند گرگ خاکستری و مگس میوه بهره گرفته شد. برای مدل‌سازی با کمک دو الگوریتم مذکور از ۱۲٤ دادهٔ حاصل از آزمایشگاه در پروژهٔ انتقال آب شیرین پاهانگ–سلانگور در مالزی برای سنگ گرانیت استفاده شد. در مرحلهٔ مدل‌سازی، به‌طور تصادفی ۸۰ درصد از این داده‌ها در مرحلهٔ آموزش (برای ساخت مدل‌ها) و ۲۰ درصد باقی‌مانده در مرحلهٔ آزمون مدل (برای صحت‌سنجی و ارزیابی مدل‌ها) مورد استفاده قرار گرفتند. پس از ایجاد مدل‌ها (روابط پیش‌بینی) بااستفاده از کدنویسی در

نرم‌افزار MATLAB، به‌منظور اعتبارسنجی این مدل از شاخص‌های ضریب هم‌بستگی مربع ($R^2$)، شمول واریانس (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، جذر میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) برای هریک از الگوریتم‌ها و داده‌های آموزش و آزمون مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که روابط پیش‌بینی ساخته‌شده توسط الگوریتم‌های هوشمند گرگ خاکستری و مگس میوه با مقادیر واقعی به‌دست‌آمده بسیار نزدیک است و از دقت بالایی برخوردار است. به همین دلیل باتوجه به رابطهٔ ساخته‌شده، با داشتن مقادیر ورودی برای پارامترهای $R_n$، $I_s(50)$ و $V_p$ می‌توان مقاومت فشاری تک‌محوره را برای هر منطقهٔ مطالعاتی استفاده کرد. در آخر پس از اعتبارسنجی مدل ساخته‌شده به‌منظور بررسی آنالیز حساسیت از نرم‌افزار Risk@ استفاده شد و نتایج نشان داد که پارامتر Rn در مقایسه با سایر پارامترها بیشترین تأثیر را برروی مقاومت فشاری تک‌محوره خواهد گذاشت. درنهایت می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از روش‌های هوشمند توانایی بالایی در حل مسائل پیچیده در حوزه‌های مختلف علم مکانیک سنگ که با عدم‌قطعیت زیادی روبه‌رو هستند، می‌تواند داشته باشد.

## مراجع


1. D'Andrea, D.V., Fischer, R., and Fogelson, D., "Prediction of Compressive Strength from other Rock Properties", *US Department of the Interior*, Bureau of Mines, Vol. 6702, pp. 155-188, (1965).
2. Cargill, J. S., and Shakoor, A., "Evaluation of Empirical Methods for Measuring the Uniaxial Compressive Strength of Rock", *in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, Vol. 27, pp. 495-503, (1990).
3. Tuğrul, A., and Zarif, I., "Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rocks from Turkey", *Engineering geology*, Vol. 51, pp. 303-317, (1999).
4. Karakus, M., and Tutmez, B., "Fuzzy and Multiple Regression Modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity", *Rock mechanics and rock engineering*, Vol. 39, pp. 45-57, (2006).
5. Basu, A., and Aydin, A., "Predicting Uniaxial Compressive Strength by Point Load Test: Significance of Cone Penetration", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 39, pp. 483-90, (2006).
6. Kahraman, S., and Gunaydin, O., "The Effect of Rock Classes on the Relation between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index", *Bulletin of engineering geology and the environment*, Vol. 68, pp. 345-353, (2009).
7. Basu, A., and Kamran, M., "Point Load Test on Schistose Rocks and Its Applicability in Predicting Uniaxial Compressive Strength", *International journal of rock mechanics and mining sciences (1997)*, Vol. 47, pp. 823-828, (2010).
8. Yagiz, S., "P-wave Velocity Test for Assessment of Geotechnical Properties of some Rock Materials",

*Bulletin of Materials Science,* Vol. 34, pp. 947-953, (2011).

9. Singh, T., Kainthola, A., and Venkatesh, A., "Correlation between Point Load Index and Uniaxial Compressive Strength for Different Rock Types", *Rock Mechanics and Rock Engineering,* Vol. 45, pp. 259-264, (2012).
10. Aladejare, A. E., "Evaluation of Empirical Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Using Measurements from Index and Physical Tests", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* Vol. 12, pp. 256-268, (2020).
11. Gokceoglu, C., "A Fuzzy Triangular Chart to Predict the Uniaxial Compressive Strength of the Ankara Sgglomerates from their Petrographic Composition", *Engineering Geology,* Vol. 66, pp. 39-51 ,(2002).
12. Tiryaki, B., "Predicting Intact Rock Strength for Mechanical Excavation Using Multivariate Statistics, Artificial Neural Networks, and Regression Trees", *Engineering Geology,* Vol. 99, pp. 51-60, (2008).
13. Sarkar, K., Tiwary, A., and Singh ,T., "Estimation of Strength Parameters of Rock Using Artificial Neural Networks", *Bulletin of engineering geology and the environment,* Vol. 69, pp. 599-606, (2010).
14. Manouchehrian, A., Sharifzadeh, M., and Moghadam, R.H., "Application of Artificial Neural Networks and Multivariate Statistics to Estimate UCS Using Textural Characteristics", *International Journal of Mining Science and Technology,* Vol. 22, pp. 229-236, (2012).
15. Singh, T. N., and Verma, A. K., "Comparative Analysis of Intelligent Algorithms to Correlate Strength and Petrographic Properties of Some Schistose Rocks", *Engineering with Computers,* Vol. 28, pp. 1-12, (2012).
16. Yagiz, S., Sezer, E., and Gokceoglu, C., "Artificial Neural Networks and Nonlinear Regression Techniques to Assess the Influence of Slake Durability Cycles on the Prediction of Uniaxial Compressive Strength and Modulus of Elasticity for Carbonate Rocks", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* Vol. 36, pp. 1636-1650, (2012).
17. Singh, R., et al., "A Comparative Study of Generalized Regression Neural Network Approach and Adaptive nNeuro-fuzzy Inference Systems for Prediction of Unconfined Compressive Strength of Rocks", *Neural Computing and Applications,* Vol. 23, pp. 499-506, (2013).
18. Yesiloglu-Gultekin, N., Gokceoglu, C., and Sezer, E. A., "Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Granitic Rocks by Various Nonlinear Tools and Comparison of their Performances", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 62, pp. 113-122, (2013).
19. Armaghani, D. J., et al., "Uniaxial Compressive Strength Prediction through a New Technique Based on Gene Expression Programming", *Neural Computing and Applications,* Vol. 30, pp. 3523-3532, (2018).
20. Saedi, B., Mohammadi, S. D., and Shahbazi, H., "Prediction of Uniaxial Compressive Strength and Elastic Modulus of Migmatites Using Various Modeling Techniques", *Arabian Journal of*

*Geosciences,* Vol. 11, pp. 1-14, (2018).

21. Wang, M. and Wan, W., "A New Empirical Formula for Evaluating Uniaxial Compressive Strength Using the Schmidt Hammer Test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 123, pp. 104094, (2019).
22. Broch, E., and Franklin, J., "The Point-load Strength Test", *in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, Vol. 9, pp. 669-676, (1972).
23. Mishra, D., and Basu, A., "Use of the Block Punch Test to Predict the Compressive and Tensile Strengths of Rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 51 ,pp. 119-127, (2012).
24. Smith, H. J., "The Point Load Test for Weak Rock in Dredging Applications", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Vol. 34, pp. 295. e1-295. e13, (1997).
25. Lashkaripour, G. R., "Predicting Mechanical Properties of Mudrock from Index Parameters", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* Vol. 61, pp. 73-77, (2002).
26. Forster, I., "The Influence of Core Sample Geometry on the Axial Point-load Test", *Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanic Abs,* Vol. 20, pp. 291-295, (1983).
27. Fener, M., et al., "A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks", *Rock Mechanics and Rock Engineering,* Vol. 38, pp. 329-343, (2005).
28. Ulusay, R., Türeli, K., and Ider, M., "Prediction of Engineering Properties of a Selected Litharenite Sandstone from its Petrographic Characteristics Using Correlation and Multivariate Statistical Techniques", *Engineering Geology,* Vol. 38, pp. 135-157, (1994).
29. Hassani, F., Scoble, M., and Whittaker, B., Application of the Point Load Index Test to Strength Determination of Rock and Proposals for a New Size-correction Chart, in The 21st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). OnePetro, (1980).
30. Çobanoğlu, İ. and Çelik, S.B., "Estimation of Uniaxial Compressive Strength from Point Load Strength, Schmidt Hardness and P-wave Velocity", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* Vol. 67, pp. 491-498, (2008).
31. Xu, S., Grasso, P., and Mahtab, A., "Use of Schmidt Hammer for Estimating Mechanical Properties of Weak Rock", in International congress international association of engineering geology. 6. (1990).
32. Sachpazis, C., "Correlating Schmidt Hardness with Compressive Strength and Young's Modulus of Carbonate Rocks", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur,* Vol. 42, pp. 75-83, (1990).
33. Singh, R., Hassani, F., and Elkington, P., "The Application of Strength and Deformation Index Testing to the Stability Assessment of Coal Measures Excavations", in The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association, (1983).

34. Yagiz, S., "Predicting Uniaxial Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Index Properties of Rocks Using the Schmidt Hammer", *Bulletin of engineering geology and the environment,* Vol. 68, pp. 55-63, (2009).
35. Shalabi, F.I., Cording, E.J., and Al-Hattamleh, O.H., "Estimation of Rock Engineering Properties Using Hardness Tests", *Engineering Geology,* Vol .90 ,pp. 138-147, (2007).
36. Yaşar, E. and Erdoğan, Y., "Estimation of Rock Physicomechanical Properties Using Hardness Methods", *Engineering Geology,* Vol. 71, pp. 281-288, (2004).
37. Aufmuth, R. E., A Systematic Determination of Engineering Criteria for Rock, (1974).
38. Yılmaz, I. and Sendır, H., "Correlation of Schmidt Hardness with Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus in Gypsum from Sivas (Turkey)", *Engineering Geology,* Vol. 66, pp. 211-219, (2002).
39. Gupta, V., "Non-destructive Testing of Some Higher Himalayan Rocks in the Satluj Valley", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* Vol. 68, pp. 409-416, (2009).
40. Sharma, P. and Singh, T., "A Correlation between P-wave Velocity, Impact Strength Index, Slake Durability Index and Uniaxial Compressive Strength", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* Vol. 67, pp. 17-22, (2008).
41. Armaghani, D.J., et al., "An Adaptive Neuro-fuzzy Inference System for Predicting Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus :A Study on Main Range Granite", *Bulletin of engineering geology and the environment,* Vol. 74, pp. 1301-1319, (2015).
42. Moradian, Z., and Behnia, M., "Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young's Modulus of Intact Sedimentary Rocks Using the Ultrasonic Test", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 9, pp. 14-19, (2009).
43. Diamantis, K., Gartzos, E., and Migiros, G., "Study on Uniaxial Compressive Strength, Point Load Strength Index, Dynamic and Physical Properties of Serpentinites from Central Greece: Test Results and Empirical Relations", *Engineering Geology,* Vol. 108, pp. 199-207, (2009).
44. Khandelwal, M., "Correlating P-wave Velocity with the Physico-mechanical Properties of Different Rocks", *Pure and Applied Geophysics,* Vol .170 ,pp. 507-514, (2013).
45. Entwisle, D., et al., "The Relationships between Effective Porosity, Uniaxial Compressive Strength and Sonic Velocity of Intact Borrowdale Volcanic Group Core Samples from Sellafield", *Geotechnical & Geological Engineering ,*Vol. 23, pp. 793-809, (2005).
46. Minaeian, B. and Ahangari, K., "Estimation of Uniaxial Compressive Strength Based on P-wave and Schmidt Hammer Rebound Using Statistical Method", *Arabian Journal of Geosciences,* Vol. 6, pp. 1925-1931, (2013).
47. Horsrud, P., "Estimating mMechanical Properties of Shale from Empirical Correlations", *SPE Drilling*

*& Completion,* Vol. 16, pp. 68-73, (2001).

48. Khandelwal, M. and Singh, T., "Correlating Static Properties of Coal Measures Rocks with P-wave Velocity", *International Journal of Coal Geology,* Vol. 79, pp. 55-60, (2009).
49. Meulenkamp, F. and Grima, M.A., "Application of Neural Networks for the Prediction of the Unconfined Compressive Strength (UCS) from Equotip Hardness", *International Journal of rock mechanics and mining sciences,* Vol. 36, pp. 29-39, (1999).
50. Gokceoglu, C. and Zorlu, K., "A Fuzzy Model to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity of a Problematic Rock", *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* Vol. 17 ,pp. 61-72, (2004).
51. Zorlu, K., et al., "Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Sandstones Using Petrography-based Models", *Engineering Geology,* Vol. 96, pp. 141-158, (2008).
52. Yılmaz, I. and Yuksek, A., "An Example of Artificial Neural Network (ANN) Application for Indirect Estimation of Rock Parameters", *Rock Mechanics and Rock Engineering,* Vol. 41, pp. 781-795, (2008).
53. Yilmaz, I. and Yuksek, G., "Prediction of the Strength and Elasticity Modulus of Gypsum Using Multiple Regression, ANN, and ANFIS Models", *International journal of rock mechanics and mining sciences (1997),* Vol. 46, pp. 803-810, (2009).
54. Dehghan, S., et al., "Prediction of Uniaxial Compressive Strength and Modulus of Elasticity for Travertine Samples Using Regression and Artificial Neural Networks", *Mining Science and Technology (China),* Vol. 20, pp. 41-46, (2010).
55. Rezaei, M., Majdi, A., and Monjezi, M., "An Intelligent Approach to Predict Unconfined Compressive Strength of Rock Surrounding Access Tunnels in Longwall Coal Mining", *Neural Computing and Applications,* Vol. 24, pp. 233-241, (2014).
56. Mohamad, E.T., et al., "Prediction of the Unconfined Compressive Strength of Soft Rocks: A PSO-based ANN Approach", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* Vol. 74, pp. 745-757, (2015).
57. Mishra, D. and Basu, A., "Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials by Index Tests Using Regression Analysis and Fuzzy Inference System", *Engineering Geology,* Vol. 160, pp. 54-68, (2013).
58. Ceryan ,N., Okkan, U., and Kesimal, A., "Prediction of Unconfined Compressive Strength of Carbonate Rocks Using Artificial Neural Networks", *Environmental earth sciences,* Vol. 68, pp. 807-819, (2013).
59. Rabbani, E., et al., "Application of Neural Network Technique for Prediction of Uniaxial Compressive Strength Using Reservoir Formation Properties", *International journal of rock mechanics and mining sciences (1997),* Vol. 56, pp. 100-111, (2012).

60. Pan, W.-T., "A New Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the Financial Distress Model as an Example", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 26, pp. 69-74, (2012).
61. Mirjalili, S. and Lewis, A., "The Whale Optimization Algorithm", *Advances in engineering software*, Vol. 95, pp. 51-67, (2016).
62. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., and Lewis, A., "Grey Wolf Optimizer", *Advances in engineering software*, Vol. 69, pp. 46-61, (2014).
63. Mech, L.D., "Alpha Sstatus, Dominance, and Division of Labor in Wolf Packs", *Canadian Journal of Zoology*, Vol. 77, pp. 1196-1203, (1999).
64. Armaghani, D.J., et al., "Application of Several Non-linear Prediction Tools for Estimating Uniaxial Compressive Strength of Granitic Rocks and Comparison of their Performances", *Engineering with Computers*, Vol. 32, pp. 189-206, (2016).
65. Hatheway, A.W ,.The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring; 1974–2006. 2009, Association of Environmental & Engineering Geologists.
66. Fattahi, H., Varmazyari, Z., and Babanouri, N., "Feasibility of Monte Carlo Simulation for Predicting Deformation Modulus of Rock Mass", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 89, pp. 151-156, (2019).

# تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه نفت بااستفاده از نانو فتوکاتالیست جدید Fe-ZSM-5@TiO2/Ag*

**پژوهشی**

محمد دلنواز [۱] کیارش اسحقی [۲]

**چکیده** *فاضلاب نفتی حاوی طیف وسیعی از آلاینده‌های سخت تجزیه‌پذیر است که با روش‌های متداول تصفیه نمی‌شود. در این مطالعه حذف فتوکاتالیستی آلاینده‌های آلی موجود در فاضلاب واقعی پالایشگاه نفت بااستفاده از نانو فتوکاتالیست سنتزی Fe-ZSM-5@TiO2/Ag مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای سنتز نانو فتوکاتالیست ابتدا آهن به‌منظور ارتقای ساختار زئولیت برروی ZSM-5 تثبیت شد و سپس تیتانیوم و نقره به‌منظور کاهش شکاف انرژی برروی آن پوشش یافت و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن توسط آنالیزهای XRD، SEM، FT-IR و BET تعیین شد. رویهٔ انجام آزمایش‌های تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه نفت بااستفاده از طراحی آزمایش به‌روش پاسخ سطح (RSM) انجام شد. برای بررسی پارامترهای تأثیرگذار، اثر غلظت آلاینده، غلظت نانوذرات فتوکاتالیست، pH، زمان واکنش، طول موج تابش و فتوکاتالیست‌های مختلف در یک پایلوت ناپیوسته انجام شد. نتایج نشان داد که در pH برابر با ۵ و غلظت فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@TiO2/Ag برابر با ۲ گرم بر لیتر و تحت تابش نور UV-A به شدت ۵۴ وات و زمان ۲۴۰ دقیقه بهترین عملکرد حذف COD در حدود ۸۳ درصد به‌دست می‌آید.*

**واژه‌های کلیدی** نانو فتوکاتالیست، زئولیت، لامپ UV، فاضلاب نفتی.

# Treatment of Petroleum Wastewater Using new Fe-ZSM-5@TiO2/Ag Nano Photocatalyst

M. Delnavaz K. Eshaghi

**Abstract** *Petroleum wastewater contains a wide range of hard biodegradable pollutants that are not treated by conventional treatment methods. In this study, the photocatalytic degradation of organic pollutants in the wastewater of Petroleum were investigated using new Fe-ZSM-5@TiO2/Ag synthetic nano-photocatalyst. Synthesis of nano photocatalyst was done by immobilizing iron on zeolite to improve ZSM-5 structure and then TiO2 and Ag coated to reduce the band gap energy. Physical and chemical properties of the materials determined by XRD, SEM, FT-IR and BET analyzes. TiO2 in the anatase phase was shown in synthetic nano-photocatalyst using XRD analysis. The uniformity of the nanoparticles was also revealed in the SEM images, which showed that the TiO2 and Ag particles were well located on the surface of Fe-ZSM-5. Experimental procedure was done using experimental method by response surface method (RSM). The effects of main parameters containing pollutant concentration, photocatalyst nanoparticle concentration, pH, reaction time, radiation wavelength and different photocatalysts were performed in a batch pilot. The results showed that at pH=5 and the photocatalyst concentration of Fe-ZSM-5@TiO2/Ag equal to 2 g/L under UV-A irradiation at 54 watts and 240 min time the best COD removal performance was about 83%.*

**Key Word** Nano-photocatalyst, Zeolite, UV lamp, Petroleum wastewater.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۰/۲۹ و تاریخ پذیرش آن۱۴۰۰/۷/۱۷ و از صفحه ۷۱ تا ۸۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران **E-mail:** delnavaz@khu.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

## مقدمه

فاضلاب پالایشگاه نفت شامل پساب تولیدشده از صنایع مرتبط با تولید سوخت‌های فسیلی، ترکیبات پتروشیمی و ترکیبات تجاری هیدروکربنی، روغن، گریس و تولید نفت خام می‌باشد [1]. این فاضلاب به‌دلیل دارا بودن گسترهٔ وسیعی از آلاینده‌های آلی با غلظت‌های متفاوت، از جمله منابع اصلی آلودگی آب‌ها می‌باشد. وجود مواد سمی و ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای و آلیفاتیک به‌دلیل ماهیت بسیار پایدار این ترکیبات برای زمان طولانی در محیط آبی باقی می‌ماند و مخاطرات زیست‌محیطی فراوانی به‌وجود می‌آورد [2]. در ایران اکثر پالایشگاه‌ها در حاشیهٔ کلان‌شهرها و حتی در برخی از مواقع در داخل شهرها بنا شده‌اند که این شرایط می‌تواند به‌دلیل تأثیر سریع و عمیق‌تر بر انسان چالش‌انگیز شود. در تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه‌های نفت به‌دنبال فرایندهای بیولوژیکی از فرایندهای متفاوت فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی استفاده می‌شود. باتوجه به وجود انواع هیدروکربن‌های نفتی با غلظت‌های متفاوت در این نوع فاضلاب‌ها، به‌راحتی نمی‌توان با روش‌های متداول، فرایند تصفیه را انجام داد [3]. برای تصفیهٔ آلاینده‌های نفتی می‌توان به روش‌هایی هم‌چون فتوفنتون، فنتون، انعقاد و لخته‌سازی [4]، تصفیهٔ الکتروشیمیایی، اکسیداسیون شیمیایی، تصفیهٔ بیولوژیکی، اسمز معکوس، فیلتراسیون و فرایند غشایی [5]، تعویض یونی و هم‌چنین فرایندهای چندمرحله‌ای شامل ازن‌زنی تحت نور UV اشاره کرد [6].

در دههٔ اخیر فرایند اکسیداسیون پیشرفته از اهمیت بسیاری در تصفیهٔ فاضلاب‌های صنعتی برخوردار شده‌است [7]. روش تصفیهٔ اکسیداسیون پیشرفته مبتنی‌بر روش های مختلفی در تولید رادیکال بسیار فعال هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$) می‌باشد که قادر است با سرعتی مناسب طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی را اکسید و به مواد معدنی مانند دی‌اکسید کربن، آب و اسیدهای معدنی تجزیه نماید [8]. برای تصفیه به‌روش فتوکاتالیستی ابتدا نیاز به فتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانایی است که از لحاظ ساختاری به‌صورت نواری باشند [9]. سطوح انرژی را که مربوط به پیوند کوالانسی میان اتم‌ها است نوار ظرفیت و سطح انرژی را که بالاتر قرار گرفته‌است نوار رسانش می‌نامند. حدفاصل بین این دو نوار را شکاف نواری و یا شکاف انرژی می‌نامند که تعیین‌کنندهٔ حساسیت فتوکاتالیست به طول موج تابش در نیمه‌رسانا است. اگر تابش انرژی برابر و یا بیشتر از شکاف نواری در نیمه‌رسانا به آن تابانده شود، باعث تهییج در نیمه‌رسانا خواهد شد که همین امر باعث ارتقای الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش می شود و باعث ایجاد حفره در نوار ظرفیت می‌گردد و از این طریق جفت الکترون- حفره در نیمه‌رسانا شکل می‌گیرد [10]. در تصفیهٔ فتوکاتالیستی استفاده از کاتالیزورهای نیمه‌رسانا، از جمله $TiO_2$ بسیار مرسوم است که تحت تابش نوری با طول موج در حدود ۳۰۰ تا ۳۹۰ نانومتر بیشترین عملکرد خود را داراست. این فتوکاتالیست پس از انجام فعالیت کاتالیزوری که منجر به تخریب آلاینده‌ها می‌شود در محیط باقی می‌ماند [11]. $TiO_2$ به‌دلیل خواص ویژه‌ای از جمله ارزانی قیمت، خواص فتوکاتالیستی، غیرسمی بودن، پایداری بسیار بالا و تسریع در انجام واکنش‌های فتوشیمیایی همانند تولید هیدروژن، بیش از هر مادهٔ دیگری در کاتالیست‌های نوری استفاده می شود. در دی‌اکسید تیتانیم فاصلهٔ تراز انرژی در حدود ۳/۲ الکترون ولت است که با طول موج‌هایی کمتر از ۳۸۰ نانومتر برانگیخته می‌شود [12].

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها برای عملکرد فتوکاتالیست $TiO_2$ مساحت سطحی کم و جذب آن می‌باشد که ضروت تثبیت این ماده بر یک بستر را آشکار می‌سازد [13]. در میان انواع پایه‌های مختلفی که برای تثبیت دی‌اکسید تیتانیم بررسی شده‌است، زئولیت‌ها به‌دلیل ساختار متخلخل، کانال‌های منظم و یکنواخت، ظرفیت جذب بسیار بالا، اندازهٔ حفرات، ساختار مقاوم به تخریب‌های نوری (پایداری فتوشیمیایی)، ظرفیت حرارتی بالا و ساختار سازگار با محیط‌زیست بسیار کارآمد هستند [14,15]. بسیاری از مولکول‌های قابل تخریب و یون‌ها در کانال‌های زئولیت‌ها منتشر می‌شوند و این امر باعث افزایش حذف آلاینده‌ها در فرایند فتوکاتالیستی می‌گردد [16]. زئولیت ZSM-5 باوجود

نانوحفرات منظم، ظرفیت تعویض یونی بسیار بالا، مساحت سطحی زیاد و وجود مقدار قابل توجهی ازسیلیکا در ساختار خود باعث به‌وجود آوردن سطحی آب‌گریز می‌شود که همین ویژگی‌ها می‌تواند آن را به یکی از پرکابردترین پایه کاتالیست‌ها و جاذب‌ها تبدیل نماید [17]. برای به‌دست‌آوردن ساختار بهتری در زئولیت ZSM-5 از لحاظ کاتالیستی برای اکسیداسیون آلاینده‌های آلی تحت تابش UV می‌توان از زئولیت Fe-ZSM-5 استفاده کرد که ساختاری مشابه با ZSM-5 دارد [18]. از دیگر مشکلات استفاده از دی‌اکسید تیتانیم به‌عنوان کاتالیست، بازده عملکردی پایین کوانتوم نوری آن است که از بازترکیب الکترون- حفره ناشی می‌شود. دی‌اکسید تیتانیم به‌دلیل شکاف باندی انرژی زیاد آن در برابر نور مرئی غیرفعال می‌ماند، به همین دلیل استفاده از آن در مقابل نور خورشید کارایی بالایی ندارد، ولی دی‌اکسید تیتانیم در مقابل طیف‌های نوری UV عملکردی بسیار مناسب دارد، ولیکن هزینهٔ بالایی برای انرژی فعال‌سازی لازم دارد که این خود یکی از چالش‌های موجود در صنعت است [19].

برای عملکرد بهتر فرایند فتوکاتالیستی در برابر نور خورشید توسط الکترون‌های به‌دام‌افتاده دی‌اکسید تیتانیم و کمک به انتقال بار سطحی، رسوب فلزات سنتز شده برروی دی‌اکسید تیتانیم بسیار مؤثر می‌باشد [20]. یک روش بسیار متداول برای حساس‌سازی بیشتر دی‌اکسید تیتانیم به نور مرئی از طیف نور خورشید، دوپ کردن یون‌های دیگر با دی‌اکسید تیتانیم می‌باشد [21]. دوپ کردن یک سطح القایی را در شکاف انرژی نیمه‌رسانا تولید می‌کند که این لایه اگر در نزدیکی لبهٔ باندی باشد، می‌تواند با باند هم‌پوشانی داشته باشد و باعث شکاف باندی شود [22]. اصلی‌ترین هدف در دوپ کردن، کاهش فضای خالی با ایجاد یک حالت شکاف درون باندی است، که باعث جذب نور بیشتر خواهد شد.

استفاده از فرایند فتوکاتالیسیت برای تصفیهٔ فاضلاب‌های صنایع نفتی مورد توجه محققان قرار گرفته‌است. Santos و همکاران در سال ۲۰۰۶ فرایند فتوکاتالیست را به‌عنوان مرحلهٔ سوم برای اکسید کردن و معدنی‌سازی آلاینده‌های مقاومی هم‌چون فنل برای پالایشگاه نفت با ظرفیت پالایش ۴۱۰۰۰ مترمکعب در روز که باعث تولید ۱۱۰۰ مترمکعب در ساعت فاضلاب می‌شود، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از دو نوع فتوکاتالیست شامل $TiO_2$، ZnO استفاده شده بود. نتایج نشان داده‌است که در شرایط بهینه، دی‌اکسید تیتانیم عملکرد بهتری نسبت به اکسید روی دارد و مقدار بهینهٔ آن ۳ گرم بر لیتر و pH برابر با ۶/۳ می‌باشد که حذف ۹۳٪ فنل‌ها، ۶۳٪ کربن‌های آلی محلول و بیش از ۵۰٪ روغن و گریس در فرایند فتوکاتالیستی را رقم می‌زند [23]. Chang و همکاران تجزیهٔ فتوکاتالیستی استامینوفن در آب را بااستفاده از مواد $TiO_2$ برپایهٔ زئولیت ZSM-5 که بااستفاده از روش سل-ژل ساخته شده بود بررسی کردند. بهترین غلظت $TiO_2$ بر ZSM-5 بیش از ۴۰ درصد جرمی و غلظت اولیهٔ استامینوفن در حدود ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر بود. نتایج نشان داد که پس از ۱۸۰ دقیقه میزان تجزیه می‌تواند به ٪۹۶/۶ برسد. علاوه‌بر این، مواد کاتالیست بعد از چهار بار احیا و استفادهٔ مجدد موفق به معدنی‌سازی در سطح بالایی در حدود ٪۹۰ بودند [24]. Zainudin و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعاتی روی تخریب فتوکاتالیستی فنل بااستفاده از نانوذرات $TiO_2$ انجام دادند. در تحقیق ایشان از ZSM-5 و سیلیکا ژل به‌عنوان پایه در یک راکتور استفاده شد. نتایج نشان داد که کاهش ۹۰ درصدی غلظت محلول فنل با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر فتوکاتالیست در ۱۸۰ دقیقه حاصل می‌شود [25]. اثر نقره ۱/۵ درصد اتمی دوپ‌شده با $TiO_2$ برای حذف رنگ توسط Sobana و همکاران در سال ۲۰۱۵ بررسی شد. در این مطالعه بااستفاده از لامپ فرابنفش UV با توان ۸ وات با طول موج ۳۶۵ نانومتر در مدت تابش یک ساعت، غلظت بهینهٔ کاتالیست ۳ گرم بر لیتر، غلظت رنگ $1\times10^{-5}$ مول بر لیتر و pH بهینهٔ آزمایش برابر با ۶، میزان حذف رنگ به‌میزان ۹۰ درصد به‌دست آمد [26]. Pan و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ حذف

فاضلاب واقعی حاوی سیانید را بااستفاده از فرایند فتوکاتالیتسی و استفاده از نانو کامپوزیت $TiO_2/ZSM-5$ در درصدهای مختلف $SiO_2/Al_2O_3$ بررسی کردند. نتایج نشان داد که ۹۳/۹۷ درصد از سیانید پس از ۳ ساعت جذب و ٤ ساعت تابش حذف می‌شود [27]. Badvi و Javanbakht در سال ۲۰۲۱ حذف فاضلاب رنگی را بااستفاده از نانو فتوکاتالیست$ZSM-5/TiO_2$ که با درصدهای مختلف نیکل اصلاح شده بود بررسی کردند. بالاترین راندمان حذف در ۰/۵ درصد نیکل و دمای کلسینه کردن ٦۰۰ درجهٔ سلسیوس به‌مقدار ۹۹/۸ درصد گزارش شد [28].

بنا بر مطالعات صورت‌گرفته و برای رفع نقاط ضعف $TiO_2$ به‌عنوان یک مادهٔ صنعتی مرسوم در فرایندهای فتوکاتالیستی، در این تحقیق برای اولین بار نانوفتوکاتالیست $Fe-ZSM-5@TiO_2/Ag$ با کارایی بالا برای حذف آلاینده‌های آلی فاضلاب نفتی سنتز شد. نشاندن Fe بر ساختار فتوکاتالیست باعث استفاده از خاصیت مغناطیسی و اصلاح زئولیت خواهد شد و دوپ کردن نقره با نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیم باعث کاهش شکاف انرژی و در نتیجه ارتقای قابلیت فتوکاتالیست سنتزی نسبت‌به نمونه‌های مشابه خواهد شد. خصوصیات ساختاری فتوکاتالیست با آنالیزهای مختلف XRD، SEM، FTIR و BET ارزیابی و حذف آلاینده‌های آلی در شرایط مختلف با لامپ UV و نور خورشید بررسی و کارایی فتوکاتالیست در چندین بار راهبری ارزیابی شده‌است.

## مواد روش‌ها

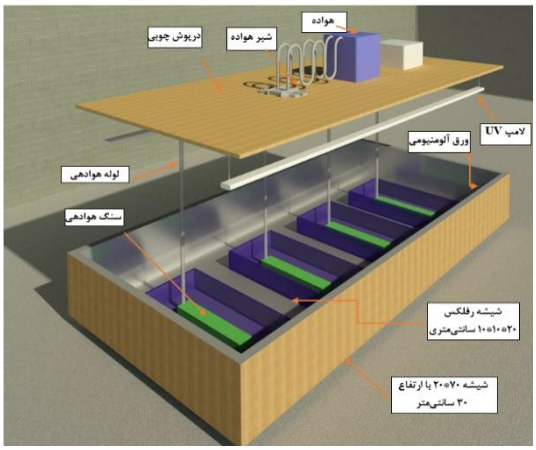
فاضلاب مورد استفاده در این تحقیق از یکی از پالایشگاه‌های نفت در غرب کشور بعد از مرحلهٔ روغن-گیری تهیه و به آزمایشگاه مهندسی محیط زیست دانشگاه خوارزمی به‌منظور تعیین پارامترهای VSS، TDS، TSS ، BOD، COD، pH و تعیین مقدار کدورت منتقل شد. کلیهٔ آنالیزها منطبق‌بر روش‌های استاندارد آب و فاضلاب انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱ ویژگی فاضلاب استفاده‌شده در تحقیق

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| pH | ۷ |
| COD | ٤۱٥۰ $\frac{mg}{l}$ |
| TBOD | ۳۷۲٥ $\frac{mg}{l}$ |
| TS | ۲۲۱٦ $\frac{mg}{l}$ |
| TDS | ۲۱۰۱ $\frac{mg}{l}$ |
| TSS | ۱۱٥ $\frac{mg}{l}$ |
| FSS | ۸۷ $\frac{mg}{l}$ |
| VSS | ۲۸ $\frac{mg}{l}$ |
| چگالی | ۰/۸۳۲ $\frac{gr}{cm^3}$ |
| کدورت | ۱۱۰ NTU |
| هدایت الکتریکی | ۱۳۲۰۰۰ $\frac{\mu s}{cm}$ |

فتوراکتور مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت مکعب‌مستطیل با ارتفاع ۳۰، طول ۷۰ و عرض ۲۰ سانتی-متر بود که اطراف آن به‌منظور بازتاب هرچه بهتر لامپ UV با ورق آلومینیومی پوشیده شده بود. در داخل این راکتور به‌منظور بالا بردن دقت آزمایش و بهبود عملکرد هوادهی از چهار ظرف مکعبی‌شکل از جنس شیشهٔ رفلکس آبی به‌ارتفاع ۱۰، طول ۲۰ و عرض ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد که تصویر شماتیک آن در شکل (۱) ارائه شده‌است. به‌منظور تأمین اکسیژن مورد نیاز برای فرآیند فتوکاتالیستی و هم‌چنین معلق نگه‌داشتن فتوکاتالیست در راکتور، از هواده مولد حباب‌های ریز از کف همراه با کنترل‌کنندهٔ شدت هوادهی به‌مقدار ثابت $۲ \frac{l}{min}$ استفاده شد. برای انجام فرایند فتوکاتالیستی از ۲ لامپ UV-A

(فیلیپس هلند) با توان‌های ۱۸ و ۳۶ وات، شدت تابش ۵/۳۳ و $12/2\ mW/cm^2$ و طول موج در محدودهٔ ۳۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر (پیک ۳۷۰ نانومتر) به‌طول لامپ ۵۸/۹۸ سانتی‌متر و قطر ۲۸ میلی‌متر استفاده گردید. به‌منظور توزیع یکنواخت فتوکاتالیست و مواد فاضلاب، فتوراکتور برروی یک هم‌زن مغناطیسی قرار گرفت.




شکل ۱ تصویر شماتیک فتوراکتور استفاده‌شده در تحقیق

## تهیهٔ نانوفتوکاتالیست Fe-ZSM-5@TiO₂/Ag

برای تهیهٔ نانوفتوکاتالیست به‌ترتیب ژل دانه‌ای، ZSM-5 مستخرج از ژل سنتزی، Fe-ZSM-5 و در نهایت با پوشش دادن تیتانیا و نقره محصول نهایی نانوفتوکاتالیست $Fe\text{-}ZSM\text{-}5@TiO_2/Ag$ تولید شد. برای تهیهٔ ژل دانه‌ای ۰/۱۳۸ گرم سدیم هیدروکسید و ۱/۱۷ گرم تتراپروپیل-آمونیوم‌هیدروکسید در ۷/۱۰۳ گرم آب دو بار تقطیر حل شد و سپس این محلول به‌وسیلهٔ هم‌زن مغناطیسی به یک محلول هم‌گن و کاملا یکنواخت تبدیل شد. سپس درحالی‌که این محلول به‌کمک هم‌زن مغناطیسی هم زده می‌شد به این محلول ۱/۵۸۹ گرم سیلیسیک اسید به‌آرامی اضافه شد تا فرآوردهٔ ژل‌مانندی به‌دست آید. این ژل به‌مدت یک ساعت در دستگاه شیکر با شرایط دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس و سرعت ۲۰۰ rpm هم زده شد. سپس این محلول به‌مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس در آون قرار گرفت تا در پایان به‌صورت یک سوسپانسیون درآید. برای تهیهٔ ژل سنتزی ۰/۸۸ گرم سدیم هیدروکسید و ۱/۰۳ گرم سدیم‌آلومینات در ۸۶/۷۸ گرم آب دو بار تقطیر حل شد و سپس این محلول به‌وسیلهٔ هم‌زن مغناطیسی به یک محلول هم‌گن و کاملا یکنواخت تبدیل شد. سپس درحالی‌که این محلول به‌کمک هم‌زن مغناطیسی هم زده می‌شد به آن ۱۱/۳ گرم سیلیسیلیک‌اسید به‌آرامی اضافه شد تا فرآوردهٔ ژل‌مانندی به‌دست آورده شود. این ژل به‌مدت یک ساعت در دستگاه شیکر با شرایط دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس و سرعت ۲۰۰ rpm هم زده شد و ۵ گرم ژل دانه‌ای به آن اضافه شد و داخل دستگاه شیکر به‌مدت یک ساعت قرار گرفت. این ژل در اتوکلاو فولادی با جدار داخلی تفلون در دمای ۱۸۰ درجهٔ سلسیوس به‌مدت ۴۰ ساعت قرار داده شد و در پایان با کمک دستگاه سانتریفیوژ جداسازی نانوزئولیت ZSM-5 از این ژل انجام گردید و رسوب به‌دست‌آمده چندین بار با آب دو بار تقطیر شستشو داده شد. بعد از شستشو، رسوب به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجهٔ سلسیوس در آون قرار داده شد تا خشک و کلسینه شود. آهن روی زئولیت ZSM-5 به‌روش تبادل یونی، تثبیت شد [۲۹]. ابتدا برای تهیهٔ محلول $FeSO_4.7H_2O$ یک مولار، ۳۰/۵ میلی گرم ماده $FeSO_4.7H_2O$ وزن و در ارلن مایر ریخته شد و ۱۱۰ میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه و حل شد. سپس برای تبدیل ZSM-5 به Fe-ZSM-5 مقدار ۳۰/۵ gr سولفات آهن داخل ارلن ریخته شد و با ۱۱۰ ml آب مخلوط شد تا محلول ۱ مولار آهن به‌دست آید. در ادامه در ارلن ۳۵ گرم زئولیت ZSM-5 ریخته شد و با اسپاتول هم‌زده و با هم مخلوط شد. سپس محلول در محل تاریک به‌مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت تا مواد تثبیت شوند. رسوب به‌دست‌آمده چندین بار با آب دو بار تقطیر شستشو داده شد و در آون با دمای ۱۱۰ درجهٔ سلسیوس به‌مدت ۳ ساعت گذاشته شد تا خشک شود، سپس Fe-ZSM-5 زرد رنگ آماده گردید.

تیتانیا روی زئولیت Fe-ZSM-5 به‌روش هم‌رسوبی

تثبیت داده شد. ابتدا ۳٦ گرم Fe-ZSM-5 داخل بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و مقدار ۳۳ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه گردید و به‌مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد و بعد مقدار ۳/٦ گرم تیتانیم‌دی‌اکسید به آن اضافه شد و به‌مدت ۱۰ دقیقه داخل دستگاه التراسونیک قرار داده شد تا کامل با هم مخلوط شوند. محلول برای خشک شدن به مدت ۳ ساعت داخل آون با دمای ۱۵۰ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد. به‌منظور تثبیت نقره ابتدا فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$ در بشر ۲۵۰ میلی لیتری ریخته شد و مقدار ۲۰ میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه گردید و هم زده شد تا حل شود. سپس مقدار ۲/۵ گرم نیترات نقره به محلول اضافه شد و روی هم‌زن برقی قرار داده شد تا مدت ۲٤ ساعت هم زده شود. بعد از آن‌که محلول مذکور آماده شد، به‌مدت ۳ ساعت زیر تابش مستقیم نورUV (۳۰ وات، UV-C) قرار داده شد و در ادامه به‌مدت ۳ ساعت در آون با دمای ۱۵۰ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد تا خشک شود و سپس با آسیاب بالمیل آزمایشگاهی مواد مذکور آسیاب شدند.

## طراحی آزمایش و بهینه‌سازی فرایند

رویهٔ حذف ترکیبات آلی از فاضلاب پالایشگاه نفت با نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها و به‌روش پاسخ سطحی صورت گرفت. مزیت روش طراحی آزمایش به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌ها و بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر میزان حذف به‌طور هم‌زمان بود. طراحی براساس طرح مرکب مرکزی به‌عنوان زیرمجموعهٔ روش پاسخ سطحی در تحقیق استفاده شد. متغیرهای مورد نظر شامل مقدار غلظت فتوکاتالیست، pH، شدت تابش UV و زمان تابش پرتو UV بود. بااستفاده از طراحی انجام‌شده اثر ترکیبی هر چهار متغیر به‌طور هم‌زمان بر درصد حذف ترکیبات آلی (پاسخ مدل) مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفت. در این تحقیق مقادیر بهینهٔ متغیرهای مستقل در معادلات رگرسیون برای تعیین مقادیر مطلوب متغیرهای وابسته استفاده شدند. هر متغیر مستقل در پنج سطح کدبندی و سطح متغیرهای مستقل در واحدهای کدبندی‌شده براساس تحقیقات گذشته برروی روش پاسخ سطحی مطابق جدول (۲) انتخاب شدند. بهینه‌سازی با هدف تنظیم هم‌زمان تمام عوامل دخیل در راندمان فرایند برای رسیدن به بهترین پاسخ ممکن و راهبردی سیستم در آن شرایط انجام شد. در این تحقیق، تنها پاسخ مورد نظر راندمان حذف COD درنظر گرفته شد و ازاین‌رو هدف بیشینه‌سازی پاسخ یعنی بیشترین میزان راندمان حذف COD انتخاب گردید.

جدول ۲ محدودهٔ آزمایش‌ها و سطوح متغیر

| متغیر | واحد | کد متغیر | سطوح | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $-\alpha$ | −۱ | ۰ | +۱ | $+\alpha$ |
| زمان تابش | دقیقه | $X_1$ | ٦۰ | ۱۲۰ | ۱۸۰ | ۲٤۰ | ۳۰۰ |
| pH | − | $X_2$ | ۳ | ۵ | ۷ | ۹ | ۱۱ |
| غلظت نانوکاتالیست | g/L | $X_3$ | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ۵ |
| شدت تابش | وات | $X_4$ | ۳٦ | | | ۵٤ | |

## روش انجام آزمایش‌ها

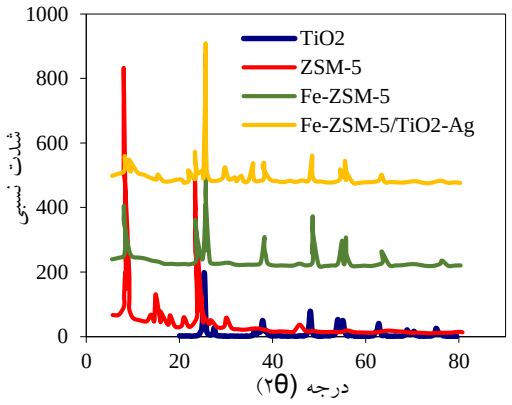
حجم هر یک از راکتورهای مورد استفاده در تحقیق ۰/۳ لیتر بود و مقدار فتوکاتالیست، pH، شدت تابش و زمان تابش پرتو UV در هر آزمایش براساس طراحی آزمایش-ها برای تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه نفت تنظیم شد. در طول همهٔ آزمایش‌های انجام‌شده نمونه‌های ورودی و خروجی سیستم در ویال‌های شیشه‌ای حاوی ۵ml نمونه نگهداری شدند و پس از گذشت یک ساعت بعد از ته‌نشینی فتوکاتالیست و انجام سانتریفوژ، آنالیز شدند. در فاصلهٔ کوتاه قبل از انجام آنالیز نیز برای جلوگیری از تغییر در ترکیب نمونه‌ها آن‌ها را در یخچال با دمای ٤ درجهٔ سلسیوس نگهداری کردند. محلول بالای فتوکاتالیست ته‌نشین‌شده برای آنالیز و بررسی عملکرد تصفیهٔ فاضلاب استفاده شد. کلیهٔ آزمایش‌های فوق در دمای اتاق انجام گرفت. کارایی فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag باتوجه به پارامترهای ذکرشده تحت نور UV بهینه‌سازی شد و میزان درصد حذف به‌دست آمد. سپس فتوکاتالیست‌های Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag و Fe-ZSM-5@$TiO_2$و $TiO_2$ در حالت بهینهٔ تعیین‌شده تحت نور UV بررسی و مقایسه شدند. درنهایت این فتوکاتالیست‌ها در شرایط بهینه تحت نور خورشید نیز به‌منظور حذف مواد آلی مورد بررسی قرار گرفتند. از فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$-Ag در شرایط بهینه پنج بار استفادهٔ مجدد شد تا کارایی مجدد استفاده از فتوکاتالیست به‌دست آید. تعیین ترکیبات میانی آلی موجود در فاضلاب بعد از تخریب فتوکاتالیستی در شرایط بهینه، براساس کروماتوگرافی گازی– طیف‌سنج جرمی (GC – MS) انجام شد.

## نتایج و بحث

### تعیین مشخصات نانوفتوکاتالیست

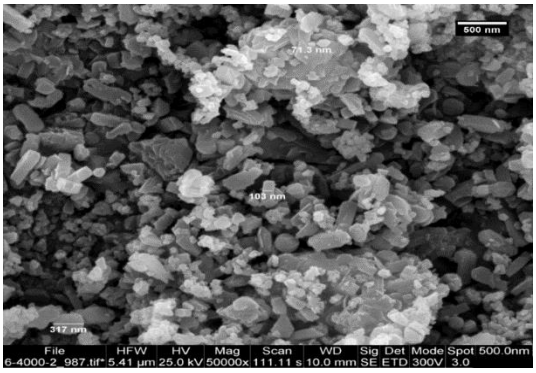
نانوفتوکاتالیست تولیدی به‌وسیلهٔ آنالیزهای مختلف XRD، SEM، FTIR و BET به‌منظور مشخص نمودن ساختار، مساحت سطحی ویژه و اندازهٔ حفره‌ها و هم‌چنین تجزیهٔ کمی، تعیین مقدار و درصد وزنی ترکیبات و تعیین فاصلهٔ سطح انرژی فتوکاتالیست سنتزی، بررسی شد.

به‌منظور حصول اطمینان از تشکیل فاز نانوزئولیت و تشخیص نانوپودرهای سنتزشده از پراش اشعهٔ ایکس (XRD) استفاده شد. در شکل (۲) منحنی‌های XRD سه نمونه ZSM-5، Fe-ZSM-5@$TiO_2$ و Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag با هم مقایسه شده‌است که نشان می‌دهد ترکیبات تولیدشده از خلوص بالایی برخوردار می‌باشند. موقعیت پیک‌های مشخصهٔ زئولیت در حدود ۸/۹۰ و ۸/۰۱ و ۷/۹٤ قرار دارند که مقایسهٔ آن با الگوی نمونهٔ استاندارد، بیانگر آن است که فاز زئولیتی Fe-ZSM-5 با خلوص بالا و بدون تداخل فازی سنتز شده‌است. باتوجه به سنتز Fe-ZSM-5@$TiO_2$ موقعیت پیک مشخصهٔ فاز آناتاز $TiO_2$ در حدود ۲۵/۳۷ درجه می‌باشد، که‌این پیک نشان‌دهندهٔ سنتز کریستال‌های تیتانیم‌دی‌اکسید در ساختار زئولیت و تولید نانوفتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$ می‌باشد. الگوی XRD نمونهٔ Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag دارای پیک‌هایی در زاویه‌های ۳۳ و ۳۷ درجه است که بیانگر وجود نقره در فتوکاتالیست است. هم‌چنین مقایسهٔ آن با الگوی استاندارد، نشان‌دهندهٔ عدم تداخل فازی و سنتز مناسب این فتوکاتالیست است.

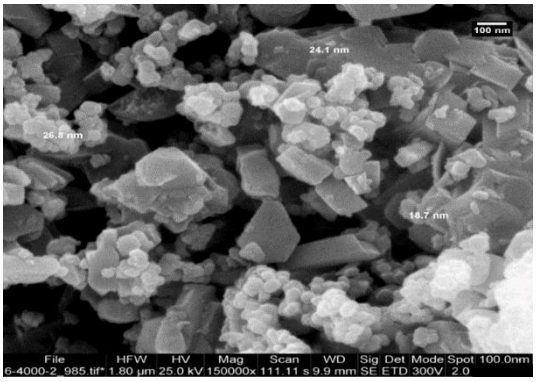



شکل ۲ منحنی‌های XRD سه نمونه ZSM-5 و Fe-ZSM-5@$TiO_2$ و Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag

از میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگ‌نمایی‌های مختلف برای بررسی شکل و ساختار پودرها و تخمین اندازهٔ ذرات استفاده شد. باتوجه به تصاویر به‌دست‌آمده از آزمایش SEM برای فتوکاتالیست سنتزی که در شکل (۳- الف) ارائه شده‌است مشخص است که ذرات $TiO_2$ به‌طور یکنواخت در سطح زئولیت پراکنده شده‌اند و ساختار زئولیت تغییر نکرده‌است. همان‌طور که در شکل (۳- ب) نشان داده شده‌است، ذرات نانونقره در حدود ۱۸ نانومتر و ذرات $TiO_2$ در حدود ۲۵ نانومتر هستند که روی بستر زئولیت به‌صورت یکنواخت پراکنده شده‌است.




(الف)



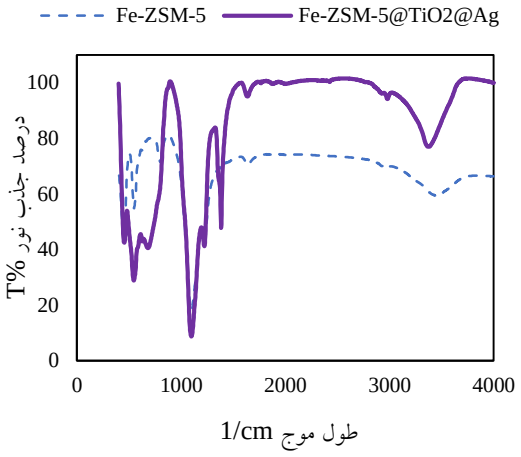

(ب)

شکل ۳ تصاویر SEM از نمونه Fe-ZSM-5@$TiO_2$-Ag (الف) قدرت تفکیک $1\mu m$ (ب) قدرت تفکیک ۵۰۰ nm

از طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای بررسی ساختار، ترکیبات و حصول اطمینان از نوع زئولیت و فتوکاتالیست سنتزشده استفاده شد (شکل ٤). تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه برای شناسایی نوع پیوندهای موجود در یک ترکیب به‌کار می‌رود، که هر نوع گروه پیوندی خاص طول موج خاصی از موج IR را جذب می‌کنند. پیک‌های جذبی که به‌طول موج‌های خاص تعلق دارند، نشان‌دهندهٔ پیوندهای حاضر در نمونه‌های مود نظر هستند. پیک ارتعاشی در ٥٤٧/٤٢ حضور حلقهٔ پنج‌تایی ساختار زئولیت ZSM-5 را تأیید می‌کند، هم‌چنین پیک مربوط به Al-$H_3O_3$ در $\frac{1}{cm}$ ٣٤٦١/٠٦ می‌باشد. در آنالیز آزمایش FT-IR برروی نانوفتوکاتالیست سنتزی Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag، پیک اختصاصی Ti-O در ناحیهٔ $\frac{1}{cm}$ ۹۰۵ تا $\frac{1}{cm}$ ۹٤٥ قرار دارد، هم‌چنین بعد از نشاندن Ag و $TiO_2$ در ساختار زئولیت شدت پیک $\frac{1}{cm}$ ٥٤٧/٤٢ کاهش بسیار محسوسی داشته‌است و این امر نشان‌دهندهٔ آن است که مقدار قابل توجهی از پیوند O-H در ساختار $TiO_2$ تخریب شده و Ag جایگزین آن شده‌است. پیک $\frac{1}{cm}$ ۱۰۹۸/٤٥ را به $C_7$ $H_7$ Ag-$O_3$ -Ti می‌توان نسبت داد. نتایج حاصل از تکنیک FT-IR فتوکاتالیست سنتزی ثابت می‌کند، فتوکاتالیست سنتزشده تنها مخلوطی ساده از ذرات $TiO_2$ و نقره نیست، بلکه با تشکیل پیوند بین فاز آناتاز $TiO_2$ با Ag، فتوکاتالیست سنتزی یک نانوکامپوزیت می‌باشد. بعد از نشاندن $TiO_2$ در ساختار زئولیت پیک در موقعیت $\frac{1}{cm}$ ۳۵۰۰ کاهش یافت و این امر نشان از تخریب پیوندهای سیلانولی در زئولیت و جایگزینی با دی‌اکسیدتیتانیم است. نتایج حاصل از تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه فتوکاتالیست نانوسنتزی ثابت می‌کند، فتوکاتالیست سنتزشده تنها مخلوطی ساده از ذرات $TiO_2$ و Ag و زئولیت نیست، بلکه یک فتوکاتالیست سنتزی نانوکامپوزیت می‌باشد.

بااستفاده از آنالیز BET مشخصات و جزئیات فضای متخلل زئولیت بررسی شد. باتوجه به اطلاعات حاصل از آنالیز BET، سطح ویژهٔ ذرات برابر با ۳۳/۷٦۸ $m^2g^{-1}$ به‌دست آمد. باتوجه به سطح ویژهٔ مناسب می‌توان انتظار

واکنش مناسب در بستر را داشت. مشخصات انجام آزمایش BET در جدول (۲) ارائه شده‌است.



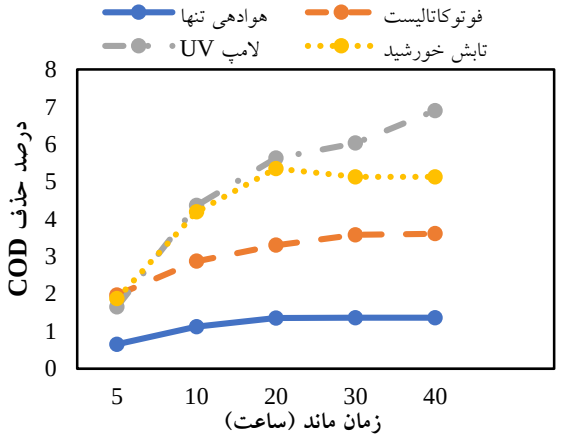

شکل ٤ مقایسهٔ طیف مادون قرمز نمونهٔ Fe-ZSM-5 و Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag

جدول ۲ نتایج آنالیز BET برای نمونهٔ Fe-ZSM-5 و Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag

| پارامتر | Fe-ZSM-5 | Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag |
|---|---|---|
| فضای خالی ($cm^3/g$) | ۱.۱۲ | ۱.۰٦ |
| سطح ویژه ($m^2/g$) | ۳۲/۱۰ | ۳۳/۷٦۸ |
| حجم کل منافذ ($cm^3/g$) | ۰.۰۲۸ | ۰.۰٦۹ |
| قطر متوسط منافذ (nm) | ۲۲.۵۰٦ | ٤۰.٥٦۸ |

## راه‌اندازی اولیهٔ راکتور بدون اجزای فرایند فتوکاتالیستی

برای انجام فرایند فتوکاتالیستی وجود سه عامل اکساینده، فتوکاتالیست و نور با شدت مشخص مورد نیاز است. ازاین‌رو در اولین مرحلهٔ تحقیق تأثیر هر یک از این پارامترها به‌صورت مستقل و ترکیبی و بدون حضور هم‌زمان عوامل فرایند، به‌منظور تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور تصفیهٔ فاضلاب در شرایط حضور UV تنها، هوادهی تنها، فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag بدون حضور لامپ UV و تابش نور خورشید تنها مورد بررسی قرار گرفت تا میزان جذب و فراریت ترکیبات آلی فاضلاب تعیین شود. نتایج مربوط به این شرایط راه‌اندازی در شکل (۵) ارائه شده‌است.




شکل ۵ نتایج آزمایش‌های شاهد

اولین راه‌اندازی سیستم با فتوکاتالیست تنها در تاریکی برای تعیین میزان جذب هیدروکربن‌های نفتی انجام گرفت و در طول ٤۸ ساعت راه‌اندازی سیستم بیشترین راندمان حذف حدود ۳/٦۱ درصد به‌دست آمد. این میزان جذب به‌طور عمده مربوط به فتوکاتالیست و احتمالا مقدار کمی مربوط به جداره‌های شیشه بود. از طرفی چون فتوکاتالیست به‌عنوان یک جاذب آلی شناخته نمی‌گردد می‌توان گفت که جذب تأثیر چندانی بر راندمان نداشته‌است. در مرحلهٔ بعد هوادهی به‌تنهایی مورد بررسی قرار گرفت که میزان تأثیر بر فراریت مواد آلی را نشان می‌دهد، که بیشترین راندمان حذف بعد از مدت ۳۰ ساعت در حدود ۱/۳٦ درصد تعیین شد. فتوراکتور تحت تابش مستقیم آفتاب به‌مدت ٤ روز و هرروز به‌مدت ۱۰ ساعت از ساعت ۱۸-۸ در اردیبهشت ماه قرار گرفت که نشان می‌دهد بیشترین حذف مواد آلی بعد از ۳۰ ساعت می‌باشد که در حدود ۵/۱۳ درصد حاصل شد. هم‌چنین فتوراکتور تحت تابش لامپ UVA قرار گرفت و بیشترین

فراریت مواد آلی در حدود ٦/٩ درصد بعد از گذشت ٤٠ ساعت به‌دست آمد.

## اثر برهم کنش متغیرها در راندمان حذف

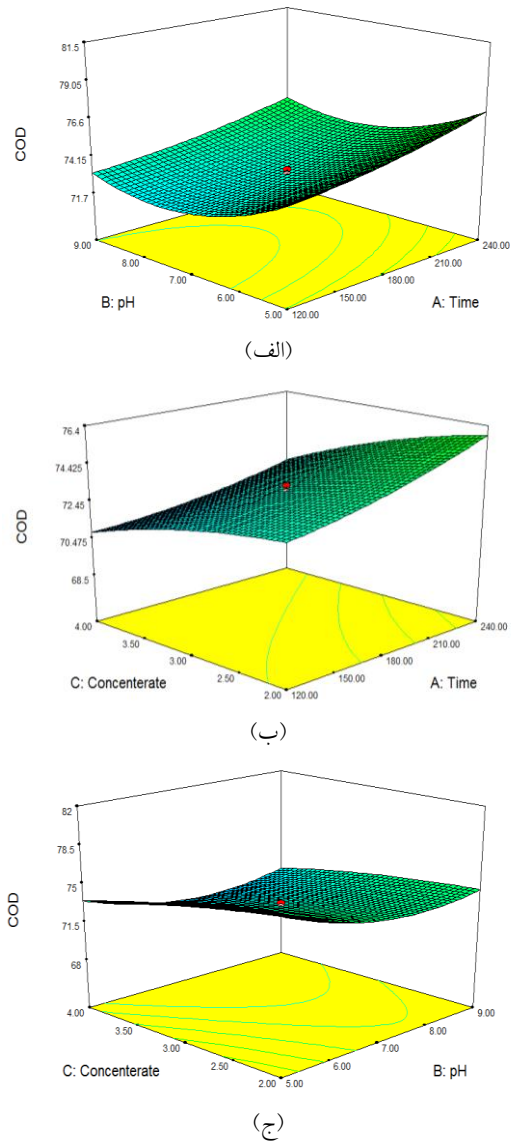
نتایج حاصل از تصفیهٔ فاضلاب پالایشگاه نفت بااستفاده از نانوفتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag در شرایط مختلف در شکل (٦) نشان داده شده است. اثر متقابل زمان ماند و pH نشان می‌دهد که اثر pH مؤثرتر از زمان ماند واکنش در حذف مواد آلی از فاضلاب بوده‌است. اثر متقابل زمان ماند و غلظت فتوکاتالیست سنتزی نشان از مؤثر بودن غلظت فتوکاتالیست می‌باشد. هم‌چنین تأثیر دو متغیر غلظت نانوفتوکاتالیست سنتزی و pH به‌صورت هم‌زمان نشان از مؤثر بودن pH بوده‌است.

معادلهٔ نهایی برای حذف COD فاضلاب پالایشگاه نفت به‌روش فتوکاتالیست مطابق رابطهٔ (١) است که در این معادله مقادیر $X_1$ تا $X_4$ مشابه موارد تعریف شده در جدول (٢) می‌باشد.

$$\begin{aligned} COD = {} & +94.96 + 1.47 \times X_1 - 0.75 \times X_2 - \\ & 1.35 \times X_3 + 1.84 \times X_4 - 0.084 \times X_1X_2 - \\ & 0.30 \times X_1X_3 + 0.36 \times X_1X_4 + \\ & 0.30 \times X_2X_3 + 0.16 \times X_2X_4 + \\ & 0.090 \times X_3X_4 + 0.32{X_1}^2 + 1.56{X_2}^2 - \\ & 0.35{X_3}^2 \end{aligned} \quad (١)$$

نتایج نشان داد که مقادیر بهینهٔ شرایط بهره‌برداری برای رسیدن به بالاترین راندمان حذف شامل pH برابر ٥، غلظت نانوفتوکاتالیست معادل ٢ گرم در لیتر، مدت زمان تابش ٢٤٠ دقیقه و شدت تابش نیز ٥٤ وات می‌باشد.

به‌منظور تعیین تأثیر هر یک از پارامترها در راندمان سیستم، تحلیل واریانس انجام شد. هدف از این تحلیل به‌دست آوردن نسبت واریانس هر فاکتور نسبت‌به واریانس کل می‌باشد. درصد تأثیر عوامل مختلف بر حذف COD فاضلاب در فرایند فتوکاتالیستی در محدودهٔ سطوح درنظر گرفته شده نشان داد که تأثیرگذارترین عوامل به ترتیب pH به میزان ٣٥ درصد، میزان غلظت فتوکاتالیست ٢٠ درصد و شدت تابش ١٥ درصد بود.

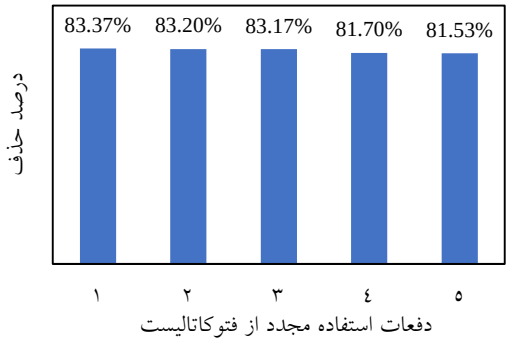



شکل ٦ نمودارهای رویه‌ای پاسخ‌ها بعد از تصفیهٔ فتوکاتالیستی (الف) اثر متقابل زمان و pH بر درصد حذف ترکیبات آلی، (ب) اثر متقابل زمان و غلظت فتوکاتالیست بر درصد حذف ترکیبات آلی، (ج) اثر متقابل pH و غلظت فتوکاتالیست بر درصد حذف ترکیبات آلی

## پایداری و قابلیت استفادهٔ مجدد از فتوکاتالیست

یکی از شاخصه‌های مهم برای ساخت انواع نانوکامپوزیت‌ها، میزان کارایی نانوکامپوزیت در استفادهٔ

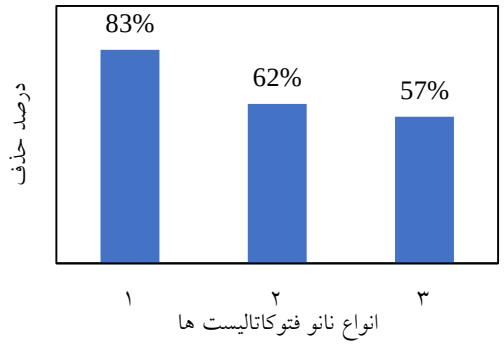
مجدد می‌باشد. قابلیت استفادهٔ مجدد از نانوفتوکاتالیست سنتزی Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag برای تخریب آلایندهٔ آلی فاضلاب پالایشگاه نفت تحت شرایط بهینه (زمان ماند ۲٤۰ دقیقه، غلظت فتوکاتالیست ۲ گرم در لیتر، شدت تابش ٥٤ وات و pH=٥) مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده‌است بعد از پنج بار استفاده از فتوکاتالیست کاهش چشم‌گیری در راندمان حذف مشاهده نشد. در این تحقیق پس از یک‌بار استفاده از فتوکاتالیست و حذف مواد آلی، فتوکاتالیست جداسازی شد و برای مرحلهٔ بعد مورد استفاده قرار گرفت. باتوجه به عدم کاهش راندمان حذف در استفاده‌های مجدد از نانو فتوکاتالیست، این نتیجه حاصل می‌شود که جداسازی نانوذرات از فاضلاب تصفیه‌شده به‌خوبی صورت گرفته و جرم فتوکاتالیست در محلول کاهش نیافته‌است. از طرف دیگر میزان باقی ماندن آلاینده بر سطح فتوکاتالیست نیز ناچیز بوده‌است. در سایر تحقیقات نیز Badvi و Jahanbakht با احیای مجدد فتوکاتالیست تغییرات جزئی در راندمان حذف را گزارش کردند و نشان دادند که ساختار فتوکاتالیست بعد از احیا و استفادهٔ مجدد تغییر چندانی ندارد [28].




شکل ۷ در شرایط بهینه Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag قابلیت استفادهٔ مجدد از فتوکاتالیست

## مقایسهٔ فعالیت فتوکاتالیست‌ها تحت تابش لامپ UV

آزمایش‌هایی به‌منظور فعالیت فتوکاتالیستی Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag برای حذف COD پساب پالایشگاه نفت و مقایسه با فتوکاتالیست‌های $TiO_2$ و $TiO_2$-Ag در شرایط بهینه (زمان ماند ۲٤۰ دقیقه، غلظت فتوکاتالیست ۲ گرم در لیتر، شدت تابش ٥٤ وات و pH=٥) انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۸) ارائه شده‌است. نتایج نشان داد که فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag بیشترین درصد حذف را در حدود ۸۳ درصد داشته‌است. همچنین درصد حذف $TiO_2$-Ag و $TiO_2$ به‌ترتیب برابر ٦۲ درصد و ٥۷ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که اولا اضافه کردن ZSM-5 به ساختار فتوکاتایست تأثیر به‌سزایی بر ارتقای عمکرد فرایند فتوکاتالیستی خواهد داشت. ثانیا دوپ کردن فلز نقره در ساختار تیتانیم‌دی‌اکسید و نشاندن فتوکاتالیست روی پایهٔ زئولیتی که به‌عنوان تله برای الکترون و ایجاد حفره در تیتانیم‌دی‌اکسید است، باعث افزایش عملکرد نوری فتوکاتالیست شده‌است.




شکل ۸ مقایسهٔ انواع فتوکاتالیست‌ها (۱)Fe-ZSM-5@$TiO_2$-Ag (۲)$TiO_2$-Ag (۳)$TiO_2$

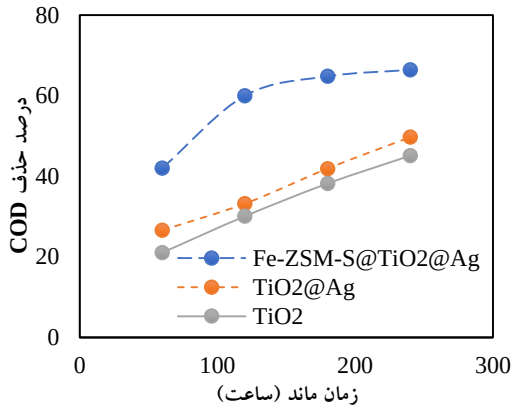
## مقایسهٔ فعالیت فتوکاتالیست‌ها تحت تابش نور خورشید

به‌منظور بررسی توانایی حذف فتوکاتالیستی ترکیبات آلی فاضلاب پالایشگاهی تحت نور خورشید، آزمایشی با شرایط فرایندی بهینه (زمان ماند ۲٤۰ دقیقه، غلظت فتوکاتالیست ۲ گرم در لیتر و pH=٥) تحت نور خورشید در اردیبهشت‌ماه بین ساعت ۹–۱۷ انجام شد. برای استفاده از خاصیت تصفیه به‌کمک نور خورشید، راکتور

در محوطهٔ باز دانشگاه خوارزمی در مرکز شهر تهران و با ارتفاع m ۱۸۰۰از سطح دریا مستقر شد. شدت تابش متوسط در یک روز بهاری به‌میزان متوسط $۱۸/۲۶\ w/m^2$ تعیین شد. برای نرمال کردن تغییرات شدت تابش در طول زمان راه‌اندازی فتوراکتور از زمان تابش معادل استفاده گردید. باتوجه به این‌که مقدار تابش در بیرون و درون راکتور در حالت استفاده از نور خورشید، به‌واسطهٔ وجود پوشش شیشه‌ای در راکتور متفاوت بود بنابراین میزان درصد عبوری نور مطابق رابطهٔ (۲) تعیین گردید.

$$T = \frac{I_s}{I_I} \qquad (۲)$$

که در این روابط $I_s$ و $I_I$ به‌ترتیب شدت تابش اندازه‌گیری شده داخل و بیرون فتوراکتور است. T متوسط ضریب عبور نور از پوشش راکتور است که مقدار آن برای نور UV-A و مرئی خورشید، طی راه‌اندازی یک روزهٔ سیستم در بهار از ساعت ۹ صبح تا ۵ بعدازظهر به‌مدت ۸ ساعت به‌طور متوسط معادل ۵ ساعت تابش لامپ UV با شدت تابش ثابت $۳۰\ w/m^2$ بود. در شکل (۹) مقایسه بین فعالیت فتوکاتالیستی Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag با $TiO_2$ و $TiO_2$-Ag تحت تابش خورشید انجام شد. نتایج نشان داد که فتوکاتالیست Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag بیشترین درصد حذف در حدود ٦٦/٤ درصد را داراست، هم‌چنین درصد حذف $TiO_2$-Ag و $TiO_2$ به‌ترتیب برابر ٤٩/٧ درصد و ٤٥/١ درصد است. نتایج تحقیقات Delnavaz و همکاران در سال ۲۰۱۵ نیز نشان داد در شرایطی که از $TiO_2$ به‌عنوان فتوکاتالیست استفاده شود راندمان حذف در شرایط نور طبیعی خورشید در مقایسه با لامپ‌های UVC و UVA به‌ترتیب به‌میزان ۷۰ و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد [30]. باتوجه به اصلاحاتی که در تحقیق حاضر در نوع فتوکاتالیست با دوپ کردن نانوذرات صورت گرفته‌است مشاهده می‌شود که اختلاف در راندمان حذف در شرایط استفاده از لامپ UV و یا نور خورشید به‌میزان حدود ۱۵ درصد کاهش یافته‌است که بسیار کمتر از شرایط $TiO_2$ خالص می‌باشد.




شکل ۹ مقایسهٔ فعالیت فتوکاتالیستی Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag با $TiO_2$ و $TiO_2$-Ag تحت تابش خورشید

## بررسی ترکیبات میانی حین تصفیهٔ فتوکاتالیستی

به‌منظور شناسایی ترکیبات میانی آلی در حین انجام فرایند فتوکاتالیستی فاضلاب پالایشگاه نفت از آزمایش GC-Mass استفاده شد. نتایج بیانگر آن است که راکتور فتوکاتالیستی توانایی حذف پیک‌های محسوسی از ترکیبات ساختار را داراست. به عبارتی حذف بخش از ترکیبات آروماتیک صورت گرفته ولی به‌دلیل تنوع ترکیبات موجود در فاضلاب‌های نفتی، حذف اسیدهای چرب و ترکیبات آلیفاتیک را که در ساختار فاضلاب است، به‌دلیل ساختار قوی و پیچیده‌تر، نداشته‌است. در این راستا مطابق نتایج به‌دست‌آمده از عمدهٔ ترکیبات تولیدشده در حین فرایند، ترکیبات اولیک اسید ($C_{18}H_{34}O_2$)، هپتادین ($C_{11}H_{22}O_2$)، اتانول ($C_6H_{14}O_2$)، استیک اسید ($C_6H_{12}O_2$)، اتیل بنزن($C_8H_{10}$) و بنزن ($C_9H_{12}$) می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق نانوفتوکاتالیست جدید Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag برای حذف آلاینده‌های آلی فاضلاب نفتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش SEM پوشش نسبتا یکنواخت نانوذرات بر سطح زئولیت را نشان داد و با آنالیز BET نانوذره بودن فتوکاتالیست ثابت شد.

به‌منظور حصول اطمینان از سنتز تیتانیم‌دی‌اکسید و نقره روی زئولیت و نداشتن تداخل فازی باهم از آنالیز XRD استفاده شد و نتایج با الگوی استاندارد مقایسه شد. برای شناسایی ساختار فتوکاتالیست و پیوندهای موجود در آن از آنالیز FT-IR استفاده شد که نشان از سنتز نانوفتوکاتالیست با پیوندهای شیمیایی داشت. نتایج اولیهٔ راه‌اندازی فتوراکتور نشان داد زمانی که هر سه عامل اصلی فرایند فتوکاتالیستی به‌طور هم‌زمان نباشند، راندمان حذف بسیار پائین است. هم‌چنین میزان جذب آلاینده با نانوفتوکاتالیست سنتزی و فرایند عریان‌سازی به‌وسیلهٔ هوادهی تأثیر ناچیزی بر راندمان داشت. بررسی تأثیر pH در راندمان سیستم در محدودهٔ ۳ تا ۱۱ نشان داد که در pH حدود پنج راندمان حذف به بالاترین میزان خود رسید. غلظت فتوکاتالیست بین ۱ تا ۵ گرم در لیتر در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت که مقدار بهینهٔ ۲ گرم بر لیتر مشخص گردید. راندمان حذف سیستم در راکتور تحت تابش لامپ با Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag در شرایط بهینه طی سه مرحله انجام شد که بالاترین حذف آن ۸۳ درصد بود. راندمان حذف سیستم در راکتور تحت تابش خورشید با Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag در شرایط بهینه طی سه مرحله انجام شد که بالاترین حذف آن ٦٦/٤ درصد بود. با تکرار آزمایش‌ها به تعداد پنج مرتبه در حالت بهینه، کاهش راندمان چشم‌گیر نبود، که حاکی از پایداری نانوفتوکاتالیست سنتزی است.

## مراجع


1. Diya'uddeen, B. H., Daud, W. M. A.W. and Abdul Aziz, A. R., "Treatment Technologies for Petroleum Refinery Effluents: A Review", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 2, pp. 95-105, (2011).
2. Wake, H., "Oil Refineries: A Review of their Ecological Impacts on the Aquatic Environment", Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, Vol. 1, pp. 131-140, (2005).
3. Saien, J. and Shahrezaei, F., "Organic Pollutants Removal from Petroleum Refinery Wastewater with Nanotitania Photocatalyst and UV Light Emission", *International Journal of Photoenergy*, Vol. (2012), pp. 703074, (2012).
4. Demırcı, Ş., ErdoĞan, B. and Özcımder, R., "Wastewater Treatment at the Petroleum Refinery, Kirikkale, Turkey using some coagulants and Turkish Clays as Coagulant Aids", *Water Research*, Vol. 11, pp. 3495-3499, (1998).
5. Abdelwahab, O., Amin, N. K. and El-Ashtoukhy, E. S. Z., "Electrochemical Removal of Phenol from Oil Refinery Wastewater", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 2, pp. 711-716, (2009).
6. Maleki, A., Mahvi, A. and Shahmoradi ,B., "Hydroxyl Radical-Based Processes for Decolourization of Direct Blue 71: A Comparative Study", *Asian Journal of Chemistry*, Vol. 23, pp. 4411-4415, (2011).
7. Padmanabhan, P.V.A., Sreekumar, K.P., Thiyagarajan, T.K., Satpute, R.U., Bhanumurthy, K., Sengupta ,P., Dey, G. K. and Warrier, K. G. K., "Nano-crystalline Titanium Dioxide Formed by Reactive Plasma Synthesis", *Vacuum*, Vol. 11, pp. 1252-1255, (2006).
8. Alaton, I. A., Balcioglu, I. A. and Bahnemann, D. W., "Advanced Oxidation of a Reactive Dyebath Effluent :Comparison of $O_3$, $H_2O_2$/UV-C and $TiO_2$/UV-A Processes", *Water Research*, Vol. 5, pp.

1143-1154, (2002).

9. Martin, C., Martin, I., Rives, V., Solana, G., Loddo, V., Palmisano, L. and Sclafani, A., "Physicochemical Characterization of $WO_3/ZrO_2$ and $WO_3/Nb_2O_5$ Catalysts and their Photoactivity for 4-nitrophenol Photooxidation in Aqueous Dispersion", *Journal of Materials Science,* Vol. 22, pp. 6039-6047, (1997).
10. Furube, A., Asahi, T., Masuhara, H., Yamashita, H and Anpo, M., "Charge Carrier Dynamics of Standard $TiO_2$ Catalysts Revealed by Femtosecond Diffuse Reflectance Spectroscopy", *The Journal of Physical Chemistry B,* Vol. 16, pp. 3120-3127, (1999).
11. Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M.I., Blanco, J. and Gernjak, W., "Decontamination and Disinfection of Water by Solar Photocatalysis: Recent Overview and Trends", *Catalysis Today,* Vol. 1, pp. 1-59, (2009).
12. Kwon, C. H., Shin, H., Kim, J. H., Choi, W. S. and Yoon, K. H., "Degradation of Mmethylene Blue Via Photocatalysis of Titanium Dioxide", *Materials Chemistry and Physics,* Vol. 1, pp. 78-82, (2004).
13. Poulios, I. and Tsachpinis, I., "Photodegradation of the Textile Dye Reactive Black 5 in the Presence of Semiconducting Oxides", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology,* Vol. 4, pp. 349-357, (1999).
14. Noorjahan, M., Durga Kumari, V., Subrahmanyam, M. and Boule, P., "A Novel and Efficient Photocatalyst: $TiO_2$-HZSM-5 Combinate Thin Film", *Applied Catalysis B: Environmental,* Vol. 3, pp. 209-213, (2004).
15. Li, F., Sun, S., Jiang, Y., Xia, M ,.Sun, M. and Xue, B., "Photodegradation of an Azo Dye Using Immobilized Nanoparticles of $TiO_2$ Supported by Natural Porous Mineral", *Journal of Hazardous Materials,* Vol. 3, pp. 1037-1044, (2008).
16. Durgakumari, V., Subrahmanyam, M., Subba, K., Ratnamala ,A., Mohammed, N. and Tanaka, K., "An Easy and Efficient Use of $TiO_2$ Supported HZSM-5 and $TiO_2$+HZSM-5 Zeolite Combinate in the Photodegradation of Aqueous Phenol and P-chlorophenol* 1", *Applied Catalysis A: General,* Vol. 1-2, pp. 155-165, (2002).
17. Vempati, R. K., Borade, R., Hegde, R. S. and Komarneni, S., "Template Free ZSM-5 from Siliceous Rice Hull Ash with Varying C Contents", *Microporous and Mesoporous Materials,* Vol. 1, pp. 134-140, (2006).
18. Yan, G., Long, J., Wang, X., Li, Z. and Fu, X., "Photoactive Sites in cCommercial HZSM-5 Zeolite with Iron Impurities: An UV Raman Study", *Comptes Rendus Chimie,* Vol. 1, pp. 114-119, (2008).
19. Park, H., Park, Y., Kim, W. and Choi, W., "Surface Modification of $TiO_2$ Photocatalyst for Environmental Applications", *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews,* Vol. 15, pp. 1-20, (2013).

20. Seery, M. K., George, R., Floris, P. and Pillai, S. C., "Silver Doped Titanium Dioxide Nanomaterials for Enhanced Visible Light Photocatalysis", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry,* Vol. 2, pp. 258-263, (2007).
21. Fujishima, A., Zhang, X. and Tryk, D.A., "$TiO_2$ Photocatalysis and Related Surface Phenomena", *Surface Science Reports,* Vol. 12, pp. 515-582, (2008).
22. Rehman, S., Ullah, R., Butt ,A.M. and Gohar, N.D., "Strategies of Making $TiO_2$ and ZnO Visible Light Active", *Journal of Hazardous Materials,* Vol. 2, pp. 560-569, (2009).
23. Santos, F., Azevedo, E., Jr, G. and Dezotti, M., "Photocatalysis as a Tertiary Treatment for Petroleum Refinery Wastewaters", *Brazilian Journal of Chemical Engineering,* Vol. 23, pp. 451-460, (2006).
24. Chang, C.-T., Wang, J.J., Ouyang, T., Zhang, Q. and Jing, Y.H., "Photocatalytic Degradation of Acetaminophen in Aqueous Solutions by $TiO_2$/ZSM-5 Zeolite with Low Energy Irradiation", *Materials Science and Engineering: B,* Vol. 196, pp. 53-60, (2015).
25. Zainudin, N. F., Abdullah, A. Z. and Mohamed, A., "Characteristics of Supported Nano-$TiO_2$/ZSM-5/silica Gel (SNTZS): Photocatalytic Degradation of Phenol", *Journal of hazardous materials,* Vol. 1, pp. 299-306, (2009).
26. Sobana, N., Subash, B. and Swaminathan, M., "Effect of Operational Parameters on Photodegradation of Direct Blue 53 by Silver Loaded-titania under Ultraviolet and Solar Illumination", *Materials Science in Semiconductor Processing,* Vol. 36, pp. 149-155, (2015).
27. Pan, Y., Zhang, Y., Huang, Y., Jia, Y., Chen, L. and Cui, H., "Synergistic Effect of Adsorptive Photocatalytic Oxidation and Degradation Mechanism of Cyanides and Cu/Zn Complexes over $TiO_2$/ZSM-5 in Real Wastewater", *Journal of Hazardous Materials,* Vol. 416, pp. 125802, (2021).
28. Badvi, K. and Javanbakht, V., "Enhanced Photocatalytic Degradation of Dye Contaminants with $TiO_2$ Immobilized on ZSM-5 Zeolite Modified with Nickel Nanoparticles", *Journal of Cleaner Production,* Vol. 280, pp. 124518, (2021).
29. Wang, C., Shi, H. and Li, Y., "Synthesis and Characteristics of Natural Zeolite Supported $Fe^{3+}$-$TiO_2$ Photocatalysts", *Applied Surface Science,* Vol. 15, pp. 6873-6877, (2011).
30. Delnavaz, M., Ayati, B., Ganjidoust, H. and Sanjabi, S., "Application of Concrete Surfaces as Novel Substrate for Immobilization of $TiO_2$ Nano Powder in Photocatalytic Treatment of Phenolic Water", *Journal of environmental health science & engineering,* Vol. 13, pp. 58, (2015).

31.

# مطالعهٔ آزمایشگاهی تعادل نیروها و اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار*

**پژوهشی**

مصطفی دولتی مهتاج[۱] بهرام رضائی[۲]

**چکیده** *در کانال‌های مرکب غیرمنشوری به‌دلیل تبادل جرم و اندازه حرکت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال نسبت‌به کانال‌های مرکب منشوری بیشتر است. درنتیجه در این کانال‌ها مطالعهٔ تنش برشی ظاهری ایجاد شده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها پیچیده‌تر است. در پژوهش حاضر توزیع سرعت و تنش برشی در مقاطع مختلف و در طول ناحیهٔ اریب کانال مرکب به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و معادلات اندازه حرکت، اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها برای دو زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و در سه عمق نسبی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ انجام شده‌است. بررسی‌ها نشان‌دهندهٔ آن است که اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا عموما بیشتر از اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است. هم‌چنین شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها سبب افزایش مقدار نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده‌است.*

**واژه‌های کلیدی** اندرکنش جریان، تعادل نیروها، کانال مرکب مورب، سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار، نیروی برشی ظاهری.

# Experimental Study of Force Balance and Interaction between Flow in the Main Channel and on the Floodplains in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains

M. Dolati Mahtaj B. Rezaei

**Abstract** *In non-prismatic compound channels due to the mass and momentum exchange between the main channel and floodplains, the flow interaction between channel sub-sections is higher than prismatic compound channels. As a result, in this form of channels, the study of apparent shear forces create at the vertical interface between the main channel and floodplains are much more complex. In the present research, the velocity and boundary shear stress distributions were measured at different sections along the skew part of the flume. Also using the experimental data and the momentum equations the flow interaction between the main channel and floodplains have been investigated. Measurements have been performed for two skew angles of 11.31 and 3.81 degrees and three relative depths of 0.2, 0.3 and 0.4. Investigations indicate that the flow interaction between the main channel and the converging floodplain is generally greater than the flow interaction between the main channel and the diverging floodplain. Also, the side slope of the floodplains, has increased the amount of apparent shear force at the interface between the main channel and floodplains.*

**Key Word** Flow interaction, Force balance, Skewed compound channel, Inclined floodplains, Apparent shear force.

* تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۰/۳/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۲۰ و از صفحه ۸۷ تا ۱۰۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.

**Email**: b.rezaei@basu.ac.ir

**مقدمه**

یکی از مباحث مهم در مهندسی رودخانه، شناخت ویژگی‌ها و خصوصیات جریان‌های سیلابی است که برای این منظور می‌توان از نتایج مطالعات انجام‌شده بر روی کانال‌های مرکب بهره برد. کانال‌های مرکب از یک کانال اصلی عمیق در وسط و یک یا دو سیلاب‌دشت با عمق جریان کمتر در اطراف آن تشکیل می‌شوند. در رودخانه‌ها در حالت عادی و غیرسیلابی جریان در کانال اصلی برقرار است لیکن در هنگام وقوع سیلاب، باتوجه به افزایش تراز سطح آب، جریان مازاد بر ظرفیت مقطع اصلی رودخانه وارد سیلاب‌دشت‌های اطراف آن می‌شود. در کانال‌های مرکب باتوجه به کمتر بودن سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها نسبت‌به کانال اصلی، یک لایهٔ برشی در فصل مشترک بین آنها ایجاد می‌شود که باعث کاهش ظرفیت انتقال کل مقطع کانال می‌شود [1] و هم‌چنین سبب ایجاد جریان‌های ثانویهٔ مارپیچی در جهت جریان و گردابه‌هایی در جهت قائم می‌شود [2].

شکل مقطع عرضی و مسیر حرکت رودخانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل گوناگونی نظیر توپوگرافی محل، نوع خاک بستر و هم‌چنین میزان حمل رسوب قرار دارد. باتوجه به این موضوع در طبیعت اغلب رودخانه‌ها دارای مقطع مرکب غیرمنشوری هستند. یکی از انواع کانال‌های مرکب غیرمنشوری، کانال‌های مرکب مورب می‌باشند. این نوع از کانال‌های مرکب غیرمنشوری به دو گروه کلی کانال‌های مرکب با مقطع اصلی مورب و کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب تقسیم می‌شوند [3].

جیمز و براون [4] نخستین محققانی بودند که جریان در کانال‌های مرکب با کانال اصلی مورب را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنان دریافتند که جریان در سیلاب‌دشت دریافت‌کنندهٔ جریان (واگرا) سرعت می‌گیرد لیکن سرعت جریان در سیلاب‌دشت همگرا کاهش می‌یابد. هم‌چنین آنان بیان نمودند که با افزایش زاویهٔ اریب کانال اصلی، مقاومت جریان در کل مقطع عرضی کانال افزایش می‌یابد. جاسم [5] و اروین و جاسم [6] ویژگی‌های جریان در کانال مرکب با مقطع اصلی مورب را بررسی کردند. آنان دریافتند که در کانال مرکب با مقطع اصلی مورب، جریان عبوری از روی کانال اصلی تحت تأثیر جریان سریع جاری در آن، در جهت اریب کانال اصلی منحرف می‌شود. آنان بیان نمودند که این میزان انحراف به عمق نسبی جریان و زبری بستر سیلاب‌دشت‌ها بستگی دارد به‌نحوی که با کاهش عمق نسبی جریان و یا با افزایش زبری سیلاب‌دشت‌ها، میزان انحراف جریان بیشتر می‌شود.

نوع دیگر کانال‌های مرکب مورب، کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب هستند. در این نوع کانال مرکب، یکی از سیلاب‌دشت‌ها به‌صورت همگرا و دیگری به‌شکل واگرا است. در طول ناحیهٔ اریب کانال، جریان به‌تدریج سیلاب‌دشت همگرا را ترک می‌کند و در طرف مقابل جریان به‌تدریج وارد سیلاب‌دشت واگرا می‌شود [7]. الیوت و سلین [8] و سلین [9] خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را مطالعه کردند. آنان بیان نمودند که اریب بودن سیلاب‌دشت‌ها سبب کاهش ظرفیت انتقال جریان در کانال می‌شود به‌نحوی‌که در یک عمق جریان یکسان، میزان دبی عبوری از کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب نسبت‌به کانال‌های مرکب مستقیم (منشوری) با همان سطح مقطع، کمتر است. سیف و رضائی [10] اثر زاویهٔ اریب در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب بر اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها را به‌صورت عددی بررسی کردند. آنان برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی خود از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط الیوت [11] و الیوت و سلین [8] استفاده کردند. آنان هم‌چنین بیان نمودند که افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها سبب افزایش نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده‌است که به‌معنی افزایش اندرکنش

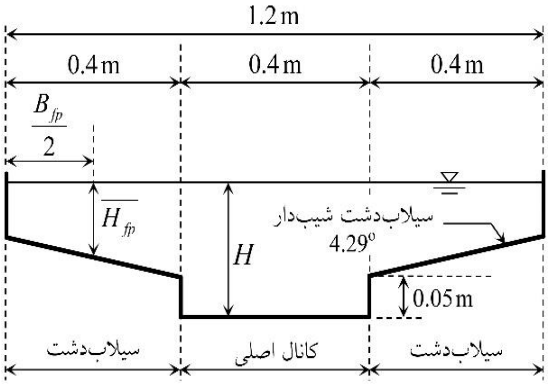
میان آنها است. چلبک [3] با بررسی مجدد نتایج حاصل از مطالعات الیوت [11]، بیان نمود که بیشترین سرعت متوسط در عمق در نزدیکی دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا قرار دارد و مقدار آن می‌تواند تا ۱/٦ برابر سرعت متوسط جریان در کانال نیز باشد. هم‌چنین او دریافت که محل بیشترین مقدار تنش برشی مرزی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است و مقدار آن می‌تواند تا ۲/۵ برابر تنش برشی متوسط کانال نیز برسد. چلبک [3] هم‌چنین با انجام آزمایش‌هایی برروی کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب، مشاهده نمود که شرایط جریان در این نوع کانال مرکب به‌صورت غیریکنواخت است و تغییرات درصد دبی عبوری از هر یک از زیربخش‌های کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب (شامل سیلاب‌دشت همگرا، کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا) در طول ناحیهٔ اریب به‌صورت خطی است. چلبک و همکاران [12] جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب، همگرا و واگرا را با یکدیگر مقایسه کردند و افت انرژی به‌وجودآمده را بررسی نمودند. بوزمار و همکاران [13] با تأیید نتایج حاصل از مطالعات چلبک [3]، اثر زبر بودن بستر سیلاب‌دشت‌ها برروی ویژگی‌های جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را بررسی کردند.

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققان پیشین نشان‌دهندهٔ آن است که تاکنون اثر شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها در کانال‌های مرکب مورب بر میدان جریان و اندرکنش جریان بین سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی مورد بررسی قرار نگرفته‌است. در این پژوهش سعی بر این است که با بررسی آزمایشگاهی میدان جریان در کانال‌های مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار و با تعیین نیروهای تأثیرگذار در آن‌ها، اندرکنش جریان بین زیربخش‌ها در این نوع کانال مرکب مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش آزمایش‌ها برای دو زاویهٔ اریب و سه عمق نسبی مختلف انجام شده‌است.

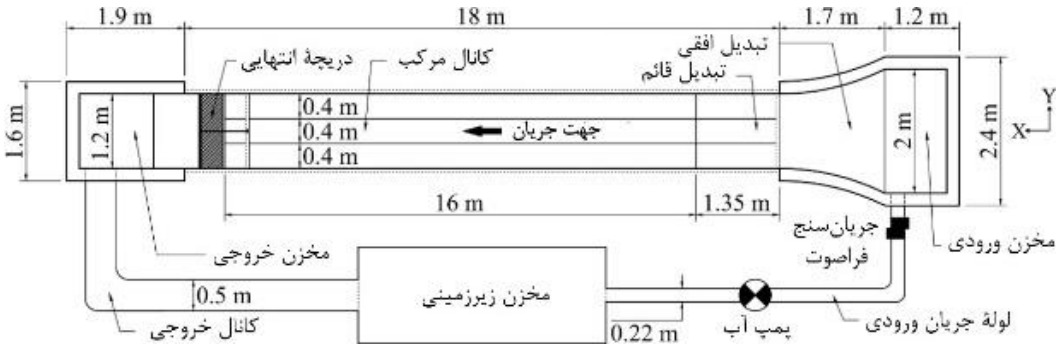
## مواد و روش‌ها

### معرفی کانال و وسایل آزمایشگاهی

این پژوهش برروی کانال آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا انجام شده‌است. این کانال دارای طول کلی ۱۸ متر، عرض ۱/۲ متر و عمق ۰/٦ متر است و متوسط شیب طولی کف آن برابر با $۱/٦۳\times۱۰^{-۳}$ است. مقطع عرضی این کانال آزمایشگاهی بااستفاده از ورق‌های PVC به‌شکل مرکب ساخته شده‌است. این کانال مرکب از یک کانال اصلی مستطیلی‌شکل با عرض و عمق به‌ترتیب ۰/٤ و ۰/۰۵ متر در وسط و دو سیلاب‌دشت در طرفین آن با عرض ۰/٤ متر و شیب جانبی ۰/۰۷۵ (متناظر با زاویهٔ جانبی ٤/۲۹ درجه) تشکیل شده‌است. شکل (۱) مقطع عرضی کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد که در آن $B_{fp}$ عرض سیلاب‌دشت، H عمق جریان در کانال اصلی و $\overline{H_{fp}}$ میانگین عمق جریان برروی سیلاب‌دشت است. هم‌چنین در شکل (۲) نمای از بالای کانال آزمایشگاهی نشان داده شده‌است.




شکل ۱ مقطع عرضی کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار



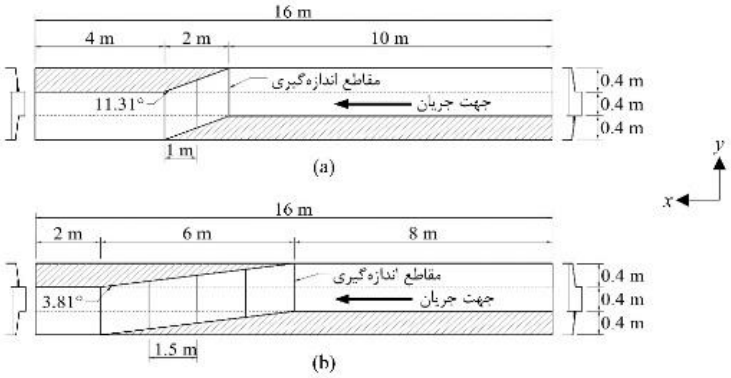

شکل ۲ نمای از بالای کانال آزمایشگاهی

با نصب پروفیل‌های نبشی فولادی برروی سیلاب‌دشت‌ها، کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب ساخته شده‌است. آزمایش‌ها در دو طول اریب ۲ و ٦ متر (متناظر با زاویه‌های اریب به‌ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه) انجام شده‌است. برای اطمینان از توسعه یافتن جریان و وجود طول کافی برای ایجاد شرایط جریان یکنواخت در قسمت منشوری‌شکل بالادست ناحیهٔ اریب کانال، شروع ناحیهٔ اریب در فواصل ۱۰ و ۸ متری از ابتدای کانال مرکب برای آزمایش‌های انجام‌شده در زاویه‌های اریب به‌ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه، انتخاب شده‌است. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای نام‌گذاری کانال مرکب با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه به‌ترتیب از عبارت‌های SCIF-2 و SCIF-6 استفاده شده‌است. اندازه‌گیری‌ها در ۳ مقطع با فواصل ۱ متر در طول ناحیهٔ اریب کانال برای آزمایش‌های با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ درجه و در ۵ مقطع با فواصل ۱/۵ متر برای آزمایش‌های با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه انجام شده‌است. شکل (۳) نمای کلی و مشخصات هندسی کانال‌های مرکب مورب مورد بررسی در این تحقیق و هم‌چنین موقعیت مقاطع اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر آزمایش‌ها در سه عمق نسبی به‌ترتیب ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ انجام شده‌است. باتوجه به شیب‌دار بودن سیلاب‌د شت‌ها، از میانگین عمق جریان برروی سیلاب‌دشت برای تعریف عمق نسبی جریان مطابق با رابطهٔ $D_r = \frac{\overline{H_{fp}}}{H}$ استفاده شده که در آن $D_r$ معرف عمق نسبی جریان، $\overline{H_{fp}}$ میانگین عمق جریان برروی سیلاب‌دشت‌ها و H عمق جریان در کانال اصلی است (شکل ۱). لازم به ذکر است که این عمق نسبی در قسمت منشوری‌شکل بالادست ناحیهٔ اریب کانال تنظیم شده‌است.

در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری سرعت جریان از سنجشگر جانب‌نگر دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) با فرکانس ۲۰۰ هرتز و در مدت‌زمان ٦۰ ثانیه استفاده شده‌است. هم‌چنین داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری سرعت توسط ADV بااستفاده از نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالاتر از ۱۵ و هم‌بستگی (Correlation) بیشتر از ۷۵ درصد اصلاح شده‌اند. توزیع سرعت جریان در فواصل عرضی ۲۰ و ارتفاعی ۱۰ میلی‌متر در ۳ و ۵ مقطع (مطابق شکل ۳) اندازه‌گیری شده‌است. هم‌چنین به‌منظور بررسی اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در طول ناحیهٔ اریب کانال، توزیع عمقی سرعت در فواصل ۰/۲۵ و ۰/۵ متر برای سری آزمایش‌های با زاویهٔ اریب به‌ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه، در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده‌است. تنش برشی مرزی به‌وسیلهٔ لولهٔ پرستون (Preston tube) با قطر خارجی ٤ میلی‌متر در اطراف پیرامون مرطوب تمامی مقاطع اندازه‌گیری شده‌است. این اندازه‌گیری‌ها در فواصل عرضی ۲۰ میلی‌متر برروی کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و در فواصل ارتفاعی ۱۰ میلی‌متر برروی

دیواره‌ها انجام شده‌است. شکل (٤) تصویری از دستگاه سرعت‌سنج ADV و لولهٔ پرستون در حال اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری عمق جریان در امتداد کانال نیز از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری دبی ورودی به کانال از دستگاه جریان‌سنج فراصوت (Ultrasonic flow meter) نصب‌شده برروی لولهٔ انتقال آب به کانال، استفاده شده‌است. مقادیر دبی‌ها و سایر ویژگی‌های هیدرولیکی نظیر عمق، عمق نسبی و عدد فرود جریان در جدول (۱) آورده شده‌است.




شکل ۳ مشخصات هندسی و محل مقاطع اندازه‌گیری در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)

(b) (a)

شکل ٤ تصویری از (a) سنجشگر جانب‌نگر دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV)، (b) لولهٔ پرستون در حال اندازه‌گیری

جدول ۱ خلاصهٔ ویژگی‌های هیدرولیکی جریان

| Exp. | Skewed angle, θ | $D_r$ | H (m) | Q ($m^3/s$) | $U_m$ (m/s) | D (m) | $F_r = \frac{U_m}{(gD)^{0.5}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SCIF-2 | ۱۱/۳۱° | ۰/۲ | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۵۹۹ | ۰/۰٤۹ | ۰/۸٦٤ |
| | | ۰/۳ | ۰/۰۹٤ | ۰/۰۳۰۲ | ۰/٦۱۷ | ۰/۰٦۱ | ۰/۷۹٦ |
| | | ۰/٤ | ۰/۱۰۸ | ۰/۰٤۲۲ | ۰/۷۰۱ | ۰/۰۷٦ | ۰/۸۱۲ |
| SCIF-6 | ۳/۸۱° | ۰/۲ | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۲۳۱ | ۰/۵۸۱ | ۰/۰٤۹ | ۰/۸۳۲ |
| | | ۰/۳ | ۰/۰۹۳ | ۰/۰۲۷۸ | ۰/۵۹۰ | ۰/۰٦۰ | ۰/۷٦٦ |
| | | ۰/٤ | ۰/۱۰۹ | ۰/۰٤۰۹ | ۰/٦٦۸ | ۰/۰۷٦ | ۰/۷۷۲ |

## بحث و نتایج

### سرعت جریان

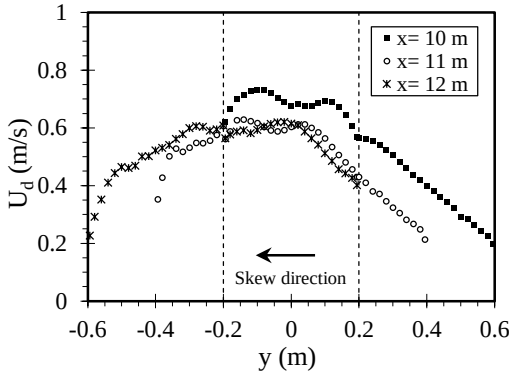
با انتگرال‌گیری عددی در عمق از مؤلفهٔ طولی داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده تو سط ADV، مقادیر سرعت متوســط در عمق در تمامی مقاطع مطابق با رابطهٔ (۱) محاسبه شده‌است.

$$U_d = \frac{1}{h}\sum_{i=1}^{n} u_i \Delta h_i \qquad (۱)$$

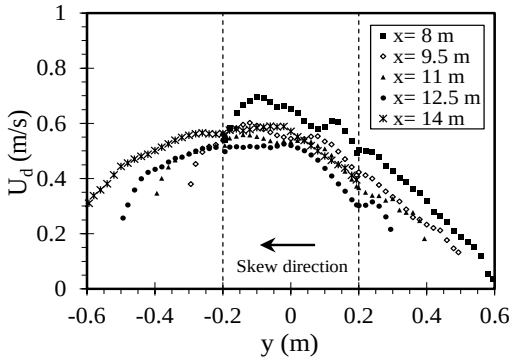
در رابطهٔ (۱)، $U_d$ سرعت متوسط در عمق، h عمق جریان در محل محاســبهٔ ســرعت متوســط در عمق، $u_i$ مؤلفهٔ طولی ســرعت جریان و $\Delta h_i$ متوســط فاصــلهٔ بین نقاط اندازه‌گیری است.

شکل (۵) توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در طول قسمت اریب برای کانال مرکب با دو زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و عمق نسبی ۰/۳ را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۵) می‌توان دریافت که توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در کانال‌های مرکب مورب نامتقارن است و نواحی با سرعت جریان بیشینه در نزدیکی سیلاب‌دشت واگرا قرار دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در کانال‌های مرکب مورب سرعت جریان در مقطع ابتدایی ناحیهٔ اریب کانال همواره بیشترین مقدار را دارد و با حرکت در امتداد ناحیهٔ اریب، سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا کاهش پیدا می‌کند لیکن سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، میزان سرعت جریان در کل مقطع عرضی کانال به‌ویژه برروی سیلاب‌دشت واگرا افزایش یافته‌است.

بررســی‌های انجام شــده نشــان‌دهندهٔ آن اســت که سرعت جریان در سیلاب‌د شت واگرا همواره در تمامی مقــاطع انــدازه‌گیری بزرگ‌تر از ســـرعــت جریــان در سیلاب‌د شت همگرا ا ست. برای نمونه در مقطع میانی ناحیهٔ اریب کانال، سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا به‌طور متوســـط در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ درجه در حدود ۱/۸ و در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه نزدیک به ۱/٦ برابر ســـرعت جریان در سیلاب‌دشت همگرا است.




(a)




(b)

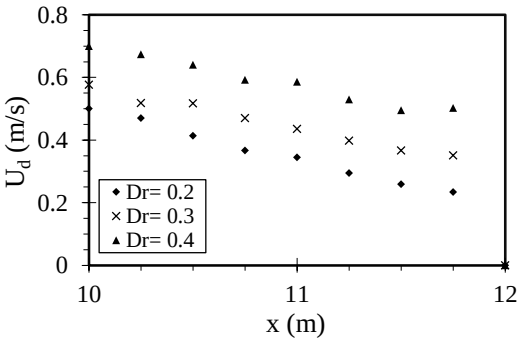
شکل ۵ توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در مقاطع مختلف برای عمق نسبی ۰/۳ و در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) □ ۱۱/۳۱ (SCIF-2)، (b) □ ۳/۸۱ (SCIF-6)

### سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

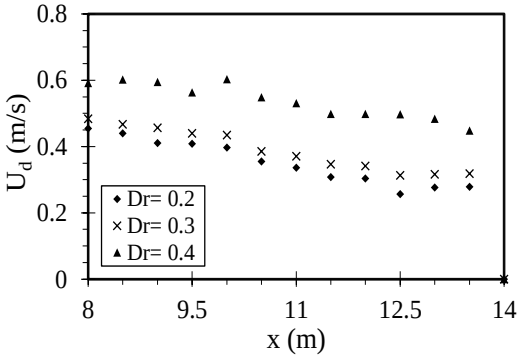
به‌منظور تعیین میزان تبادل اندازه حرکت صورت‌گرفته بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، توزیع سرعت متوسط در عمق جریان در طول ناحیهٔ اریب کانال در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده‌است. در شکل‌های (٦) و (۷) تغییرات سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا در کانال‌های مرکب با

زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه نشان داده شده‌است. از شکل‌های (٦) و (۷) می‌توان دریافت که برای هر دو سری آزمایش و در عمق‌های نسبی مختلف، متوسط سرعت جریان در طول ناحیهٔ مورب و در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سیلاب‌دشت همگرا ۳۸ درصد بزرگ‌تر است. روندی مشابه در مطالعات انجام‌شده توسط الیوت [11] نیز گزارش شده‌است.

هم‌چنین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش عمق نسبی جریان، اختلاف بین سرعت جریان در طول فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای عمق‌های نسبی مختلف در آزمایش‌های سری SCIF-2 و SCIF-6 به‌طور میانگین به‌ترتیب ۷۱/٤ و ۵۷/۷ درصد کاهش یافته‌است.

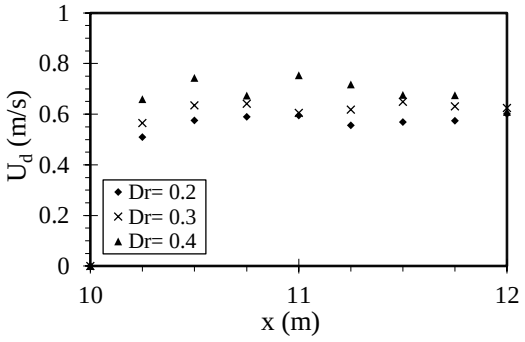



(a)

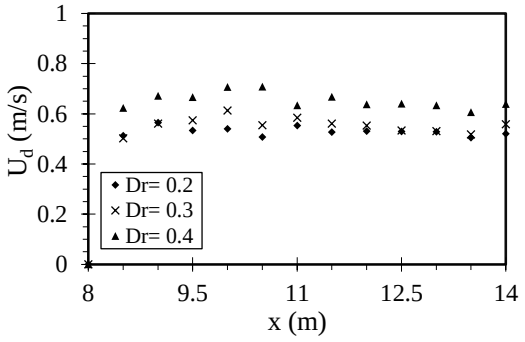



(b)

شکل ٦ تغییرات سرعت متوسط در عمق در طول ناحیهٔ اریب در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا برای زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)




(a)




(b)

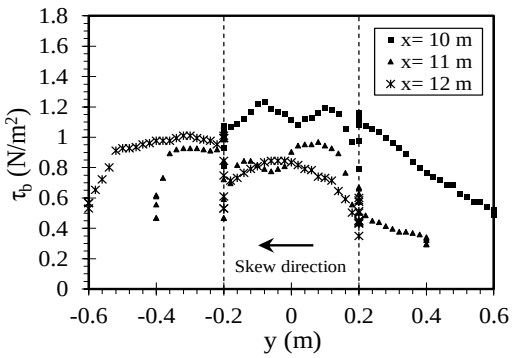
شکل ۷ تغییرات سرعت متوسط در عمق در طول ناحیهٔ اریب در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا برای زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)

شکل (٦) هم‌چنین نشان می‌دهد که توزیع سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا در طول ناحیهٔ اریب روندی کاهشی دارد. این میزان کاهش برای کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ درجه برابر ٤۰/۳ درصد و برای کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه نزدیک به ۳۲/٤ درصد است. با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، این میزان کاهش سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا به‌طور متوسط ۲۳/۱ درصد بیشتر شده‌است. این درحالی است که تغییرات سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا با حرکت جریان در طول ناحیهٔ اریب کانال، دارای روندی افزایشی و سپس کاهشی با شیبی اندک است (شکل ۷).

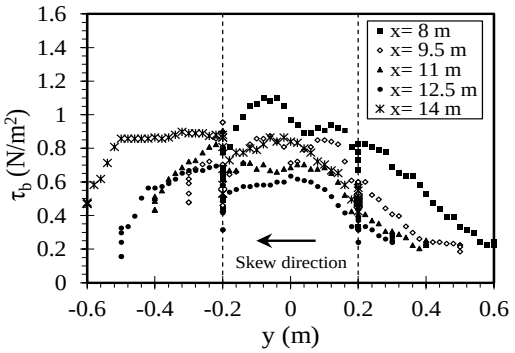
## تنش برشی مرزی

شکل (۸) توزیع عرضی تنش برشی مرزی را در مقاطع مختلف در امتداد ناحیهٔ اریب، برای کانال مرکب با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و عمق نسبی ۰/۳ نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۸) توزیع عرضی تنش برشی مرزی در کانال‌های مرکب مورب به‌صورت نامتقارن است و در تمام مقاطع اندازه‌گیری تنش برشی مرزی در سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است. نتایج مشابهی توسط محققان پیشین [12, 10, 8] گزارش شده‌است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، متوسط تنش برشی در سیلاب‌دشت واگرا بیش از ۱/٦ برابر متوسط تنش برشی در سیلاب‌دشت همگرا برای یک مقطع اندازه‌گیری یکسان است.




(a)



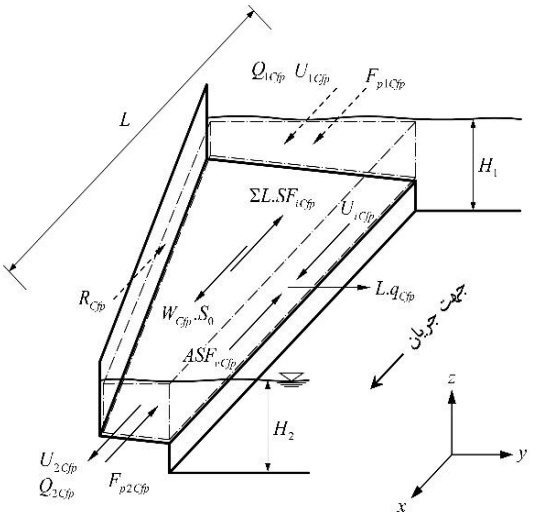

(b)

شکل ۸ توزیع عرضی تنش برشی مرزی در پیرامون مرطوب مقاطع مختلف برای عمق نسبی ۰/۳ و در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)

شکل (۸) هم‌چنین نشان می‌دهد که با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها، تنش برشی مرزی در کل مقطع عرضی کانال به‌ویژه در مقاطع ابتدایی و میانی ناحیهٔ اریب کانال افزایش می‌یابد لیکن در مقطع انتهایی این میزان افزایش ناچیز است.

## نیروی برشی ظاهری

در این پژوهش بااستفاده از نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های سرعت، دبی، نیم‌رخ طولی سطح آب و تنش برشی مرزی نیروی‌های موجود در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا محاسبه شده‌است. هم‌چنین به‌منظور مطالعهٔ اندرکنش جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، نیروهای برشی ظاهری ایجادشده در این نواحی به‌کمک موازنهٔ اندازه حرکت در طول ناحیهٔ اریب کانال محاسبه شده‌اند. برای رسیدن به این هدف حجم محصور بین دو مقطع اندازه‌گیری در طول ناحیهٔ اریب کانال به‌عنوان حجم کنترل (Control volume) درنظر گرفته شده‌است. شکل (۹) نشان‌دهندهٔ حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا است.




شکل ۹ حجم کنترل بین دو مقطع اندازه‌گیری متوالی در سیلاب‌دشت همگرا

باتوجه به شکل (۹) و بااستفاده از اصل بقای اندازه حرکت برای جریان دائمی، می‌توان نوشت:

$$F_{p1Cfp} - F_{p2Cfp} + W_{Cfp}S_0 - \sum LSF_{iCfp} - R_{Cfp} - ASF_{vCfp} = \rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp} - \rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp} + \rho U_{iCfp}q_{Cfp}L \quad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، $F_p$ نیروی فشار هیدرواستاتیک، W وزن آب موجود در حجم کنترل، $S_0$ شیب کف کانال، $\Sigma LSF_i$ مجموع نیروهای برشی واردشده از طرف مرزهای کانال بر سیال موجود در حجم کنترل، $R_{Cfp}$ مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا درجهت جریان (محور x)، $ASF_{vCfp}$ نیروی برشی ظاهری ایجادشده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا، ρ جرم مخصوص آب، β ضریب اصلاح اندازه حرکت، U سرعت متوسط جریان، Q دبی جریان عبوری، $U_{iCfp}$ متوسط سرعت جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا، $q_{Cfp}$ جریان عرضی خروجی از سیلاب‌دشت همگرا در واحد طول کانال و L فاصلهٔ بین مقاطع انتخابی (طول حجم کنترل) است. هم‌چنین زیرنویس Cfp معرف سیلاب‌دشت همگرا است و زیرنویس‌های (۱) و (۲) نشان‌دهندهٔ مقطع بالادست و پایین‌دست حجم کنترل هستند. با جای‌گذاری روابط محاسبهٔ نیروی وزن و نیروی برشی مرزی در رابطهٔ (۲) و با مرتب کردن آن خواهیم داشت:

$$\left(F_{p1Cfp} - F_{p2Cfp}\right) - \rho g\bar{A}_{Cfp}LS_0 + (\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L + R_{Cfp} + (\rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp} - \rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp}) + \rho U_{iCfp}q_{Cfp}L + ASF_{vCfp} = 0 \quad (۳)$$

در رابطهٔ (۳) g شتاب ثقل، $\overline{A}_{Cfp}$ متوسط سطح مقطع جریان در حجم کنترل $(\overline{A}_{Cfp} = (A_{1Cfp} + A_{2Cfp})/2)$ و $\overline{SF}_6$ و $\overline{SF}_7$ نیز به‌ترتیب متوسط نیروی برشی در واحد طول وارد بر کف و دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا هستند.

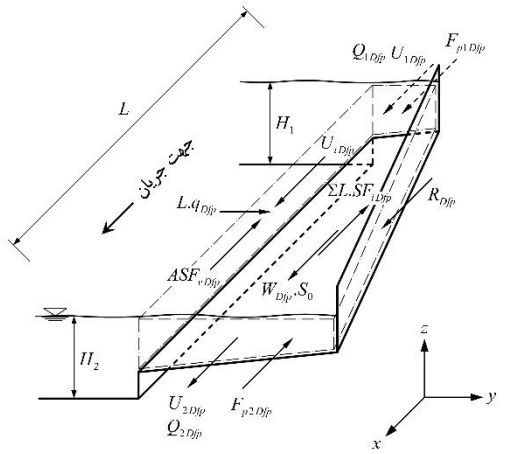
این دو نیروی برشی با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های تنش برشی مرزی اندازه‌گیری‌شده برروی کف و دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا محاسبه شده‌اند. مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا در راستای جریان (محور x)، برابر نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر تصویر دیواره برروی صفحهٔ عمود بر جهت جریان (صفحهٔ yz) است و بااستفاده از رابطهٔ (٤) محاسبه شده‌است [14]. دبی خروجی از سیلاب‌دشت همگرا در واحد طول کانال نیز بااستفاده از رابطهٔ (۵) برآورد شده‌است.

$$R_{Cfp} = \rho g\bar{h}_{Cfp}A_{wCfp} \quad (٤)$$

$$q_{Cfp} = \frac{Q_{1Cfp} - Q_{2Cfp}}{L} \quad (۵)$$

در این رابطه‌ها $\bar{h}_{Cfp}$ فاصلهٔ مرکز سطح تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا تا سطح آزاد آب و $A_{wCfp}$ مساحت تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا بر صفحهٔ عمود بر جهت جریان (صفحهٔ yz) است.

نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نیز با انتخاب حجم کنترل در سیلاب‌دشت واگرا محاسبه شده‌است (شکل (۱۰) را نگاه کنید).




شکل ۱۰ حجم کنترل بین دو مقطع اندازه‌گیری متوالی در سیلاب‌دشت واگرا

با استفاده از معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا، می‌توان نوشت:

$$F_{p1Dfp} - F_{p2Dfp} + W_{Dfp}S_0 - \sum LSF_{iDfp} + R_{Dfp} - ASF_{vDfp} = \rho\beta_{2Dfp}U_{2Dfp}Q_{2Dfp} - \rho\beta_{1Dfp}U_{1Dfp}Q_{1Dfp} - \rho U_{iDfp}q_{Dfp}L \quad (٦)$$

در رابطهٔ (٦) منظور از زیرنویس Dfp سیلاب‌دشت واگرا است. با بازنویسی و مرتب کردن رابطهٔ (٦)، خواهیم داشت:

$$-(F_{p1Dfp} - F_{p2Dfp}) - \rho g\bar{A}_{Dfp}LS_0 + (\overline{SF}_1 + \overline{SF}_2)L - R_{Dfp} + (\rho\beta_{2Dfp}U_{2Dfp}Q_{2Dfp} - \rho\beta_{1Dfp}U_{1Dfp}Q_{1Dfp}) - \rho U_{iDfp}q_{Dfp}L + ASF_{vDfp} = 0 \quad (٧)$$

در رابطهٔ (٧) $\overline{A}_{Dfp}$ متوسط سطح مقطع جریان در حجم کنترل درنظر گرفته‌شده در سیلاب‌دشت واگرا، $\overline{SF}_1$ و $\overline{SF}_2$ به‌ترتیب نیروی برشی وارد بر واحد طول دیواره و کف سیلاب‌دشت واگرا، $U_{iDfp}$ متوسط سرعت جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا، $R_{Dfp}$ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا، $q_{Dfp}$ دبی عرضی ورودی به سیلاب‌دشت واگرا در واحد طول کانال و $ASF_{vDfp}$ نیروی برشی ظاهری ایجادشده در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است. برای تعیین مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا از رابطهٔ (٨) و برای محاسبهٔ جریان ورودی به سیلاب‌دشت واگرا در واحد طول کانال نیز از رابطهٔ (٩) استفاده شده‌است.

$$R_{Dfp} = \rho g\bar{h}_{Dfp}A_{wDfp} \quad (٨)$$

$$q_{Dfp} = \frac{Q_{2Dfp} - Q_{1Dfp}}{L} \quad (٩)$$

در این روابط $\bar{h}_{Dfp}$ فاصلهٔ مرکز سطح تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا تا سطح آزاد آب، $A_{wDfp}$ سطح مقطع تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا برروی صفحهٔ عمود بر جهت جریان و $Q_{1Dfp}$ و $Q_{2Dfp}$ نیز به‌ترتیب دبی جریان ورودی به و خروجی از حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا هستند.

نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا به‌همراه سایر جملات معادلات اندازه حرکت (معادلات ۳ و ۷) برای کانال مرکب با زوایای اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه محاسبه و در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده‌است.

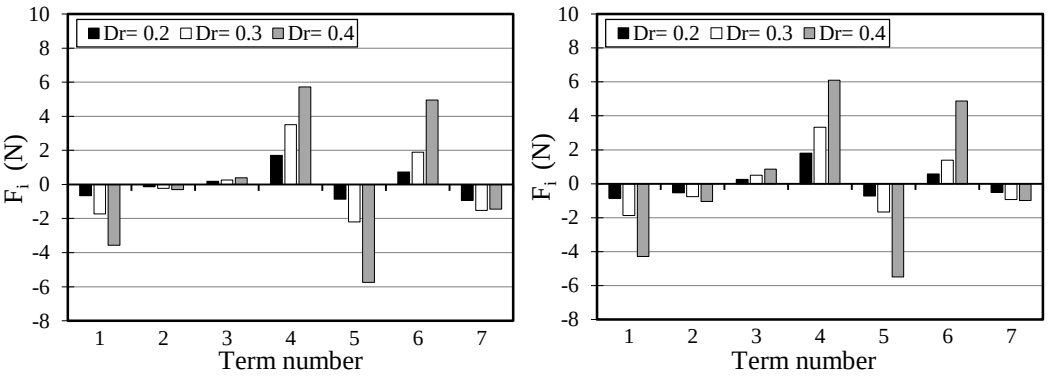
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمودار میله‌ای تغییرات جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت به‌ترتیب برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا و سیلاب‌دشت واگرا نشان داده شده‌است. در این جدول‌ها و شکل‌ها، منظور از جملهٔ اول برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر حجم کنترل، جملهٔ دوم مؤلفهٔ نیروی وزن در راستای جریان، جملهٔ سوم نیروی برشی مرزها، جملهٔ چهارم مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت‌ها درراستای جریان، جملهٔ پنجم تغییرات اندازه حرکت در حجم کنترل، جملهٔ ششم اندازه حرکت ناشی از جریان عرضی منتقل‌شده از سیلاب‌دشت همگرا به کانال اصلی و بالعکس از کانال اصلی به سیلاب‌دشت واگرا و جملهٔ هفتم نیروی برشی ظاهری به‌وجودآمده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها است. باتوجه به کاهش سطح مقطع جریان در طول حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا، برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر حجم کنترل (جملهٔ اول معادلهٔ اندازه حرکت) با درنظر گرفتن علامت، منفی است. لیکن در سیلاب‌دشت واگرا به‌دلیل افزایش سطح مقطع جریان در طول حجم کنترل، برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک با لحاظ کردن علامت، دارای مقداری مثبت است (شکل ۱۲). هم‌چنین قدر مطلق مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیواره درراستای جریان (جملهٔ چهارم معادلهٔ اندازه حرکت) در هر دو سیلاب‌دشت همگرا و واگرا برای هر عمق نسبی تقریبا برابر است (حداکثر اختلاف ۷ درصد).

جدول ۲ جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا و برای آزمایش‌های سری SCIF-2 (۱۱/۳۱□) و SCIF-6 (۳/۸۱□)

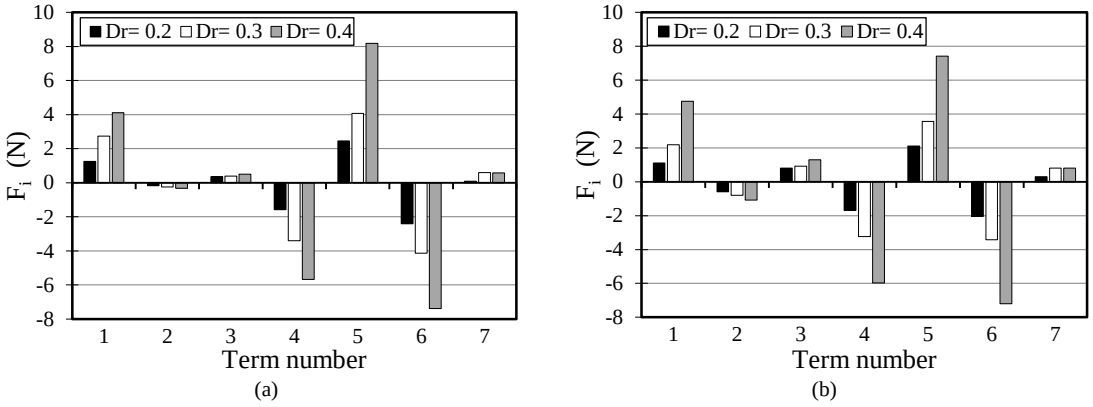
| Term No: | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Exp. | $D_r$ | $-(F_{p1Cfp}-F_{p2Cfp})$ (N) | $-\rho g\bar{A}_{Cfp}LS_0$ (N) | $(\overline{SF}_6+\overline{SF}_7)L$ (N) | $R_{Cfp}$ (N) | $\rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp}-\rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp}$ (N) | $\rho U_{iCfp}q_{Cfp}L$ (N) | $ASF_{vCfp}$ (N) |
| SCIF-2 | ۰/۲ | −۰/٦٥٦ | −۰/۱۳۹ | ۰/۱۷۹ | ۱/٦۹۸ | −۰/۸٦۹ | ۰/۷۲۹ | −۰/۹٤۱ |
| | ۰/۳ | −۱/۷۲٤ | −۰/۲۲٥ | ۰/۲٥٦ | ۳/٥۱٥ | −۲/۱۹۳ | ۱/۸۹٤ | −۱/٥۲۳ |
| | ۰/٤ | −۳/٥٦۰ | −۰/۳۱۱ | ۰/۳۸۷ | ٥/۷۲٥ | −٥/۷٤٦ | ٤/۹٤۹ | −۱/٤٤٤ |
| SCIF-6 | ۰/۲ | −۰/۸٦۳ | −۰/٥٤۱ | ۰/۲٥۳ | ۱/۸۰۳ | −۰/۷۲۲ | ۰/٥۷۸ | −۰/٥۰۹ |
| | ۰/۳ | −۱/۸۷۹ | −۰/۷٦٦ | ۰/٥۱۰ | ۳/۳۲۹ | −۱/٦٦۷ | ۱/۳۹٦ | −۰/۹۲۳ |
| | ۰/٤ | −٤/۲۸۸ | −۱/۰٤۷ | ۰/۸٥٥ | ٦/۰۹۲ | −٥/٤۸٤ | ٤/۸٦٦ | −۰/۹۹٤ |

جدول ۳ جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا و برای آزمایش‌های سری SCIF-2 (۱۱/۳۱□) و SCIF-6 (۳/۸۱□)

| Term No: | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Exp. | $D_r$ | $-(F_{p1Dfp}-F_{p2Dfp})$ (N) | $-\rho g\bar{A}_{Dfp}LS_0$ (N) | $(\overline{SF}_1+\overline{SF}_2)L$ (N) | $-R_{Dfp}$ (N) | $\rho\beta_{2Dfp}U_{2Dfp}Q_{2Dfp}-\rho\beta_{1Dfp}U_{1Dfp}Q_{1Dfp}$ (N) | $-\rho U_{iDfp}q_{Dfp}L$ (N) | $ASF_{vDfp}$ (N) |
| SCIF-2 | ۰/۲ | ۱/۲٦۳ | −۰/۱٦٤ | ۰/۳٤٤ | −۱/٥۸٥ | ۲/٤٥٥ | −۲/٤۰۷ | ۰/۰۹٤ |
| | ۰/۳ | ۲/۷۳۸ | −۰/۲٥۱ | ۰/۳۸۷ | −۳/۳۹۸ | ٤/۰۷۳ | −٤/۱٤۲ | ۰/٥۹۲ |
| | ۰/٤ | ٤/۱۱۲ | −۰/۳۲۱ | ۰/٤۹۹ | −٥/٦۷۷ | ۸/۱۷۷ | −۷/۳۷٥ | ۰/٥۸٤ |
| SCIF-6 | ۰/۲ | ۱/۱۰٥ | −۰/٥۸٥ | ۰/۸۰۱ | −۱/٦۸۰ | ۲/۱۱۱ | −۲/۰٥۲ | ۰/۳۰۱ |
| | ۰/۳ | ۲/۱۸۲ | −۰/۷۹۹ | ۰/۹۱۱ | −۳/۲۳٥ | ۳/٥٦۲ | −۳/٤۳۱ | ۰/۸۱۰ |
| | ۰/٤ | ٤/۷٥۱ | −۱/۰۸۷ | ۱/۲۹۷ | −٥/۹۷۹ | ۷/٤۱۷ | −۷/۱۹۹ | ۰/۸۰۱ |



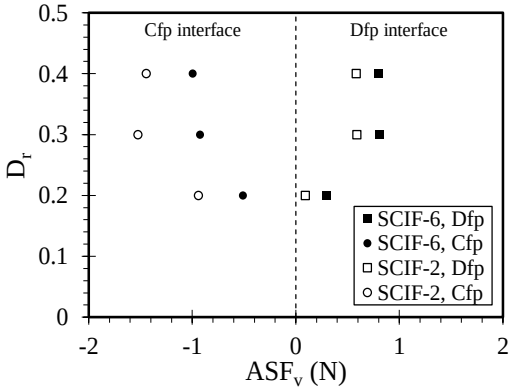

شکل ۱۱ نمودار میله‌ای جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱□ (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱□ (SCIF-6)




شکل ۱۲ نمودار میله‌ای جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)

قدر مطلق تغییرات اندازه حرکت (جملهٔ پنجم معادلهٔ اندازه حرکت) در سیلاب‌دشت واگرا برای عمق‌های نسبی مختلف به‌طور متوسط در حدود ۲ برابر مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است که نشان‌دهندهٔ سریع‌تر بودن جریان در سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سیلاب‌دشت همگرا است. هم‌چنین قدر مطلق مقدار تبادل اندازه حرکت انجام‌شده بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا (جملهٔ ششم معادلهٔ اندازه حرکت) برای عمق‌های نسبی مختلف در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه به‌ترتیب نزدیک به ۲/۳ و ۲/۵ برابر قدرمطلق تبادل اندازه حرکت صورت‌گرفته بین سیلاب‌دشت همگرا و کانال اصلی است.

در شکل (۱۳) رابطهٔ میان نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا و عمق نسبی جریان برای کانال مرکب با زوایای اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه نشان داده شده‌است. باتوجه به شکل (۱۳) نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا همواره دارای علامت منفی است. نتیجه‌ای مشابه در مطالعات انجام‌شده برروی کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا توسط رضائی و نایت [14] گزارش شده‌است. این در حالی است که نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا دارای علامت مثبت است. این موضوع بیانگر آن است که در کانال‌های مرکب مورب جریان خروجی از سیلاب‌دشت همگرا باعث سریع‌تر شدن جریان در کانال اصلی شده و جریان ورودی از طرف کانال اصلی به سیلاب‌دشت واگرا سبب افزایش سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا شده‌است. قدر مطلق نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا همواره بزرگ‌تر از مقدار نظیر آن در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است. این موضوع بیان‌کنندهٔ آن است که اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا نسبت‌به اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا بیشتر است. با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، مقدار نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا برای عمق‌های نسبی مختلف به‌طور متوسط در حدود ۳۹ درصد افزایش یافته‌است. روند مشابه‌ای توسط رضائی و نایت [14] در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا مشاهده شده‌است. این در حالی است که افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها سبب کاهش نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا شده‌است (شکل ۱۳).

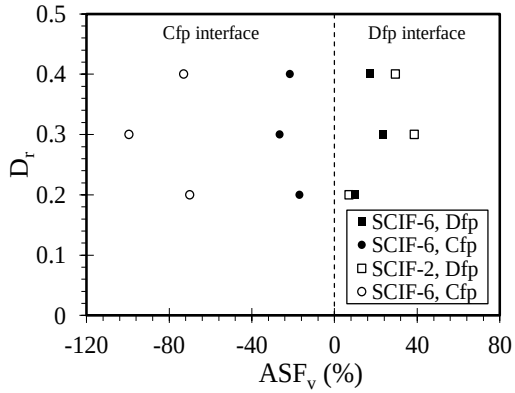



شکل ۱۳ نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای کانال مرکب با زاویه‌های اریب مختلف

بااستفاده از رابطهٔ (۱۰) نیروی برشی ظاهری ایجادشده در فصل مشترک قائم کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به‌صورت درصدی از کل نیروی برشی برای هر دو کانال مرکب مورب (با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه) محاسبه و در شکل (۱٤) نشان داده شده‌است.

$$\%ASF_v = \frac{ASF_v}{\sum \overline{SF}_i} \times 100 \qquad (۱۰)$$

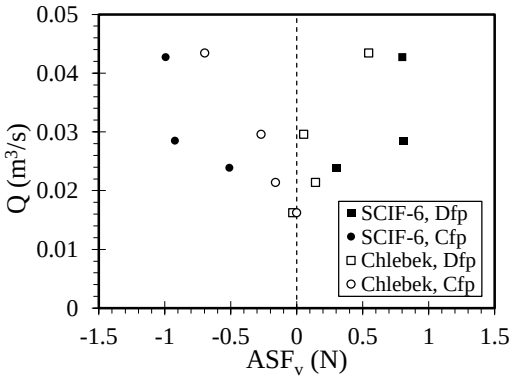
در رابطهٔ (۱۰)، $ASF_v$ نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و $\sum \overline{SF}_i$ متوسط مجموع نیروی‌های برشی ایجاد شده در کل مرزهای کانال مرکب مورب است.




شکل ۱٤ درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای کانال مرکب با زاویه‌های اریب مختلف

باتوجه به شکل (۱٤) می‌توان دریافت که با افزایش عمق نسبی جریان، قدرمطلق درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به‌ازای عمق نسبی ۰/۳ بیشترین مقدار را دارد و با رسیدن عمق نسبی جریان به ۰/٤ اندکی کاهش می‌یابد. مشابه این پدیده در کانال‌های مرکب منشوری نیز مشاهده شده‌است [15].

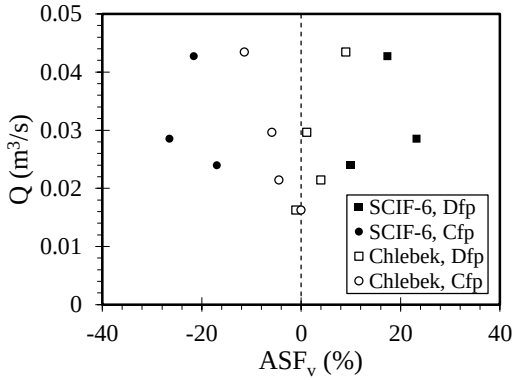
به‌منظور بررسی اثر شیب جانبی سیلاب‌دشت‌ها بر اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال‌های مرکب مورب، مقدار و درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه (پژوهش حاضر) با نتایج مطالعات چلبک [3] مقایسه و در شکل‌های (۱۵) و (۱٦) آورده شده‌است (در این شکل‌ها باتوجه به تفاوت در تعریف عمق نسبی، از مقادیر دبی جریان برای مقایسه استفاده شده‌است).




شکل ۱۵ مقایسهٔ نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ (SCIF-6) و نتایج مطالعات چلبک (۲۰۰۹)

شکل‌های (۱۵) و (۱٦) نشان می‌دهند که علامت نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار (پژوهش حاضر) و کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های افقی (مطالعات چلبک [3]) یکسان است. این موضوع بیان‌کنندهٔ رفتار مشابه

جریان در هر دو کانال مرکب مورب می‌باشد. این در حالی است که در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار، شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها سبب افزایش مقدار نیروهای برشی ظاهری (اندرکنش) ایجادشده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها نسبت‌به کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های افقی شده‌است.




شکل ۱۶ مقایسهٔ درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب با زاویهٔ اریب □۳/۸۱ (SCIF-6) و نتایج مطالعات چلبک (۲۰۰۹)

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال‌های مرکب مورب، ویژگی‌های مختلف جریان شامل توزیع سرعت و توزیع تنش برشی مرزی در مقاطع مختلف در طول ناحیهٔ اریب کانال اندازه‌گیری شده‌است. سپس بااستفاده از معادلات اندازه حرکت، نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها محاسبه شده‌است. این مطالعات به‌صورت آزمایشگاهی در سه عمق نسبی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ و برروی کانال‌های مرکب مورب با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱و ۳/۸۱ درجه و با سیلاب دشت‌هایی با شیب جانبی برابر ۰/۰۷۵ انجام شده‌است. تعدادی از مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش در ادامه آورده شده‌است:

۱. در کانال‌های مرکب مورب سرعت جریان در مقطع ابتدائی ناحیهٔ اریب کانال همواره بیشترین مقدار را دارد و با حرکت در امتداد ناحیهٔ اریب، سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا کاهش می‌یابد لیکن سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، سرعت جریان در کل مقطع عرضی کانال به‌ویژه برروی سیلاب‌دشت واگرا افزایش یافته‌است.

۲. توزیع سرعت جریان در امتداد ناحیهٔ اریب کانال در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا روندی کاهشی دارد و همواره سرعت متوسط جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از مقدار نظیر آن در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا است.

۳. توزیع عرضی تنش برشی مرزی در اطراف پیرامون مرطوب کانال‌های مرکب مورب به‌صورت نامتقارن است و همواره مقدار تنش برشی مرزی در سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است.

٤. در کانال‌های مرکب مورب، افزایش عمق نسبی جریان و یا افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها باعث افزایش مقدار تنش برشی مرزی در کل مقطع کانال به‌ویژه برروی سیلاب‌دشت همگرا می‌شود.

۵. قدر مطلق تغییرات اندازه حرکت در حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا نزدیک به دو برابر مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است که نشان‌دهندهٔ بیشتر بودن سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سرعت جریان در سیلاب‌دشت همگرا است.

٦. قدر مطلق تبادل اندازه حرکت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سیلاب‌دشت همگرا بیش از دو برابر است. این موضوع بیانگر آن است که در کانال‌های مرکب مورب، میزان تبادل جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به جرم مبادله‌شده بین سیلاب‌دشت همگرا و کانال اصلی بیشتر است.

۷. نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا دارای علامت منفی و در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا دارای مقداری مثبت است. باتوجه به این موضوع جریان عرضی خروجی از سیلاب‌دشت همگرا سبب افزایش سرعت جریان در کانال اصلی شده و جریان ورودی از کانال اصلی به سیلاب‌دشت واگرا نیز باعث سرعت گرفتن جریان در سیلاب‌دشت واگرا شده‌است.

۸. مقایسهٔ نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات چلبک [3] نشان می‌دهد که شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها در کانال‌های مرکب مورب باعث افزایش میزان نیروهای برشی ظاهری (اندرکنش) در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده‌است.

## فهرست علائم

| | |
|---|---|
| $A$ | سطح مقطع جریان، $m^2$ |
| $\bar{A}$ | متوسط سطح مقطع جریان، $m^2$ |
| $A_w$ | سطح مقطع تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت، $m^2$ |
| $ASF_v$ | نیروی برشی ظاهری، N |
| $B_{fp}$ | عرض سیلاب‌دشت، m |
| Cfp | سیلاب‌دشت همگرا |
| $D$ | عمق هیدرولیکی، m |
| $D_r$ | عمق نسبی جریان |
| Dfp | سیلاب‌دشت واگرا |
| $F_r$ | عدد فرود جریان |
| $F_p$ | نیروی فشار هیدرواستاتیک، N |
| $g$ | شتاب گرانش زمین، $m/s^2$ |
| $H$ | عمق جریان، m |
| $\overline{H_{fp}}$ | میانگین عمق جریان در سیلاب‌دشت‌ها، m |
| $\bar{h}$ | فاصلهٔ مرکز سطح تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت تا سطح آزاد آب، m |
| $L$ | طول حجم کنترل، m |
| $Q$ | دبی جریان، $m^3/s$ |
| $q$ | دبی جریان عرضی در واحد طول، $m^2/s$ |
| $R$ | مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت در راستای جریان، N |
| $S_0$ | شیب کف کانال |
| SF | نیروی برشی در واحد طول، N/m |
| $U$ | سرعت جریان، m/s |
| $U_i$ | سرعت جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، m/s |
| $U_d$ | سرعت متوسط در عمق، m/s |
| $U_m$ | سرعت متوسط جریان، m/s |
| $u$ | مؤلفهٔ طولی سرعت جریان، m/s |
| $W$ | نیروی وزن، N |
| $x$ | محور جهت جریان |
| $y$ | محور عرضی عمود بر جهت جریان |
| $z$ | محور ارتفاعی عمود بر جهت جریان |
| $\beta$ | ضریب اصلاح اندازه حرکت |
| $\theta$ | زاویهٔ اریب کانال |
| $\tau_b$ | تنش برشی مرزی، $N/m^2$ |
| $\rho$ | جرم مخصوص آب، $kg/m^3$ |

## مراجع


1. Sellin, R. H. J., "A Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and that Over its Flood Plain", *La Houille Blanche*, Vol. 7, pp. 793-802, (1964).
2. Tominaga, A., and Nezu, I., "Turbulent Structure in Compound Open-channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 21-41, (1991).
3. Chlebek, J., "Modelling of Simple Prismatic Channels with Varying Roughness Using the SKM and a

Study of Flows in Smooth Non-Prismatic Channels with Skewed Floodplains", Birmingham University, (2009).

4. James, M., and Brown, B. J., "Geometric Parameters that Influence Floodplain Flow, Waterways Experiment Section", Hydraulics Laboratory, Department of Defense, US Army Corps of Engineering, Report H-77-1, Vicksburg, Mississippi, (1977).
5. Jasem, H. K., "Flow in Two-Stage Channels with the Main Channel Skewed to the Flood Plain Direction", University of Glasgow, (1990).
6. Ervine, D. A., and Jasem, H. R., "Observation on Flows in Skewed Compound Channels", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, Maritime and Energy*, ICE, Vol. 112, No. 3, pp. 249-259, (1995).
7. Dolati Mahtaj, M., "Experimental Study of Flow in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains", Bu-Ali Sina University, (2021). (In Persian)
8. Elliott, S. C. A., and Sellin, R. H. J., "SERC Flood Channel Facility: Skewed Flow Experiments", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 2, pp. 197-214, (1990).
9. Sellin, R. H. J., "Hydraulic Performance of a Skewed Two-Stage Flood Channel", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 33, No. 1, pp. 43-64, (1995).
10. Seif, M. M., and Rezaei, B., "Numerical Study on the Effects of the Floodplains Angles on Interaction between the Main Channel and Floodplains in Skewed Compound Channels", *journal of Ferdowsi Civil Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 151-164, (2019). (In Persian)
11. Elliott, S. C. A., "An Investigation into Skew Channel Flow", University of Bristol, (1990).
12. Chlebek, J., Bousmar, D., Knight, D. W., and Sterling, M., "A Comparison of Overbank Flow Conditions in Skewed and Converging/ Diverging Channels", *Proceedings of the River Flow 2010*, Braunschweig, Germany, Vol. 1, pp. 503-511, (2010).
13. Bousmar, D., Jacqmin, T., Wyseur, S., and Van Emelen, S., "Flow in Skewed Compound Channels with Rough Floodplains", Proceedings of the River Flow 2012, San Jose, Costa Rica, Vol. 1, pp. 217-224, (2012).
14. Rezaei, B., and Knight, D. W., "Overbank Flow in Compound Channels with Non-Prismatic Floodplains", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 8, pp. 815-824, (2011).
15. Rezaei, B., "Overbank Flow in Compound Channels with Prismatic and Non-Prismatic Floodplains", Birmingham University, (2006).

The figure show that the lateral distributions of the depth-averaged velocity and boundary shear stress are asymmetric and follow the same trend.

Using the experimental data and based on the force and momentum balance for control volume on the converging and diverging floodplains, the apparent shear forces at the vertical interface between the main channel and floodplains are calculated. The perspective view of the control volume on the converging floodplain is shown in Figure 4.

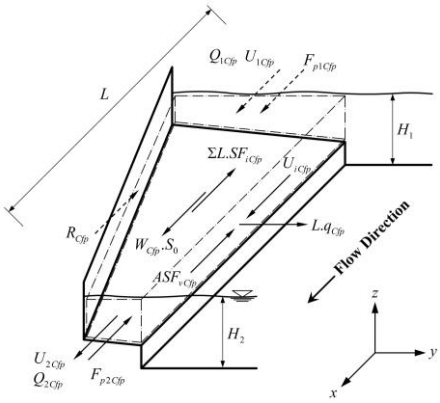



Figure 4. Control volume between two consecutive sections on the converging floodplain

The force balance for the control volume on the converging floodplain (Figure 4) is as follow:

$$F_{p1Cfp} - F_{p2Cfp} + W_{Cfp}S_0 - \sum LSF_{iCfp} - R_{Cfp} - ASF_{vCfp} = \rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp} - \rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp} + \rho U_{iCfp}q_{Cfp}L \quad (1)$$

where $F_p$ is the hydrostatic pressure force, W is the weight force, $S_0$ is the bed slope, L is the control volume length, SF is the shear force per unit length, R is the wall reaction force, □ is the momentum correction coefficient, □ is the water density, U is the average velocity, Q is the flow discharge, $U_i$ is the velocity at the interface between the main channel and the floodplain, q is the lateral flow per unit length, and $ASF_v$ is the apparent shear force at the interface between the main channel and floodplain. Also the subscript Cfp refers to converging floodplain,

The apparent shear forces acting at the vertical interface between the main channel and floodplains for the skew angels of 11.31° (SCIF-2) and 3.81° (SCIF-6) and different relative depths are calculated and shown plotted in Figure 5.

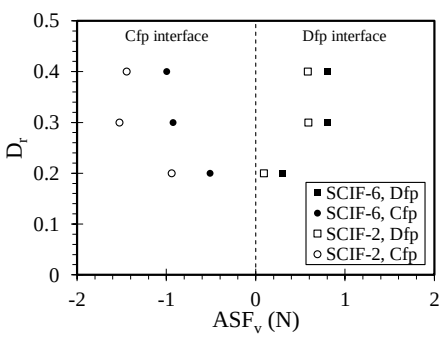



Figure 5. The apparent shear forces at the vertical interface between the main channel and floodplains for SCIF-2 and SCIF-6

Also the effects of floodplains lateral slope on force and momentum balances in the main channel and on the skewed floodplains have been investigated. To do so, the apparent shear forces at the vertical interface between the main channel and floodplains for different discharges and the skew angle of 3.81° (SCIF-6) have been calculated and compared with Chlebek (2009) (experimental study on skewed compound channels with the horizontal floodplains). See Figure 6.

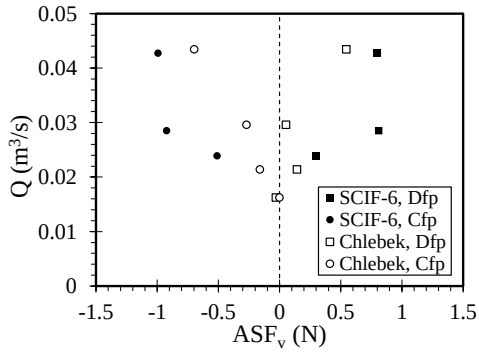



Figure 6. The apparent shear forces at the vertical interface between the main channel and floodplains for the compound channel with the skew angle of 3.81o (SCIF-6) and Chlebek's results (2009)

## 4. Conclusion

An experimental study of flow field in skewed compound channels with inclined floodplains was conducted. Experiments were performed in compound channel with two skew angles of 11.31° and 3.81°, and three relative depths of 0.2, 0.3, and 0.4. Using the experimental data and based on force balance, the interaction between flow in the main channel and on the floodplains were studied. Some of the most important results of the research are given as follows:

1. In the skewed compound channels, the lateral distribution of depth-averaged velocity and boundary shear stress at the middle of the skewed portion is asymmetric.
2. On the diverging floodplain, flow velocity and shear stress are always greater than those values on the converging floodplain at the same section.
3. Apparent shear force at the vertical interface between the main channel and converging floodplain has a negative value and at the interface between the main channel and diverging floodplain has a positive amount. Therefore, the lateral flow that exchanges between sub-sections accelerate flow in both the main channel and diverging floodplain.
4. A comparison between the present results with Chlebek (2009) shows that the apparent shear forces at the vertical interfaces between the main channel and inclined floodplains are bigger than those in the skewed compound channels with the horizontal floodplain.

*Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.2, 2021.*

# Experimental Study of Force Balance and Interaction between Flow in the Main Channel and on the Floodplains in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains

Mostafa Dolati Mahtaj[1] Bahram Rezaei[2*]

## 1. Introduction

Investigation of the flow field in compound channels is an important issue for river engineers. In nature, due to topography conditions and geometry changes, most rivers have a non-prismatic compound cross-section. One of the non-prismatic compound channels is the skewed compound channel. In skewed compound channels, one of the floodplains is convergent, and the other is divergent. Along skewed compound channels, the flow leaves the converging floodplain and enters the main channel; on the other side, the flow from the main channel enters to the diverging floodplain. Therefore, the flow characteristics in skewed compound channels is highly complicated.

In this research, the flow field in skewed compound channels with inclined floodplains experimentally is investigated. In addition, the apparent shear forces on the vertical interface between the main channel and floodplains are studied by analyzing the force balance in the control volumes on the floodplains. The results of apparent shear forces are then compared with the skewed compound channel with horizontal floodplains.

## 2. Material and Methods

Experiments were performed on a flume of 18 m long, 1.2 m wide, 0.6 m deep, and bed slope of $1.63\times10^{-3}$, at the hydraulic laboratory of Bu-Ali Sina University, Department of Civil Engineering. This flume has a compound cross-section, consists of a rectangular main channel with 0.4 m wide and 0.05 m deep in the middle, and two inclined floodplains of 0.4 m wide and lateral side slope of 0.075(4.29° ) (see Figure 1).

Experiments were performed in compound channels with two skew angles of 11.31° and 3.81° (see Figure 2), and three relative depths ($D_r=\overline{H_{fp}}/H$, where $\overline{H_{fp}}$ is the average water depth on floodplains and H is the total flow depth in the main channel) of 0.2, 0.3, and 0.4.

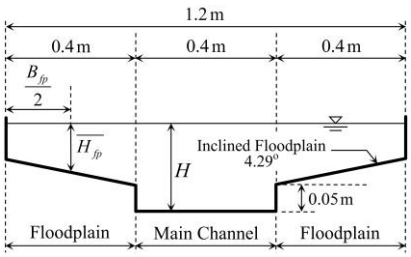



Figure 1. Cross-section of compound channel

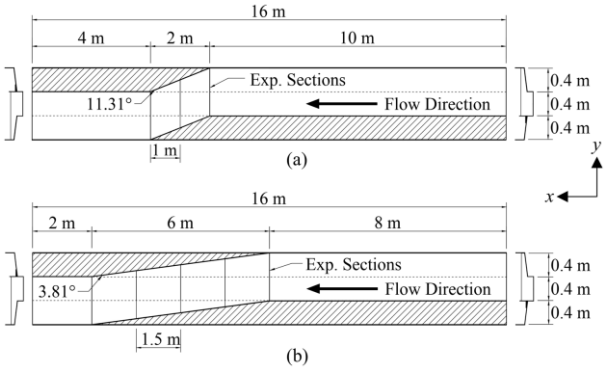



Figure 2. Plan view of the skewed compound channel with the skew angle of (a) 11.31° (SCIF-2) and (b) 3.81° (SCIF-6)

Using a three-dimensional (3D) Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), flow velocity were measured at different sections along the skew part of the flume. Also, boundary shear stress measurements, were performed by use of 4 mm Preston tube. Measurements were performed at three and five sections along the skew part for the compound channel with the skew angle of 11.31° and 3.81°, respectively.

## 3. Results and discussions

Lateral distribution of depth-averaged velocity ($U_d$) and boundary shear stress ($\tau_b$) at different sections for the skew angle of 3.81° (SCIF-6) are shown in Figure 3.

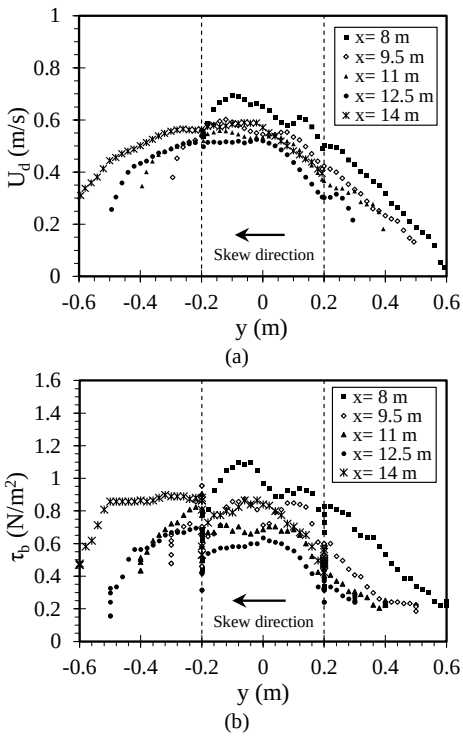



Figure 3. Lateral distribution of (a) depth-averaged velocity ($U_d$) and (b) boundary shear stress ($\tau_b$) in different sections for the compound channel with the skew angle of 3.81° (SCIF-6)

[1] M.Sc. in Water Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
[2] Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: b.rezaei@basu.ac.ir

ZSM-5. Experimental procedure was done using experimental method by response surface method (RSM).

## 3. Results and discussion

To better understanding of photo catalyst features, number of analytical experiments conducted on the synthesized composite. The morphology and elemental composition investigation of the ZSM-5/$TiO_2$-Ag was done using SEM – EDX (Quanta 200 FEI America). Results showed the existence of both silver and titanium in Ag/$TiO_2$ nanocomposite.

Figure (1) shows the X-ray diffraction patterns of Fe-ZSM-5/$TiO_2$-Ag recorded on the Philips, PW1730 (Netherland) diffraction system with Cu Kα radiation source at 40 kV and 40 mA. The peaks at 25.09- 37.65- 48.02- 53.89- 55.07- 62.38- 68.07- 70.07-75 are in agreement with JCPDS (no. 21-1272). Additionally, the peaks located at 38.01- 44.26- 64.02- 77.36 belongs to the Ag/$TiO_2$ photo catalyst having conformity with JCPDS (no. 04-0783).

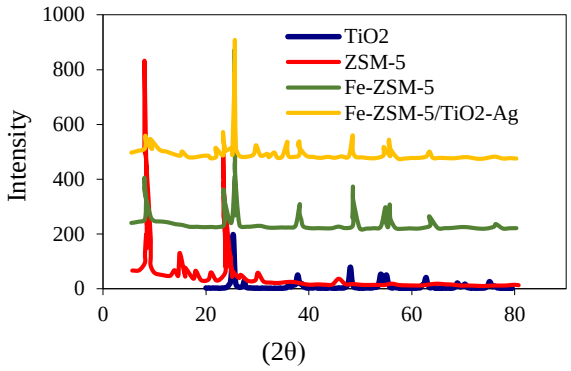
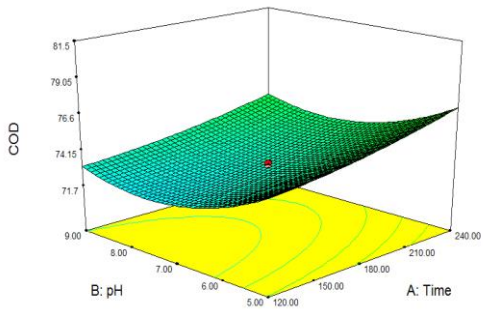
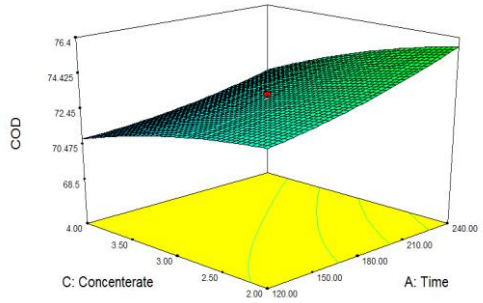



Figure 1. XRD spectrum of pure $TiO_2$ and ZSM-5/$TiO_2$-Ag

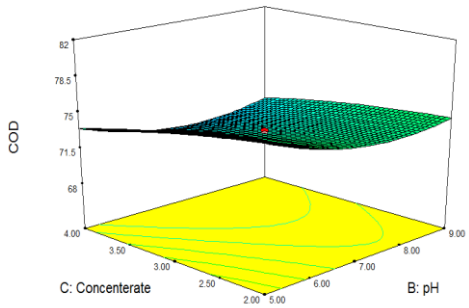
The pre-test experiments on pure $TiO_2$ and Fe-ZSM-5/$TiO_2$-Ag had shown that metal doped catalyst had higher photo catalytic activity than the pure $TiO_2$ to decontaminate wastewater. Then, the proposed experiments of software were conducted by adding 1 liter of the real petrochemical wastewater to the reactor and adjusting the primary operational treatment condition including the amount of photo catalyst dosage, pH of influent wastewater and contact time. The figures (2 a-c) are presented to show the photo reactor performance with respect to single and interactive variables effect.




a)




b)




c)

Figure 2. a: interactive impact of pH & contact time, b: interactive impact of contact time and catalyst dosage, c: interactive impact of pH & catalyst dosage

## 4. Conclusion

In this study, the synthesis of Ag/$TiO_2$ catalyst was successfully conducted and immobilized on the zeolite. The effects of main parameters containing pollutant concentration, photocatalyst concentration, pH, reaction time, radiation wavelength and different photocatalysts were performed in a batch pilot. The uniformity of the nanoparticles was also revealed in the SEM images, showing that the Ti and silver particles were well on the surface of the Fe-ZSM-5 zeolite. The results show that at pH=5 and the photocatalyst dosage of Fe-ZSM-5@$TiO_2$-Ag equal to 2 g/L under UV-A irradiation at 54 watts and 240 min contact time the best COD removal performance equal to 83% were achieved. The immobilization of Fe-ZSM-5 zeolite increases the removal efficiency of organic matter in aqueous medium. The synthetic photocatalyst can be used up to 5 times without reducing performance.

*Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.2, 2021.*

# Treatment of Petroleum Wastewater Using Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag Nano Photocatalyst

Mohammad Delnavaz[1] Kiarash Eshaghi[2]

## 1- Introduction

Petroleum wastewater contains a wide range of hard biodegradable pollutants that are not treated by conventional treatment methods. Recently, plenty of research focus on assessing different ways of industrial discharge treatment. This attention is largely due to the huge water consumption of the majority of industrial factories as well as generating more complex wastewater than domestic one. Among industries, petrochemical wastewater largely contains different kind of organic persistent matter like hydrocarbons, various aromatic compounds and phenol. The criteria of these compounds categorize them as a non-biodegradable and toxic for receiving aquatic ecosystem. Harmful effects of these pollutants on the environment require the use of high-efficiency and low-cost processes.

Photocatalytic process is one of the advanced oxidation processes (AOP) that is used to decompose stable organic matter in petrochemical wastewater. In order to become practical in large scale, it should be enabled to adsorb extending wavelength light such as sun light. To overcome this issue, plenty of strategies have been examined and published in research papers. Photocatalytic performance of specific nanomaterial relies on the grain size, morphology, optical property and so on. The huge efforts have been made to either reduce recombination rate of $e^-/h^+$ or increase visible region efficiency of $TiO_2$. For this purpose, modifying the surface of nanoparticles with other semiconductors such as graphene and ZnO is recommended to improve electron transfer. Nevertheless, literatures suggest that the contact of noble metals like Au, Pt, Pd and Ag as a doping materials with semiconductors could obviously promote decontamination rate of numerous pollutants from aqueous solution. Noble metal deposition on the surface of $TiO_2$ increase the available active sites for adsorption properties improvement and charge transfer to increase electron-hole generation for much effective interaction with organic matters. Among noble metals, silver is relatively cheaper and stable than the rest of noble metal mentioned, above.

Catalyst Immobilization on the particular media has been growing. This trend is largely owing to that in the slurry method, the separation of suspended catalyst in the aqueous solution is just possible through either filtration or taking time to be settled. These drawbacks make researchers to consider fixing catalyst on the particular media. In this way, a huge number of researches have been focused on either moving media such as glass plate, or immobilized media like concrete surface.

In this study, the photocatalytic degradation of organic pollutants in the petroleum wastewater were investigated using Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag synthetic nano-photocatalyst.

## 2. Material and Methods

The real wastewater was withdrawn from the petrochemical treatment plant located in the west of Iran. The wastewater was immediately transported to the lab and then, kept in refrigerator to maintain its temperature at 4℃ to prevent further biological decomposition. The raw petrochemical wastewater analysis was conducted and the results are reported in table 1.

Table 1 Characteristics of petroleum wastewater.

| Parameter | Value |
|---|---|
| pH | 7 |
| COD | 4150 mg/L |
| TBOD | 3725 mg/L |
| TS | 2216 mg/L |
| TDS | 2101 mg/L |
| TSS | 115 mg/L |
| FSS | 87 mg/L |
| VSS | 28 mg/L |
| Density | 0.832 |
| Turbidity | 110 NTU |

The reactor of the photocatalytic process consists of two UV-A lamps provided in the outside of the reactor. An aeration pump with the power of 2 l/min placed in the bottom of the reactor. The aluminum foil was used for covering the entire reactor to ensure UV emitted to the sample and safety considerations. Before the required volume of the wastewater injected into the reactor, the wastewater barrel was shaken to feed the reactor with homogenous wastewater. Then, after the pH adjustment, the UV-A lamps switch on and at the specific time intervals the COD measurement was conducted. The rate of organic matter photo degradation at the outlet of the reactor was monitored through COD test according to colorimetric method (5220-D). In addition, the pH value was also recorded by HACH portable probe. All required chemicals containing $TiO_2$, silver nitrate, sodium hydroxide, hydrochloric acid, dichromate potassium, silver sulfate, for pH adjustment, COD measurement and catalyst synthesis were prepared from Merck.

Synthesis of nano photocatalyst was done by immobilizing iron on zeolite to improve ZSM-5 structure and then $TiO_2$ and Ag coated to reduce the band gap energy. Physical and chemical properties of the materials determined by XRD, SEM, FT-IR and BET analyzes. $TiO_2$ in the anatase phase was shown using XRD analysis. The uniformity of the nanoparticles was also revealed in the SEM images, which showed that the $TiO_2$ and Ag particles were well located on the surface of Fe-

[1] Corresponding author. Associate professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University. Email: delnavaz@khu.ac.ir

[2] MSc student in environmental engineering, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University.

**Step 1:** Randomly initialize the location of the Fruit-Fly swarm.

**Step 2:** Each individual searches for food in a random direction and distance around the swarm location using osphresis to generate a new population.

**Step 3:** Evaluate all the new individuals.

**Step 4:** Identify the best Fruit-Fly with the maximum smell concentration value (i.e., the best objective), and then the Fruit-Fly group flies towards the best location utilizing vision.

**Step 5:** End the algorithm if the maximum number of iterations is reached; otherwise, go back to Step 2.

***2.3. Analysis.*** The aim of this study was to use the new meta-heuristic algorithms of GWO and FFOA to indirectly estimate uniaxial compressive strength. To achieve this goal, data from 124 granite rock samples from the Selangor freshwater transfer tunnel project in Malaysia, including the results of point load index (Is (50)), Schmidt hammer return values (Rn), wave velocity p (Vp) (As input parameters) and uniaxial compressive strength (as output parameter) were used. To evaluate and validate the models obtained by intelligent algorithms, the indices of square correlation coefficient ($R^2$), variance inclusion (VAF), mean absolute error percentage (MAPE), root mean square error (RMSE), and mean square error (MSE) were used. According to the results obtained in this paper as well as the validation of the models, the predicted values of uniaxial compressive strength by the new metamorphosis algorithms of GWO and FFOA are very close to the real values of the region, indicating the low error of the models in indirect estimation of the uniaxial compressive strength.

## 3. Conclusion

After creating the models (prediction relationships) using coding in MATLAB software, in order to validate this model, the indices of $R^2$, VAF, MAPE, RMSE, and MSE were used for each of the algorithms, training, and test data. The validation results showed that the prediction relationships made by the meta-heuristic algorithms of GWO and FFOA with the actual values obtained are very close and have high accuracy. After validating the model, @Risk software was used to evaluate the sensitivity analysis. The results showed that the Rn parameter will have the greatest effect on uniaxial compressive strength compared to other parameters. Finally, it can be reliability method, with a linear approximation of the limit state surface, does not make accurate predictions. As the Monte Carlo simulation requires a large amount of random data (n=280000) and replication of the simulation to reduce the changes in the probability of failure and to achieve a high-precision answer, for the present problem the second order method at a much lower computational cost is an alternative.

*Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.2, 2021.*

# Indirect Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Using New Meta-Heuristic Algorithms

Hadi Fattahi[1] Farshad Malekmahmoudi[2]
Hossein Ghaedi [2]

## 1. Introduction

The uniaxial compressive strength (UCS) of rock is very important parameter for rock classification and the design of structures either upon or inside rocks. In addition, this parameter is essential for judgment about their suitability for various construction purposes. However, determining UCS of a rock material is time consuming and expensive and involves destructive tests. Therefore, indirect test is often used to predict the UCS. Many researchers have attempted to find alternative and indirect methods for estimating UCS using different methods.

Although previous efforts are valuable, in many cases, the aforementioned empirical models are not capable of distinguishing the sophisticated structures involved in dataset. These reasons have been the main causes of the interest to better find out the interaction between UCS and input parameters and to propose a more precise and sure models for the estimation of the UCS. For doing the purpose, using developed methods such as meta-heuristic algorithms, which can successfully model the behavior of linear and nonlinear involved in data, is useful. In this study, the application of meta-heuristic algorithms for data analysis named gray wolf (GWO) and fruit fly algorithm (FFOA) to estimate UCS of rocks is demonstrated. In these models, point load index (Is (50)), Schmidt hammer return values (Rn), wave velocity p (Vp) are utilized as the input parameters, while UCS of rocks is the output parameter. The estimation abilities offered using meta-heuristic algorithms are presented by using experimental data given in open source literatures.

## 2. Analysis and results

***2.1. Gray wolf algorithm.*** The GWO is a new bio-inspired heuristic optimization algorithm that imitates the way wolves search for food and survive by avoiding their enemies. This algorithm divides the population into four groups: delta, omega, beta, and alpha. In addition, the three hunting stages are simulated: attacking prey, looking for prey, and encircling prey. The GWO algorithm needs a parameter number to be set, which includes initialize alpha, the stopping criteria, the sites selected number for neighborhood search, the search agents number, delta, the maximum iterations number, and beta. Figure 1 depicts the GWO's pseudo code.

```
Initialize the grey wolf population X_i (i = 1, 2, ..., n)
Initialize a, A, and C
Calculate the fitness of each search agent
X_α=the best search agent
X_β=the second best search agent
X_δ=the third best search agent
while (t < Max number of iterations)
    for each search agent
            Update the position of the current search agent
    end for
    Update a, A, and C
    Calculate the fitness of all search agents
    Update X_α, X_β, and X_δ
    t=t+1
end while
return X_α
```

Figure 1. Pseudo code of the GWO algorithm

***2.2. Fruit fly algorithm.*** An approach to solve the FFOA is an intelligent search algorithms based on foraging behaviors of the Fruit-Fly, Drosophila. The FFOA has immense potential to deal with the variety of complex optimization problems. These processes are Smell and Sensitive Vision. Through Smell process, Fruit-Fly smells the food source available in the surrounding by osphresis organ, which is a function of stochastic in nature, and flies towards the corresponding location. The perception of fruit flies is better than other species, and fruit flies can smell food sources 40km away. They also possess extremely strong perception and search ability for various smells in the air, and they can find food and companies with keen vision near the food, so as to fly to the destination smoothly. With favorable group intelligence, FFOA is widely applied to various fields, especially on function optimization, neural network, support vector regression parameter optimization, financial management, and early warning of enterprise risks. Of course, as FFOA is a newly proposed algorithm, theories about it are still in exploration, and its application fields need to be further promoted. Figure 2 shows the procedure of a Fruit-Fly group's food finding behavior.

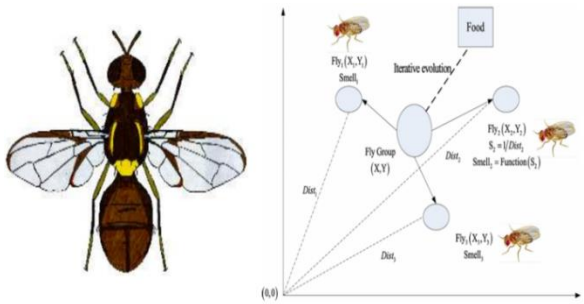



Figure 2. Group iterative foraging process of Fruit-Fly
The procedure of the original FFOA is given below.

[1]. Corresponding author. Associate Professor in Rock Mechanics Engineering, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Iran. Email: H.fattahi@arakut.ac.ir

[2]. MSc. Student, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Iran

There are two boundary layers of turbulence in the theory of the boundary layer of flow in open channels. In the turbulent inner boundary layer, the velocity profile follows the law of the wall and is expressed by Equation 1 as following:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln(\frac{z}{k_s}) + B_r \qquad (1)$$

Shear velocity is used to analyze the velocity profile theory. In this study, the Boundary characteristics method, which was first proposed by Afzali Mehr and Anctil (2000) for gravel-bed rivers, was used.

The purpose of estimating flow resistance in this study is to investigate the relationship between flow resistance with emphasis on Manning, Chezi, Darcy–Weisbach coefficient and Drag coefficient and geometric dimensions of flexible submerged vegetation patches in the presence of 3D bedforms in a gravel-bed river. Most studies on flow resistance under artificial vegetation conditions have been performed in the laboratory and the effect of natural vegetation has been less studied.

The primary physical parameter affecting the flow resistance is the Blockage Factor (BF) which is defined as the ratio of the front area of the vegetation patches perpendicular to the flow direction to the flow cross-sectional area.

In this study, the relationship between Drag, Manning, Chezi and Darcy–Weisbach coefficients as Resistance Coefficients (RC) with BF has a correlation coefficient greater than 0.8 with the power equation in the form of Equation 2 as following:

$$\mathrm{RC} = \mathrm{m}\, exp(n\mathrm{BF}) \quad \mathrm{R}^2 \geq 0.8 \qquad (2)$$

**3. Conclusion**

In this study, the velocity profile in different sections of a gravel-bed river in the presence of 3D bedforms and irregular distribution of natural submerged vegetation patches was studied. Moreover, power equations were also proposed as a function of Blockage Factor to estimate the flow resistance.

The results of this research suggest that the presence of submerged vegetation patches on the 3D bedforms can significantly change the velocity global distribution terms including flow velocity, shear velocity, Von Karman constant which results in different estimations of flow resistance.

Von Karman constant is changed by vegetation and 3D bedforms, though it cannot be considered equal to 0.4. The value of Von Karman constant in this study ranged from 0.18 to 0.39. Accordingly, the presence of 3D bedforms and irregular distribution of natural submerged vegetation patches reduces this amount in the gravel-bed river.

The relationship between flow resistance coefficient and the Blockage Factor was calculated with a correlation coefficient of 0.8 by the power equation. This nonlinear relationship can be due to the presence of 3D bedform, irregular distribution of natural submerged vegetation patches, and non-uniformity of bed particles (uniformity coefficient greater than four around the vegetation patches) in the bed river.

Chezi coefficient with a relatively high correlation coefficient compared with other resistance coefficients can be a good representative of the flow resistance in this gravel-bed river.

*Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.2, 2021.*

# Resistance to Flow in a Cobble-Gravel-bed River with Irregular Vegetation Patches and Pool-Riffle Bedforms (Case study: Padena Marbor River)

Kourosh Nosrati [1] Hossein Afzalimehr[2]

Marwan Hassan[3] Masoud Kazem[4]

## 1. Introduction

The interaction of river flow and vegetation is very complicated and influenced by various environmental and hydraulic factors such as vegetation characteristics, water temperature, average flow velocity, turbulence, river morphology, bed particle distribution, and river bedforms.

The extensive investigation of the interaction of river flow and vegetation distribution is of considerable importance for river engineering projects.

Recent years have seen an enormous growth of interest in the role of vegetation in sediment transport, water pollution, aquatic habitat and environmental factors. Moreover, a review of flow resistance studies in recent decades of vegetated channels shows that there are many theoretical and conceptual approaches in this regard.

There is a general view that resistance coefficients such as Manning coefficient, Chezi coefficient, and Darcy–Weisbach coefficient depend upon the number of factors such as hydraulic parameters (Reynolds Number, Froud Number and relative depth), bed materials (particle diameter), bedforms, channel geometry, and the dimension of vegetation patches. The quantification of these parameters has been less studied in river engineering subjects. On the other hand, the effect of vegetation patches on flow structure in the presence of 3D pool riffle bedforms in gravel-bed rivers is not still transparently obvious and the depth of validity of logarithmic law, Von Karman constant changes, and estimation of flow resistance have been less considered.

This study was intended to examine the characteristics of velocity profile in the presence of 3D pool riffle bedforms with irregular vegetation patches in a gravel-bed river and to present a semi-analytical relationship of flow resistance.

## 2. Study area and measurements

The data were collected in four different sections of Padena Marbor River in the south of Isfahan province in summer 2020. The first, second and third sections include the bedforms of large-scale pool and riffle. The first section does not have any vegetation patches in the bed and the second and third sections include vegetation patches in the bed on the right and left of the river, respectively. Figure 1 shows the selected sections for collecting data (A-section, B-section, C-section and D-section) in the Marber Padena River. Moreover, a total station for topographic surveying was used.

Figure 1. Data gathering in Padena Marbor River. A: first section, B: second section, C: third section, and D: fourth section

Bed grading was performed by Wolman method. Flow velocity was measured by Micro Current Meter (MCM) with an accuracy of 0.1 m/s to plot the velocity profile. The measurement time was 30 seconds. In order to increase the accuracy of the experiments, three repetitions were performed at each point. A total of 39 velocity profiles were drawn in the various points of every section.

The predominant flexible submerged vegetation patches are Algae that grow on the riverbed. The Algae can be found abundantly in the Marber Padena river bed that is show in Figure 2. Algae are defined as a group of predominantly aquatic, photosynthetic, and nucleus-bearing organisms that lack the true roots, stems, leaves, and specialized multicellular reproductive structures of plants.

Figure 1. Algae in the Padena Marbor River bed

[1].Corresponding author. PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Email: Kourosh_Nosrati@civileng.iust.ac.ir

[2]. Professor, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

[3]. Professor, Geomorphology Geography Department, The University of British Columbia Vancouver Campus

[4]. PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

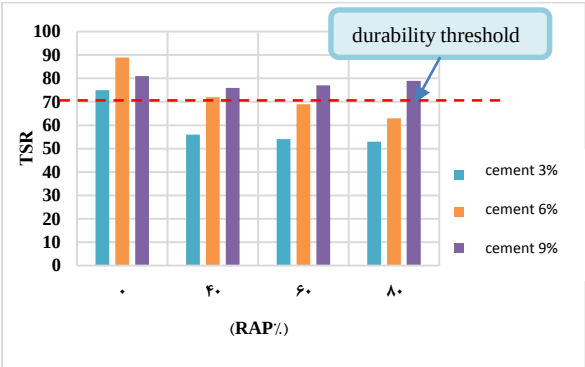



Figure 1. Qualified mixtures in terms of durability

The cost of pavement construction is model based on pavement thicknesses (calculated based on different materials properties and level of traffic loads), and some field assumptions (i.e. transport distance, etc.) according to Iran price list code for the road, railway, and airport runway and presented in equation 3.

$$\begin{aligned}\text{Costs} = 34267.74 + 1.098 * \text{RAP}^2 - 201.00 \\ * \text{Rap} + 33.793 * \text{RAP} \\ * \text{Cement} - 1078.61 \\ * \text{Cement} + 191.454 * \text{ESALs}\end{aligned} \tag{3}$$

As shown in Equation 4, the minimum answer for the cost model is solved subject to the present conditions.

$$\begin{aligned}\text{Costs} = 34267.74 + 1.098 * \text{RAP}^2 - 201.00 \\ * \text{Rap} + 33.793 * \text{RAP} \\ * \text{Cement} - 1078.61 \\ * \text{Cement} + 191.454 \\ * \text{ESALs}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{TSR} = 47.49 - 1.116 * \text{Cement}^2 + 0.0033 \\ * \text{Rap}^2 + 13.029 * \text{Cement} \\ - 0.769 * \text{RAP} + 0.061 \\ * \text{RAP} * \text{Cement}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&100 \geq \text{TSR} \geq 50 \\ &3 \leq \text{Cement} \leq 7 \\ &0 \leq \text{RAP} \leq 80 \\ &10E6 \leq \text{ESALs} \leq 50E6\end{aligned} \tag{4}$$

In this regard, the minimum acceptable TSR is 70 and the maximum is 100. In addition, other added conditions are the limits of changes in RAP materials, cement, and loading. In this study, Excel Solver was used to optimize the cost Equation. In order to extract all possible answers, the range of TSR was considered larger than the recommended limits (100≥TSR≥70). The minimum cost of the pavement construction based on TSR range 50 <= TSR <= 100, is shown in Table 1.

Table 1. Minimum cost model response

| TSR | RAP | Cement | cost |
|---|---|---|---|
| 55 | 51.93 | 3 | 30,734.21 |
| 60 | 38.93 | 3.14 | 30,767.75 |
| 65 | 34.33 | 3.60 | 30,869.88 |
| 70 | 29.60 | 4.15 | 30,869.07 |
| 75 | 24.89 | 4.93 | 30,687.91 |
| 80 | 15.88 | 6.27 | 29,868.37 |
| 85 | 0 | 6.51 | 29,151.53 |

In this case, there is no optimal point cost for TSR smaller than 55 and larger than 85 functions. According to Table 1, by reducing the TSR limit, more RAP and less cement can be used for the construction of pavement layers with cement stabilized base layer containing RAP. It should be noted that the trend of changes in the minimum response of the cost model is not linear and has a maximum with a quadratic power at TSR = 65.

## 4. Conclusion

The results of this study can be used in the design of durable and economical pavement structures Contains a stabilized base with cement and various amounts of RAP. In this regard the main result is presented below:

The optimum cost, which is a function of the loading level, was obtained in the amount of 29.6% of RAP, 4.16% of cement, and in the minimum loading level.

*Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.2, 2021.*

# Economic and Durability Optimization of Asphalt Pavement with Cement Stabilized Base Mixtures Ardakan-Naeen case study

Mostafa Adresi[1]

## 1. Introduction

One of the most important issues for road engineers is finding the proper properties for the stabilized layer containing reclaimed asphalt pavement (RAP) in the process of pavement structural design. Finding the optimum answer for the pavement layers thickness design treated by different binders (cement, bitumen, or emulsion) with or without RAP materials is the important step in pavement economical design. To have the most economical performance in process of pavement design, choosing the right percentage of RAP and different binders in the mixture for soil treatment are two critical points that should be considered. First, will decrease the cost of implementing while the second will increase the structural strength that will help to decrease the thickness of the pavement layers.

One of the most important applications of RAP is its use in the base layer, which can significantly reduce the use of natural materials amounts, the price of materials used, their transport fee. In addition, due to the thin layer of bitumen around RAP, the internal bonding with natural aggregates occurs and increases the structural performance of stabilized layer that helps to decrease the layer thickness.

Strength characteristics of cement-stabilized base layer are the effective factors in pavement thickness design layers. The compressive and tensile strength of the mixtures are the most common when strength characteristics are considered. In addition the structural performance, the mixture should be satisfied the durability threshold.

The allowable range of unconfined compressive strength between 300 and 500 psi has been proposed among different authorities. A maximum of 500 psi has been set to control the rigidity of the stabilized layer, prevent cracking in the stabilized layer and reduce the risk of reflective cracking in the surface layer.

According to the Institute for Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), the minimum TSR for cold recycled asphalt mixtures (CRAM) should be 0.70, however, it may be reduced to 0.60. ARRA also stated that the minimum of the indirect tensile strength (ITS) for CRAM at 25 °C should be 310 KPa.

According to previous studies, the allowable threshold for unconfined compressive strength is considered as an acceptance criterion in pavement structural design. The point to be noted here is the limited studies that examine the issue of durability and its impact on the mixing design and determine the optimal amount of RAP and cement binder when the stabilized layer is considered. The innovation of this research is determining the percentage of RAP and optimal cement binder in the cement-stabilized base mixtures under a wide range of traffic loading, taking into account the two perspectives of durability and whole pavement construction cost simultaneously.

## 2. Experimental program

In this research, compressive and tensile strength was obtained in different percentages of RAP, including 0%, 40%, 60%, and 80%, and indifferent percentages of cement, including 3%, 5%, and 7%. The structural design of the pavement was further determined under 10, 20, 35, and 50 million ESALs. By establishing the relationship between the percentages of RAP, percentage of cement, and moisture sensitivity index (TSR) as an effective parameter in durability, and the cost of paving at different loads, a simultaneous cost-durability equation of pavement was formed. Finally, based on the optimization technique, the optimal percentage of RAP and cement for achieving the expected durability (TSR = 70) was determined.

## 3. Results and discussion

Based on the results of the laboratory phase, a suitable relationship between the unconfined compressive strength of cement stabilized base containing the RAP can be obtained related to these two variations as presented in equation (1).

$$\mathrm{UCS} = 4.350 - 0.062 * \mathrm{Rap} + 0.583 * \mathrm{Cement} \tag{1}$$

Using equation (1) and the relationship presented by Van Teel equation, the resilience modulus and the layers structural coefficients related to the cement-stabilized base containing different amounts of RAP, can be calculated, and finally, the thickness design under different loading levels achieved.

Considering the results of indirect tensile strength tests in dry and wet conditions and determining the TSR parameter, the durability equation can be obtained as described in equation (2).

$$\mathrm{TSR} = 47.49 - 1.116 * \mathrm{Cement}^2 + 0.0033 * \mathrm{Rap}^2 + 13.029 * \mathrm{Cement} - 0.769 * \mathrm{RAP} + 0.061 * \mathrm{RAP} * \mathrm{Cement} \tag{2}$$

In the above equation, TSR is defined as a durability criterion (i.e., 70), "Cement" is the percentage of cement in the stabilized mixture and, "Rap" is the percentage of RAP.

Considering the durability threshold equal to TSR=70 and plotting the durability number of different mixtures in Figure 1, only the codes R3, R5, R7, R407, R405, R607, R607, and R807 meet the durability criteria.

[1]. Assistant Professor, Civil Engineering Department of Shahid Rajaee Teacher Training University. Email: m.adresi@sru.ac.ir

$P_j^{Damaged}$, $P_j^{Undamaged}$, improves the accuracy of damage identification,

$$RWE = -\sum_j P_j^{Damaged}\, Ln\left(\frac{P_j^{Damaged}}{P_j^{Undamaged}}\right) \qquad (6)$$

For an undamaged structure, the wavelet energy for damaged will be equal to undamaged condition, $P_j^{Damaged} = P_j^{Undamaged}$ . Therefore, the RWE value will be zero, but a damage will change the response signal, and as a result, the RWE value will increase. The computational algorithm is displayed in Table 1.

## 3. Conclusion

In this study, a method for identifying damages based on discrete wavelet entropy was proposed and evaluated. In order to show efficiency of the introduced damage index for this wavelet, efficiency of the proposed algorithm in the 3D construct model was explored. Then, the possibility of using this algorithm in some damage scenarios were investigated and damages were correctly identified.

The results of using this identification method can be summarized as follows:

1. The proposed algorithm and the indicator have ability to accurately identify location of damage;
2. In each individual and multiple samples of damage, all damaged degrees can be successfully identified in each damage scenarios;
3. The proposed entropy index in healthy freedom degrees is not affected by damage in adjacent freedom degrees, but changes can be a good guide to the next stages of evaluation.

It should be noted that one of the advantages of discrete wavelet conversion is less computational effort than Fast Fourier Transform (FFT). Furthermore, applying the concept of wavelet entropy in discrete wavelet transforming process will improve the accuracy of damage detection process. These capabilities have a very effective role in practical process of damage assessment in a structure.

Table1. Computational algorithm

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Start | | | | |
| | Extract node Acceleration for damaged and undamaged structures | | | |
| | Repetition of this loop for undamaged structure and damaged structure | | | |
| | | Loop repetition for all acceleration in the examined degrees of freedom | | |
| | | | **Start Damage Identification** | |
| | | | Loop repetition on the scale examined for *n* scales 1, *2*, ..., *n* | |
| | | | | Calculation of vector components $A_n$ |
| | | | | Calculation of vector components $D_1, D_2, \ldots, D_n$ |
| | | | | Calculation of energy functions $E_1, E_2, \ldots, E_n$ |
| | | | | Calculation of total energy function $E_{tot}$ |
| | | | | Calculation of energy ratio$P_1, P_2, \ldots, p_n$ |
| | | | | Calculation of damage function in all degrees *RWE* |
| | | Identify maximum damage functions in checked degrees of freedom and detect damaged degrees of freedom | | |
| the end | | | | |

*Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.2, 2021.*

# Structures Multi-Damage Detection by Discrete Wavelet Entropy Method

Milad Ashurzade Moghri[1] Ali Bigleri Fadafan[2]

## 1. Introduction

Identification of infrastructure damages in early stages is one of the most fundamental requirements in the maintenance process. In order to identify damages in the process of Structural Health Monitoring, numerous methods have been developed, including Neural Network (NN) Damage Identification Techniques, Time Series Damage Identification Techniques, Frequency Response Damage Identification Techniques, Force Spectrum Density Damage Identification Techniques, and Wavelet Damage Identification Techniques.

In this study, damage detecting method in the structure is proposed based on the concept of wavelet entropy, using discrete wavelet data analysis. Then, the proposed method for identifying damaged points in seismic analysis process of 3D structure was evaluated.

## 2. Discrete relative wavelet entropy in damage identification

Complex signals analysis by an acceptable rate is one of the discrete wavelets transform properties. In order to utilize discrete wavelet transform properties, it is necessary to increase the accuracy of identification function leading to an increase in the quality of damage detection. In discrete wavelet transform, the input signal is analyzed by considering the mother wavelet function, while input signal is decomposed to low frequency $LF(k)$ and high frequency $HF(k)$ signals, using low and high frequency filters. These filters are designed to extract data in the predefined range to precisely control the process at different scales.

$$\Psi_{(t)}^{2i} = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} HF(k)\Psi^{i}(2t-k) \ ; \tag{1}$$

$$\Psi_{(t)}^{2i+1} = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} LF(k)\Psi^{i}(2t-k) \ ; \tag{2}$$

By applying $n$ discrete wavelet scale, discrete wavelet coefficient signal is calculated for the last approximation ($A_n$) and other subgroups ($D_i; i = n, n-1, \dots, 1$). Each of these scales can be considered a separate subgroup of different lengths. The result structure is presented in Figure 1 for the scale 3.

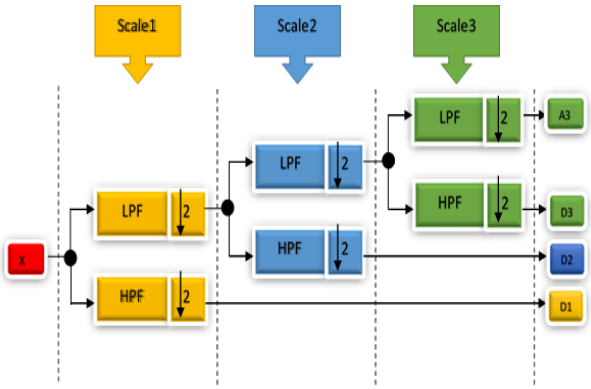



Figure 1. The computational structure of discrete wavelet transfer

When the main vibration signal is defined by $L$ components, $A_n$ composed of $\frac{L}{2^n}$ and ($D_i; i = n, n-1, \dots, 1$) composed of $\frac{L}{2^i}$ components. The vector of discretized wave components can be arranged as a matrix of scaled subgroups, respectively, increasing the frequencies as $C_{ji} = [A_N, D_N, D_{N-1}, \dots, D_1]$ for the scale $n$. Each of the $C_{ji}$ components vectors has $k$ arrays.

The signal energy for each subgroup, shown with $E_j$, is defined as squares of the components summation. It can be calculated for the entire length of the subgroups. This energy can be written as follows for the $k$ components,

$$E = [E_j] = [\sum_k |A_n(k)|^2 , \sum_k |D_j(k)|^2] \tag{3}$$

and total energy of wavelet shown by $E_{tot}$ defined as the summation of the energy vector components,

$$E_{tot} = \sum_k |A_n(k)|^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_k |D_j(k)|^2 \tag{4}$$

The wavelet energy ratio for the $j$ subgroup, represented by $P_j$ , can be defined as equation (5).

$$P_j = \frac{E_j}{E_{tot}} \quad j = 1,2, \dots . n \tag{5}$$

where $P_j$ is the wavelet energy percentage for the $j$ subgroup. The distribution of $P_1, P_2, \dots, P_N$ values is somewhat similar to an energy probability distribution, meaning that the summation of values is equal to one.

It can be shown that using wavelet entropy ratio, equation (6), for damaged and undamaged structure,

[1]. MSc. Student in Civil-Structural Engineering, Civil Engineering Department, Golestan University, Golestan, Iran
[2]. Corresponding author. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Golestan University, Golestan, Iran.
Email: biglari.a@gmail.com

## CONTENTS


| | | |
|---|---|---|
| Structures Multi-Damage Detection by Discrete Wavelet Entropy Method | M. Ashurzade Moghri - A. Bigleri Fadafan | 1 |
| Economic and Durability Optimization of Asphalt Pavement with Cement Stabilized Base Mixtures Ardakan-Naeen Case Study | M. Adresi | 17 |
| Resistance to Flow in a Cobble-Gravel Bed River with Irregular Vegetation Patches and Pool-Riffle Bedforms (Case study: Padena Marbor River) | K. Nosrati - H. Afzalimehr<br>MA. Hassan - M. Kazem | 35 |
| Indirect Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Using New Meta-Heuristic Algorithms | H. Fattahi - F. Malekmahmoudi<br>H. Ghaedi | 51 |
| Treatment of Petroleum Wastewater Using new Fe-ZSM-5@$TiO_2$/Ag Nano Photocatalyst | M. Delnavaz - K. Eshaghi | 71 |
| Experimental Study of Force Balance and Interaction between Flow in the Main Channel and on the Floodplains in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains | M. Dolati Mahtaj - B. Rezaei | 87 |

ISSN 2783-2805

Ferdowsi University of Mashhad

# Journal of Ferdowsi Civil Engineering

**Structures Multi-Damage Detection by Discrete Wavelet Entropy Method** 1
M. Ashurzade Moghri - A. Bigleri Fadafan

**Economic and Durability Optimization of Asphalt Pavement with Cement Stabilized Base Mixtures Ardakan-Naeen Case Study** 17
M. Adresi

**Resistance to Flow in a Cobble-Gravel Bed River with Irregular Vegetation Patches and Pool-Riffle Bedforms (Case study: Padena Marbor River)** 35
K. Nosrati - H. Afzalimehr
MA. Hassan - M. Kazem

**Indirect Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Using New Meta-Heuristic Algorithms** 51
H. Fattahi - F. Malekmahmoudi
H. Ghaedi

**Treatment of Petroleum Wastewater Using new Fe-ZSM-5@TiO2/Ag Nano Photocatalyst** 71
M. Delnavaz - K. Eshaghi

**Experimental Study of Force Balance and Interaction between Flow in the Main Channel and on the Floodplains in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains** 87
M. Dolati Mahtaj - B. Rezaei

Serial No. 34

Vol. 34, No. 2
Summer, 2020