

Damage assessments of reinforced concrete shear walls using visual features of surface crack patterns

Mohammadjavad Hamidia^{1*}, Sana Shahoveisi², Hamed Momeni³, Kiarash M. Dolatshahi⁴

1- Assistant Professor, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- B.Sc. in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- M.Sc. in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

The purpose of this study is to quantify the damage of reinforced concrete shear walls after the earthquakes. One of the most important tasks after earthquakes is to assess the buildings and make sure that they are safe to occupy. So far, this assessment is mostly conducted by visual inspection and measuring the crack width that is prone to error. Thus, automation of the damage assessment using image processing techniques can significantly improve the assessment accuracy. In this paper, a database comprising 236 images of 72 damaged walls at various drift levels is collected. The database covers a broad range of structural and geometric properties. The crack pattern associated with each wall and each drift ratio is one by one extracted manually, and the corresponding geometry indices of each crack pattern are calculated. The indices are assessed and the correlation with drift ratio is investigated. Finally, using symbolic regression, empirical equations are proposed that can predict the peak drift ratio that the wall has experienced during an earthquake using the crack pattern. Four scenarios are considered for obtaining the empirical equations. The predicted drift ratio along with fragility curves can finally be used to estimate the damage level of the walls.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 October 2021

Revise Date: 24 November 2021

Accept Date: 27 January 2022

Keywords:

RC shear walls

Nondestructive evaluation

Structural health monitoring

Surface crack patterns

Image processing

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.306462.2590>

*Corresponding author: Mohammadjavad Hamidia

Email address: m_hamidia@sbu.ac.ir

تخمین خرابی دیوارهای برشی بتن مسلح با استفاده از تصاویر الگوی ترک سطحی

محمدجواد حمیدیا^{۱*}، ثنا شاه‌اویسی^۲، حامد مومنی^۳، کیارش محتشم دولتشاهی^۴

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- کارشناس مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

هدف از این مقاله، تخمین سطح خرابی در دیوار برشی بتن مسلح مستطیلی به طور کمی، بعد از وقوع زلزله است. روش‌های ارزیابی غیرمخرب موجود در این راستا که شامل بازدید چشمی و اندازه‌گیری پیشینه عرض ترک است، با خطای زیادی همراه‌اند. بنابراین کمی‌سازی خودکار خرابی با استفاده از روش‌های پردازش تصویر می‌تواند به طرز شگرفی پایش سلامت سازه‌ها بعد از زلزله را بهبود دهد. در این مقاله، پایگاه داده‌ای متشکل از ۲۳۶ عکس از الگوی ترک سطحی دیوارهای برشی بتن مسلح مستطیلی جمع‌آوری شده است. این عکس‌ها از ۷۲ نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای به دست آمده‌اند. سپس الگوی ترک هر دیوار از روی تصویر مربوطه ترسیم شده است و شاخص‌های هندسه فراکتال برای تمامی عکس‌های موجود در پایگاه داده استخراج گردیده است. ارتباط شاخص‌های هندسه فراکتال و جابجایی نسبی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از شاخص‌های هندسه فراکتال روابط پیش‌بینی‌کننده برای میزان جابجایی جانبی نسبی بین طبقاتی ارائه شده است. در این راستا چهار سناریوی متفاوت برای ورودی‌های معادلات در نظر گرفته شده است. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای روابط پیشنهادی برای تخمین میزان جابجایی نسبی بین طبقاتی با استفاده از شاخص‌های هندسه فراکتال می‌باشد. با استفاده از میزان جابجایی نسبی بین طبقاتی به دست آمده، می‌توان سطح خرابی سازه را با استفاده از منحنی‌های شکنندگی مرتبط کمی‌سازی نمود.

کلمات کلیدی: دیوار برشی بتن مسلح، ارزیابی غیرمخرب، پایش سلامت سازه، هندسه فراکتال، پردازش تصویر، الگوی ترک سطحی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.306462.2590	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.306462.2590	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۰۷	۱۴۰۰/۱۱/۰۷	۱۴۰۰/۰۹/۰۳	۱۴۰۰/۰۷/۱۶
محمدجواد حمیدیا m_hamidia@sbu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پس از وقوع زلزله به دلیل تخریب نسبی سازه‌ها، ارزیابی میزان خرابی و هم‌چنین سطح ایمنی سازه‌های آسیب دیده از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور کارشناسان با تکیه بر تجربیات شخصی خود و آیین‌نامه‌های مرتبط، در راستای ارزیابی سطح خرابی سازه‌های آسیب دیده به بازدید چشمی از آن‌ها می‌پردازند. در مورد دیوارهای برشی بتنی، بررسی چشمی با استفاده از شاخص‌هایی نظیر طول ترک، عرض ترک و گستره‌ی ترک‌ها در دیوار برشی مورد نظر انجام می‌گیرد. با توجه به این که عرض ترک در فرآیند باربرداری متغیر است و بررسی چشمی در حالت کلی به عوامل مختلفی از جمله تجربه، تخصص، اطلاعات و قضاوت مهندسی کارشناس وابسته است، ضمن طولانی بودن زمان انجام بازدید چشمی، این روش بسیار مستعد خطا است [۱].

وجود مشکلات و معایب پیشگفته، منجر به واکاوی بیشتر در راستای کمی‌سازی خرابی سازه‌ها، با استفاده از شاخص‌های مناسب‌تر شده است به طوری که می‌توان خرابی سازه را در زمان کم‌تر و با خطای کم‌تر، با استفاده از روش‌های پردازش تصویر تخمین زد. بعد فراکتال^۱ گسترده‌ترین استفاده را در روش‌های پردازش تصویر دارد و معیاری از پیچیدگی ترک‌ها است. شاخص بعدی، لاکوناریتی^۲ است که علاوه بر در نظر گرفتن پیچیدگی ترک‌ها، معیاری از نحوه توزیع ترک‌ها در دیوار است و تراکم ترک‌ها را که منجر به خرابی می‌شود، به خوبی در نظر می‌گیرد. سومین شاخص با نام ساکولاریتی^۳ معیاری از پیوستگی ترک‌ها است. هم‌چنین با وزن‌دهی به بخش‌های مورد نظر در دیوار، مودهای خرابی مختلف را در نظر می‌گیرد. مزیت این شاخص‌ها نسبت به شاخص عرض ترک در نظر گرفتن نحوه توزیع و پیوستگی ترک‌ها می‌باشد. هم‌چنین با توجه به استفاده از الگوی ترک پسماند، عدم تغییر شاخص‌های مورد استفاده پس از باربرداری، یکی از مهم‌ترین مزایای شاخص‌های هندسه فراکتال نسبت به شاخص عرض ترک است.

در این مقاله، پایگاه داده‌ای متشکل از ۲۳۶ عکس از دیوارهای برشی بتن آرمه تحت بارگذاری شبه استاتیکی^۴ در جابجایی‌های نسبی^۵ متفاوت جمع‌آوری شده‌اند. سپس بعد فراکتال، شاخص لاکوناریتی و شاخص ساکولاریتی برای الگوهای ترک این تصاویر استخراج شده و میزان همبستگی و روند تغییرات آن‌ها با جابجایی نسبی بررسی گردیده است. نهایتاً روابط پیش بینی کننده برای تخمین میزان جابجایی نسبی دیوارهای برشی بتن آرمه بر حسب شاخص‌های هندسه فراکتال ارائه گردیده است. روابط نوآورانه پیشنهادی در چهار سناریو و برای نخستین بار در ادبیات فنی با در نظر گرفتن شاخص ساکولاریتی و شاخص لاکوناریتی در کنار بعد فراکتال، ارائه شده‌اند.

۲- مرور ادبیات فنی

۲-۱ شاخص‌های ارزیابی خرابی

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در گزارشی تحت عنوان آزمایش‌های غیرمخرب بر روی سازه‌های بتن مسلح، به تعریف سه سطح خرابی می‌پردازد. برای تعیین این سه سطح خرابی از شاخص عرض ترک استفاده می‌شود. بدین شکل که، در صورتی که عرض ترک کمتر از ۰/۲ میلی‌متر باشد، سطح خرابی یک و در صورتی که بین ۰/۲ الی ۱ میلی‌متر باشد، سطح خرابی دو و در صورتی که بیشتر از ۱ میلی‌متر باشد، سازه به سطح خرابی سه رسیده است [۲]. ایساک^۶ و همکاران با پژوهش بر روی سطح ترک خورده‌ی اعضای بتنی به این نتیجه رسیده‌اند که بعد فراکتال سطح ترک خورده، شاخصی مناسب از خواص شکست عضو است [۳]. فرهایدزاده و همکاران با آزمایش بر روی دو دیوار برشی نشان دادند که گرچه عرض ترک می‌تواند در حالت پیشینه‌ی بارگذاری شاخص مناسبی برای تعیین وضعیت عملکردی سازه باشد، اما پس از باربرداری و بسته‌شدن ترک‌ها و مشاهده‌ی ترک‌های پسماند، نتایج غیرقابل اعتماد خواهد بود. هم‌چنین نتیجه گرفته‌اند که بعد فراکتال

¹ Fractal Dimension

² Lacunarity

³ Succolarity

⁴ Quasi-static

⁵ Drifts

⁶ Issa

الگوی ترک سطح دیوار، شاخصی مناسب برای تخمین سطح خرابی دیوار برشی بتنی است [۱]. ابراهیم خانلو و همکاران با استفاده از بعد فراکتال تعمیم یافته برای نمونه های دیوار برشی میزان خرابی را با یک شاخص خرابی ابتکاری به ابعاد فراکتال تعمیم یافته نسبت دادند [۴]. مؤمنی و دولتشاهی با استفاده از بعد فراکتال تعمیم یافته، سطح خرابی دیوارهای برشی بتن آرمه را تخمین زدند [۵]. همچنین مدنی و دولتشاهی روابطی برای تخمین میزان زوال سختی و مقاومت دیوارهای برشی بتن آرمه با استفاده از بعد فراکتال تعمیم یافته ارائه نمودند [۶]. مطالعه مشابهی توسط دولتشاهی و بیر^۷ بر روی زوال سختی و مقاومت دیوارهای بنایی با استفاده از بعد فراکتال تعمیم یافته صورت پذیرفت [۷]. آتاناسیو^۸ و همکاران با استفاده از روشهای یادگیری ماشین و بعد فراکتال تعمیم یافته میزان خرابی در دیوارهای بتنی را بررسی نمودند [۸]. رضایی و همکاران نیز با انجام تحلیل های حساسیت، وابستگی کمی بعد فراکتال را به پارامترهای بینادین آن مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. اخیراً نیز عسجدی و همکاران روش طول کمان^۹ را برای اندازه گیری کمیتهای مرتبط با الگوی ترک پیشنهاد دادند [۱۰].

۲-۲ شاخص های هندسه فراکتال

مندلیرو^{۱۰} در سال ۱۹۸۳ مفاهیم هندسه فراکتالی را ارائه کرد. هنگامی که او در راستای طول سواحل انگلیس پژوهش می کرد، دریافت که هرگاه برای اندازه گیری طول ساحل از مقیاس بزرگ تر استفاده کند، طول ساحل کمتر به دست می آید. درحالی که استفاده از مقیاس کوچک تر، طول ساحل بزرگ تری را به دست می دهد [۱۱]. در هندسه ی فراکتال، سه شاخص معرفی شده اند. شاخص های بعد فراکتال، لاکوناریتی و ساکولاریتی برای در نظر گرفتن سه جنبه متفاوت از تصویر، تعریف شده اند. بعد فراکتال در پژوهش های متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است و روش های بسیاری برای به دست آوردن بعد فراکتال تصویر، ارائه شده است. برخلاف بعد فراکتال، پژوهش های کم تری در رابطه با دو شاخص دیگر انجام شده است. در مقایسه ی دو شاخص دیگر، لاکوناریتی بیشتر از ساکولاریتی مورد استفاده قرار گرفته است و مقالات بیشتری در رابطه با لاکوناریتی موجود است. این سه شاخص مکمل یکدیگر اند، به طوری که دو تصویر با داشتن بعد فراکتال یکسان، توسط لاکوناریتی از یکدیگر متمایز می شوند و هم چنین ساکولاریتی دو تصویر با بعد فراکتال و لاکوناریتی یکسان، می تواند متفاوت باشد [۱۲].

۲-۳ بعد فراکتال

در چارچوب هندسه فراکتال، بعد فراکتال که معیاری از پیچیدگی تصویر است، می تواند عددی غیر از اعداد صحیح داشته باشد. برای نمونه یک جسم می تواند بعدی برابر ۱/۲ داشته باشد و این مقدار بدین معناست که این جسم از خط پیچیده تر و از صفحه ساده تر است [۴].

۲-۴ لاکوناریتی

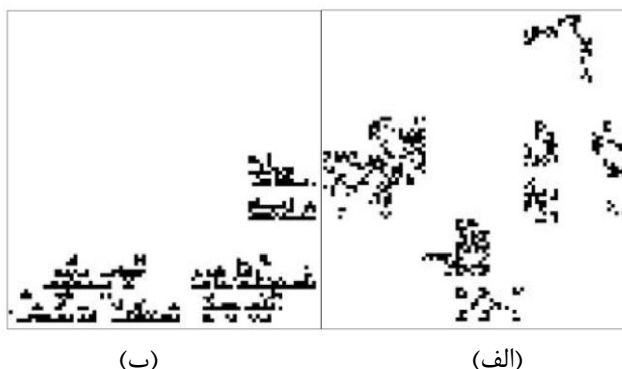
مندلیرو اولین بار شاخص لاکوناریتی را که برای اندازه گیری توزیع فضاهای خالی در یک شیء هندسی استفاده می شود، معرفی نمود [۱۱]. در یک تصویر فراکتال کامل که فضاهای خالی کاملاً همگن در تصویر گسترده شده اند، لاکوناریتی تصویر برابر با یک خواهد بود. به عبارت دیگر هرچه در یک تصویر، فضاهای خالی ناهمگون تر گسترده شده باشد، لاکوناریتی از یک بیشتر می شود. برای مثال شکل ۱ (الف) لاکوناریتی بیشتری نسبت به شکل ۱ (ب) دارد درحالی که بعد فراکتال تصویر که نشانگر پیچیدگی آن است، برای هر دو شکل برابر است.

⁷ Beyer

⁸ Athanasiou

⁹ Arc length

¹⁰ B. Mandelbrot



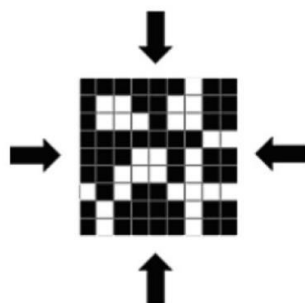
شکل ۱- مقایسه دو نمونه با توزیع فضاهای خالی متفاوت [۱۱].

(الف) تصویری با خرابی و فضای خالی متمرکز- (ب) تصویری با خرابی و فضای خالی همگن

گفن و همکاران^{۱۱} در سال ۱۹۸۳ تعریف دقیق تری ارائه دادند. بدین صورت که، لاکوناریتی یک جسم هندسی در یک مقیاس خاص، میزان انحراف پراکندگی فضاهای خالی را نسبت به پراکندگی همگن در تصویر نشان می‌دهد [۱۳]. روش‌های متعددی برای محاسبه لاکوناریتی پیشنهاد شده است. یکی از پرکاربردترین روش‌ها، الگوریتم جعبه متحرک^{۱۲} است که توسط آلاین و کلوریت^{۱۳} در سال ۱۹۹۱ ارائه شده است [۱۴].

۲-۵ ساکولاریتی

ساکولاریتی شاخصی دیگر در هندسه فراکتال است که برای توصیف تصویر از آن استفاده می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده‌ی میزان جریان مایع در فضاهای خالی تصویر است. دیملو و کانسی^{۱۴} با تکیه بر الگوریتم شمارش جعبه^{۱۵}، روشی نوین برای محاسبه ساکولاریتی ارائه دادند و برای نشان دادن میزان نفوذ مایع در فضاهای خالی، از میزان فشار ایجادشده توسط مایع مجازی (شکل ۲) استفاده کرده‌اند [۱۵].



شکل ۲- استفاده از مایع فرضی برای محاسبه شاخص ساکولاریتی [۱۵].

۳- روش انجام پژوهش

در این مقاله از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی دیوار برشی بتن مسلح مستطیلی، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی، استفاده می‌شود. این نتایج شامل بیش از ۲۰۰ عکس از الگوی ترک دیوارهای مختلف است که توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. با استفاده از عکس‌های موجود، الگوی ترک هر دیوار توسط نرم‌افزار فتوشاپ^{۱۶}، به طور دستی و غیراتوماتیک و با در نظر گرفتن یک پیکسل به عنوان

¹¹ Gefen, et al

¹² Gliding box algorithm

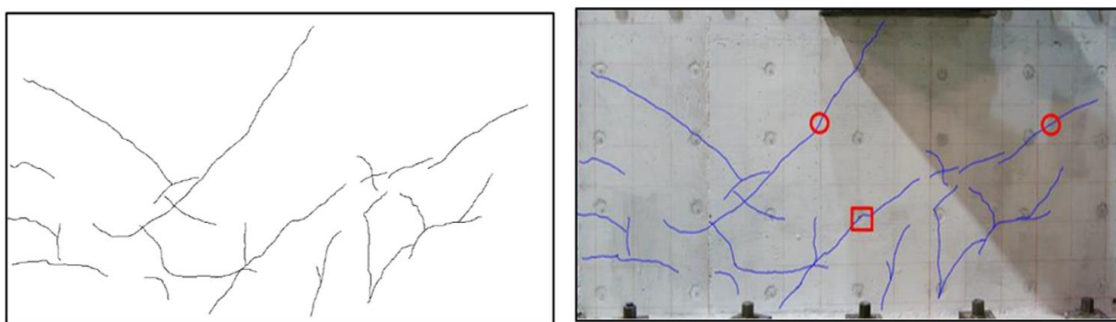
¹³ Allain and Cloitre

¹⁴ R.H.C.de Melo and A.Conci

¹⁵ Box counting

¹⁶ Adobe Photoshop

عرض ترک، همانند شکل ۳ ترسیم شده است. دیتابیس به دست آمده طیف وسیعی را از دیوارهای کوتاه مرتبه و بلند مرتبه شامل می شود که جزئیات مربوط به آن به شرح جدول ۱ است. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می شود، نسبت ارتفاع به عرض در دیوارهای مورد بررسی در بازه ۰/۵۴ الی ۲/۲۸ است و قدمت آزمایش بر روی دیوارها از سال ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۲ است که طیف وسیعی از دیوارها را بررسی می کند. در این مقاله ابتدا با بررسی ۳۳ عدد از تصاویر و محاسبه شاخص های هندسه ی فراکتال برای هر الگوی ترک، مدلسازی آغاز شد و پس از رسیدن به نتایج ابتدایی، با بررسی ۲۳۶ عدد از تصاویر به طور مشابه، مدل تکمیل و بهبود یافت. شایان ذکر است برای محاسبه شاخص های هندسه فراکتال از برنامه^{۱۷} نوشته شده توسط نویسندگان در نرم افزار متلب^{۱۸} استفاده گردیده است.



(الف) (ب)

شکل ۳- استخراج الگوی ترک با استفاده از عکس دیوار ترک خورده
(الف) تصویر خام از الگوی ترک- (ب) تصویر رسم شده با نرم افزار فتوشاپ

جدول ۱- مشخصات دیوارهای موجود در پایگاه داده

پژوهشگر	سال	تعداد دیوارها	تعداد تصاویر	وضعیت داده	نسبت ارتفاع به عرض دیوار
Luna et al. [16]	2012	4	39	Image	0.54-0.94
Tran and Wallace [17]	2012	5	33	Image	1.50-2.00
Birely et al. [18]	2011	4	15	Drawing	1.20
Kuang and Ho [19]	2006	9	24	Image	1.00-1.50
Massone [20]	2006	10	30	Image	0.80-1.00
Greifenhagen and Lestuzzi [21]	2005	4	28	Image	0.69-0.77
Oh et al. [22]	2002	3	3	Drawing	1.33
Dazio et al. [23]	1999	6	6	Drawing	2.28
Salonikios et al. [24]	1998	11	11	Image	2.00
Tomazevic et al. [25]	1996	3	3	Drawing	1.40
Lopes [26]	1991	3	3	Image	1.90
Lefas et al. [27]	1990	3	3	Drawing	2.00
Pilakoutas and Elnashai [28]	1990	7	38	Drawing	2.00

۳-۱ محاسبه بعد فراکتال

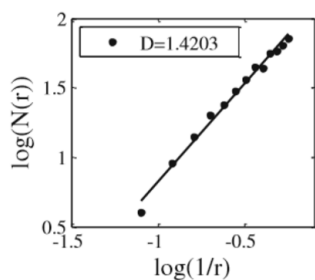
اولین شاخص هندسه فراکتال با استفاده از الگوریتم شمارش جعبه محاسبه می شود. این الگوریتم ابتدا تصویر را با استفاده از جعبه های مربعی به ضلع r پیکسل، شبکه بندی می کند و سپس با استفاده از رابطه (۱)، بعد فراکتالی یک الگو را محاسبه می کند.

¹⁷ Script

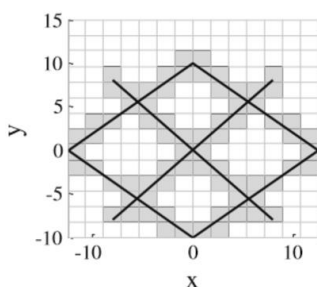
¹⁸ MATLAB

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\log N(r)}{\log r} \right) \quad (1)$$

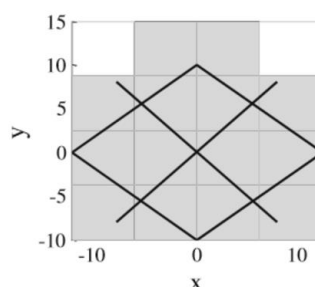
در رابطه فوق، D بعد فراکتال، $N(r)$ تعداد جعبه‌هایی با بعد r است که حاوی ترک‌اند. به عبارت دیگر، تعداد سلول‌هایی از شبکه را که توسط الگو اشغال شده اند، $N(r)$ می‌نامند. برای محاسبه بعد فراکتال طبق الگوریتم شمارش جعبه، ابتدا مقدار $N(r)$ برای r های مختلف محاسبه شده و نمودار تمام لگاریتمی آن بر حسب معکوس r رسم می‌شود. در نمودار به دست آمده، بعد فراکتال برابر با شیب نمودار است. مراحل محاسبه‌ی این شاخص به عنوان نمونه در شکل ۴ آمده است [۱].



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۴- فرآیند محاسبه بعد فراکتال

(الف) شبکه‌بندی با بعد جعبه بزرگ - (ب) شبکه‌بندی با بعد جعبه کوچک - (ج) رسم نمودار و محاسبه بعد فراکتال

۳-۲ محاسبه لاکوناریتی

یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای محاسبه لاکوناریتی، الگوریتم جعبه لغزنده^{۱۹} است که در این مقاله از آن استفاده شده است. این الگوریتم با مثالی که در ادامه آمده است، توضیح داده شده است. در این مثال ماتریسی ۱۲ در ۱۲ ($M=12$) همانند شکل ۵ در نظر گرفته شده است، به طوری که هر درایه از تصویر با احتمال ۵۰ درصد برابر با عدد مورد نظر یک خواهد بود. مقدار لاکوناریتی (LAC) به بعد جعبه‌ی مورد استفاده وابسته است. در این مثال، جعبه‌ای دو در دو ($r=2$) در نظر گرفته شده است که ابتدا در گوشه بالا و سمت چپ قرار می‌گیرد. طبق شکل ۵، مشاهده می‌شود که دو درایه از چهار درایه‌ی جعبه توسط عدد مورد نظر یک پر شده است. به تعداد درایه‌های اشغال شده توسط هر جعبه، وزن جعبه^{۲۰} گویند در نتیجه وزن این جعبه برابر با دو است. برای محاسبه وزن تمام جعبه‌ها کافی است جعبه مورد نظر به اندازه یک ستون به راست حرکت داده شود و وزن جعبه دوباره محاسبه شود. پس از محاسبه‌ی وزن جعبه‌های ردیف اول، جعبه مورد نظر به اندازه‌ی یک ردیف به پایین حرکت داده می‌شود و این روند بر روی تمامی ستون‌ها و ردیف‌ها انجام می‌شود. توزیع فراوانی وزن جعبه‌ها به ازای $r=2$ در جدول ۲ آمده است. در این جدول $n(S,r)$ نشان دهنده فراوانی جعبه‌هایی به سایز r با وزن جعبه S است و تعداد کل جعبه‌ها به سایز r با $N(r)$ نشان داده می‌شود. در صورتی که سایز ماتریس M فرض شود، تعداد کل جعبه‌ها مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید. توزیع فراوانی با استفاده از رابطه (۳) به توزیع احتمالاتی $Q(S,r)$ تبدیل می‌شود. سایر مقادیر محاسبه شده در جدول ۲ به شرح روابط (۴) الی (۶) است [۳].

$$N(r) = (M - r + 1)^2 \quad (2)$$

$$Q(S, r) = n(S, r) / N(r) \quad (3)$$

¹⁹ Gliding box algorithm

²⁰ Box mass

1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0

شکل ۵ - ماتریس نمونه در مثال الگوریتم جعبه متحرک

جدول ۲ - محاسبات مربوط به لاکوناریتی شکل ۵

S	N(S,r)	Q(S,r)	SQ(S,r)	S ² Q(S,r)
0	3	0.024	0	0
1	35	0.289	0.289	0.289
2	46	0.380	0.760	1.520
3	29	0.239	0.719	2.157
4	8	0.066	0.264	1.057
مجموع	121	1	Z ⁽¹⁾ = 2/033	Z ⁽²⁾ = 5/024
		$\Lambda(r)$	1.215	

$$Z^{(1)} = \sum S \times Q(S, r) \quad (4)$$

$$Z^{(2)} = \sum S^2 \times Q(S, r) \quad (5)$$

$$\Lambda(r) = Z^{(2)} / (Z^{(1)})^2 \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $\Lambda(r)$ میزان لاکوناریتی برای بعد جعبه در نظر گرفته شده می‌باشد. برای تعیین میزان لاکوناریتی کل (LAC)، روابط پیش‌گفته با استفاده از رفتار احتمالاتی وزن جعبه‌ها، مشابه روابط (۷) و (۸) بازنویسی می‌شود. در این روابط $\bar{S}(r)$ میانگین و $S_s^2(r)$ واریانس است. لاکوناریتی کل (LAC) با توجه به رابطه (۶)، مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۳].

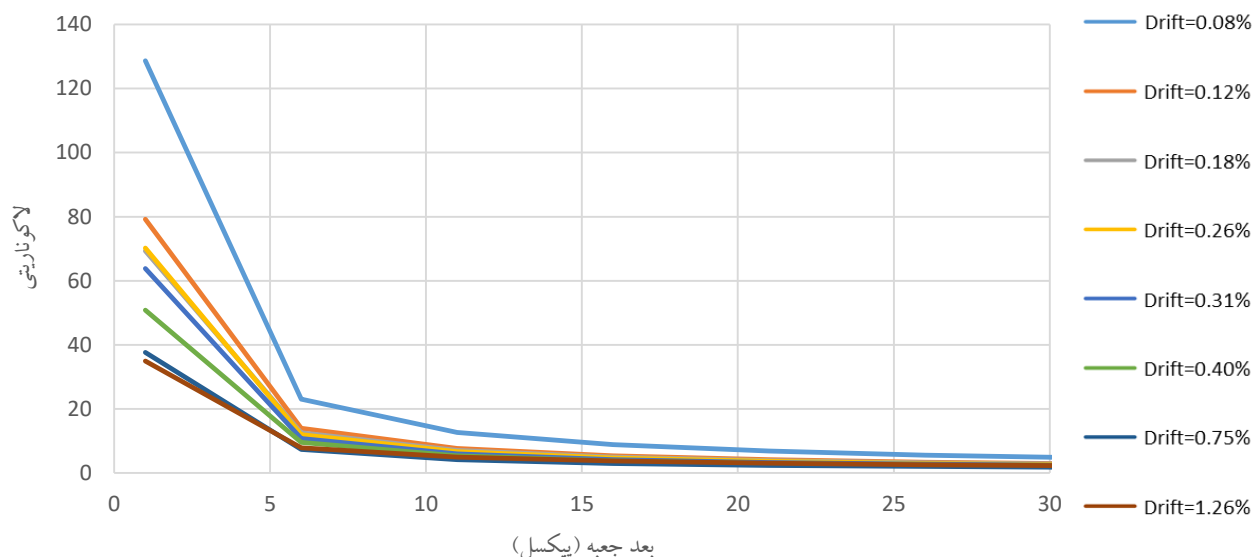
$$Z^{(1)} = \bar{S}(r) \quad (7)$$

$$Z^{(2)} = S_s^2(r) + \bar{S}^2(r) \quad (8)$$

$$\Lambda(r) = S_s^2(r) / \bar{S}^2(r) + 1 \quad (9)$$

لاکوناریتی الگوی ترک نیز به طور مشابه محاسبه می‌شود. بدین صورت که هر پیکسل از الگوی ترک در ماتریس متناظر آن، برابر با یک قرار می‌گیرد و ماتریسی مشابه شکل ۵ تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر در ماتریس متناظر الگوی ترک، عدد یک نماینده ترک و عدد صفر نماینده دیوار ترک نخورده است. پس از تشکیل ماتریس متناظر، لاکوناریتی با استفاده از روابط پیش‌گفته محاسبه می‌شود. لاکوناریتی الگوهای ترک متفاوت در حالتی قابل مقایسه خواهد بود که در تمام الگوها از بعد جعبه‌ای ثابت استفاده شود. همان طور که میتوان از رابطه (۹) نتیجه گرفت، مقدار لاکوناریتی همواره از عدد یک بزرگ‌تر است و هرچه این عدد بزرگ‌تر شود، نشان‌دهنده‌ی متمرکز بودن خرابی در تصویر است.

پس از بررسی چند دیوار مختلف در جابجایی‌های نسبی^{۲۱} متفاوت، طبق شکل ۶ می‌توان به طور تقریبی نتیجه گرفت که بعد جعبه برابر با نه، بعد مناسبی بوده و می‌تواند تفاوت میان جابجایی‌های نسبی را به خوبی نمایش دهد. در حالی که در بعد جعبه‌های بزرگ، اختلاف معناداری میان مقادیر لاکوناریتی دیده نمی‌شود.



شکل ۶ - نمودار لاکوناریتی برای یک دیوار برحسب بعد جعبه‌های متفاوت

۳-۳ محاسبه ساکولاریتی

محاسبه ساکولاریتی، که شاخصی برای نشان دادن میزان جریان مایع در فضاهای خالی تصویر است، با استفاده از روش الگوریتم شمارش جعبه صورت می‌گیرد. روش محاسبه بدین صورت است که ابتدا با توجه به نوع ساکولاریتی، تصویر اصلاحی به دست می‌آید و سپس با فرض فشار مایع در جهتی که با فیزیک مسئله هم‌خوانی داشته باشد، میزان ساکولاریتی به دست می‌آید. ساکولاریتی‌های مورد استفاده در این مقاله شامل پایین به بالا^{۲۲}، چپ به راست^{۲۳} و راست به چپ^{۲۴} هستند که تعاریف هر یک به شرح ذیل است:

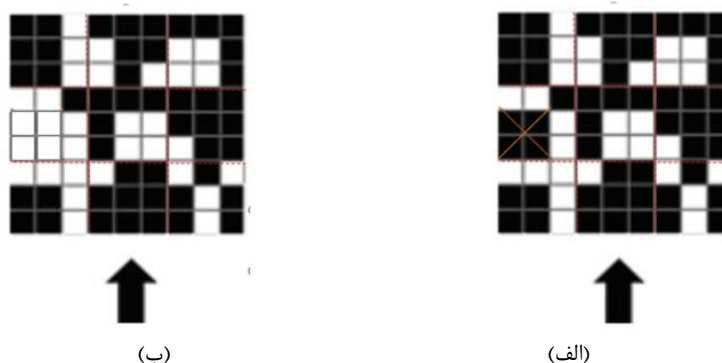
- پایین به بالا (b2t): ابتدا جریان مایع فرضی از پایین به بالا، ترک‌های به هم پیوسته را در همین جهت پر کرده و سایر ترک‌ها که مایعی به آن‌ها جریان پیدا نکرده، حذف می‌شوند. بدین صورت تصویر اصلاحی همانند شکل ۷ به دست می‌آید. در این شکل، خط چین‌ها نشان‌دهنده‌ی شبکه‌بندی تصویر توسط جعبه‌هایی با سایز مورد نظر است و فلش پایین عکس نشان‌دهنده‌ی جهت جریان دادن مایع فرضی است. پس از به دست آمدن تصویر اصلاحی، جهت بالا به پایین برای فشار مایع در نظر گرفته می‌شود. با توجه این فرض، ترک‌هایی که در بخش پایینی تصویر قرار دارند از اهمیت بالاتری نسبت به ترک‌های بالایی در تصویر خواهند داشت. پس از مراحل پیش‌گفته با استفاده از رابطه (۱۰) میزان ساکولاریتی مورد نظر به دست می‌آید.

²¹ Drift ratios

²² Bottom to top

²³ Left to right

²⁴ Right to left

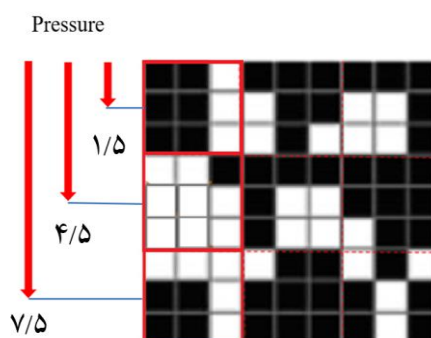


شکل ۷ - نحوه به دست آوردن تصویر اصلاحی در ساکولاریتی پایین به بالا
(الف) تصویر قبل از اصلاح - (ب) تصویر بعد از اصلاح

$$\sigma(Bs(k), dir) = \frac{\sum_{k=1}^n OP(BS(k)) \times PR(BS(k), pc)}{\sum_{k=1}^n PR(BS(k), pc)} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، نشان دهنده میزبان ساکولاریتی در جهت dir ^{۲۵} و سایز جعبه k است. $OP(BS(k))$ نشان دهنده درصد پرشدگی^{۲۶} هر جعبه است که از تقسیم تعداد پیکسل ترکها در هر جعبه بر تعداد کل پیکسلها در آن جعبه به دست می آید. $PR(BS(k), pc)$ نیز نماینده مقدار فشار مایع فرضی در مرکز سطح هر جعبه است که در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که از رابطه (۱۰) قابل استنتاج است، مقدار ساکولاریتی همواره کوچکتر از یک خواهد بود و مقدار بیشینه آن متناظر با حالتی است که تمام پیکسلهای تصویر برابر با یک است [۱۵]. با توجه به مطالب پیش گفته، محاسبه ساکولاریتی پایین به بالا برای شکل ۸ به شرح ذیل است.

$$\sigma(3, B2T) = \frac{1.5 \times (\frac{6}{9} + \frac{6}{9} + \frac{5}{9}) + 4.5 \times (\frac{1}{9} + \frac{5}{9} + \frac{8}{9}) + 7.5 \times (\frac{8}{9} + \frac{4}{9} + \frac{5}{9})}{3 \times (1.5 + 4.5 + 7.5)} = 0.593 \quad (11)$$

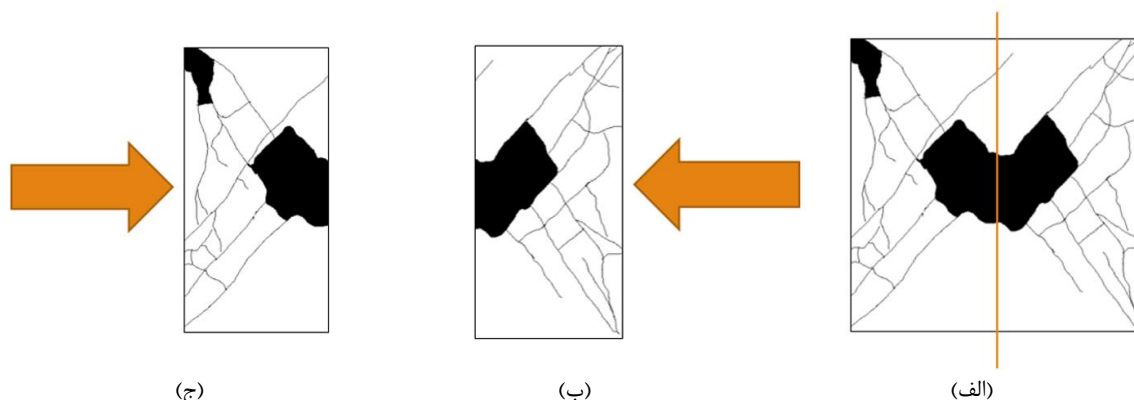


شکل ۸ - نحوه محاسبه فشار مایع فرضی در جعبه های مختلف

²⁵ direction

²⁶ Occupation percentage

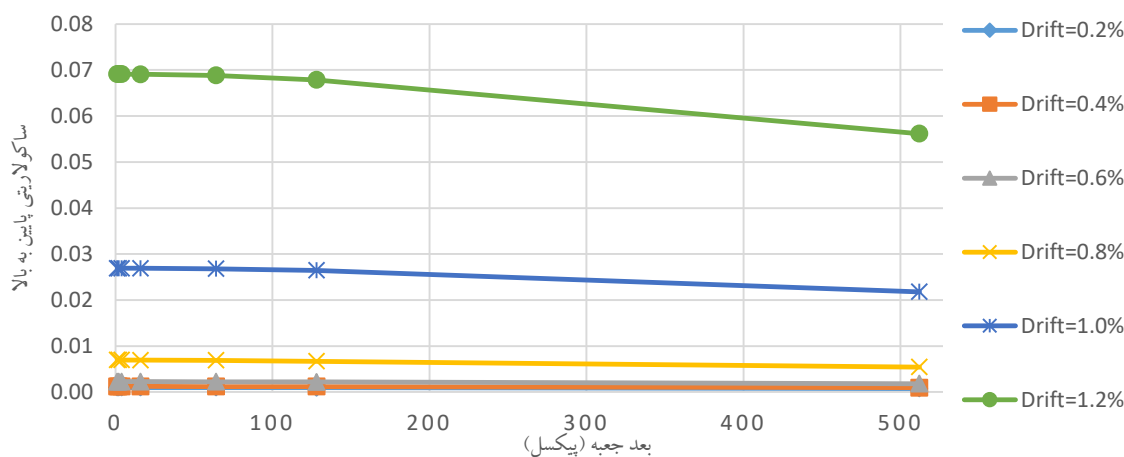
- چپ به راست (l2r) : ابتدا تصویر مطابق شکل ۹ (الف) نصف می‌شود و برای نیمه‌ی سمت چپ تصویر، مقدار ساکولاریتی چپ به راست محاسبه می‌شود به طوری ابتدا ترک‌ها از چپ به راست توسط مایع فرضی پر می‌شوند و تصویر اصلاحی به دست می‌آید سپس محاسبات بر اساس افزایش فشار مایع فرضی از چپ به راست انجام می‌شود.
- راست به چپ (r2l) : همانند محاسبات چپ با راست، ابتدا تصویر دو نیمه می‌شود؛ سپس برای نیمه‌ی سمت راست تصویر، تصویر اصلاحی به دست آمده و محاسبات راست به چپ انجام می‌شود. این محاسبات با فرض راست به چپ بودن فشار مایع صورت می‌گیرد.



شکل ۹- محاسبه ساکولاریتی چپ به راست و راست به چپ

(الف) - نصف کردن تصویر (ب) جهت فشار مایع فرضی در محاسبات مربوط به r2l - (ج) جهت فشار مایع فرضی در محاسبات مربوط به l2r

پس از بررسی ساکولاریتی پایین به بالا برای یک دیوار در جابجایی‌های نسبی و بعد جعبه‌های متفاوت، طبق شکل ۱۰ نتیجه می‌شود که مقدار ساکولاریتی به بعد جعبه وابستگی کمی دارد و می‌توان در محاسبات ساکولاریتی از بعد جعبه برابر با یک استفاده کرد.

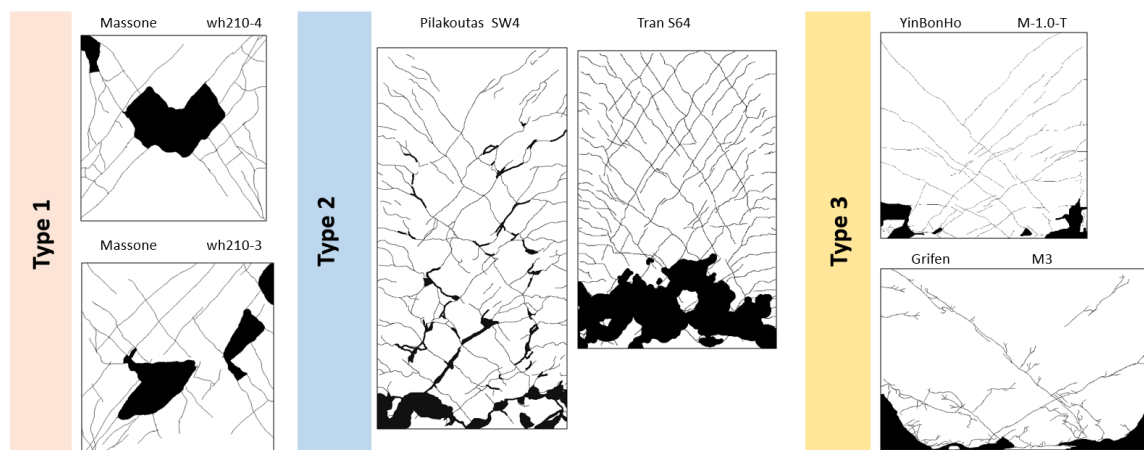


شکل ۱۰- نمودار ساکولاریتی پایین به بالا برای یک دیوار برحسب بعد جعبه‌های متفاوت

۴- نتایج مدلسازی

در ابتدا ۳۳ عدد از تصاویر بررسی شدند و شاخص‌های هندسه‌ی فراکتال برای هر الگوی ترک محاسبه شد. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، این دیوارها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد به طوری که هر دسته دارای نسبت ارتفاع به عرض و مود خرابی متفاوت است. دسته اول دو دیوار کوتاه‌مرتبه اند که خرابی آن در وسط دیوار رخ داده است، در حالی که دسته سوم دو دیوار کوتاه‌مرتبه اند

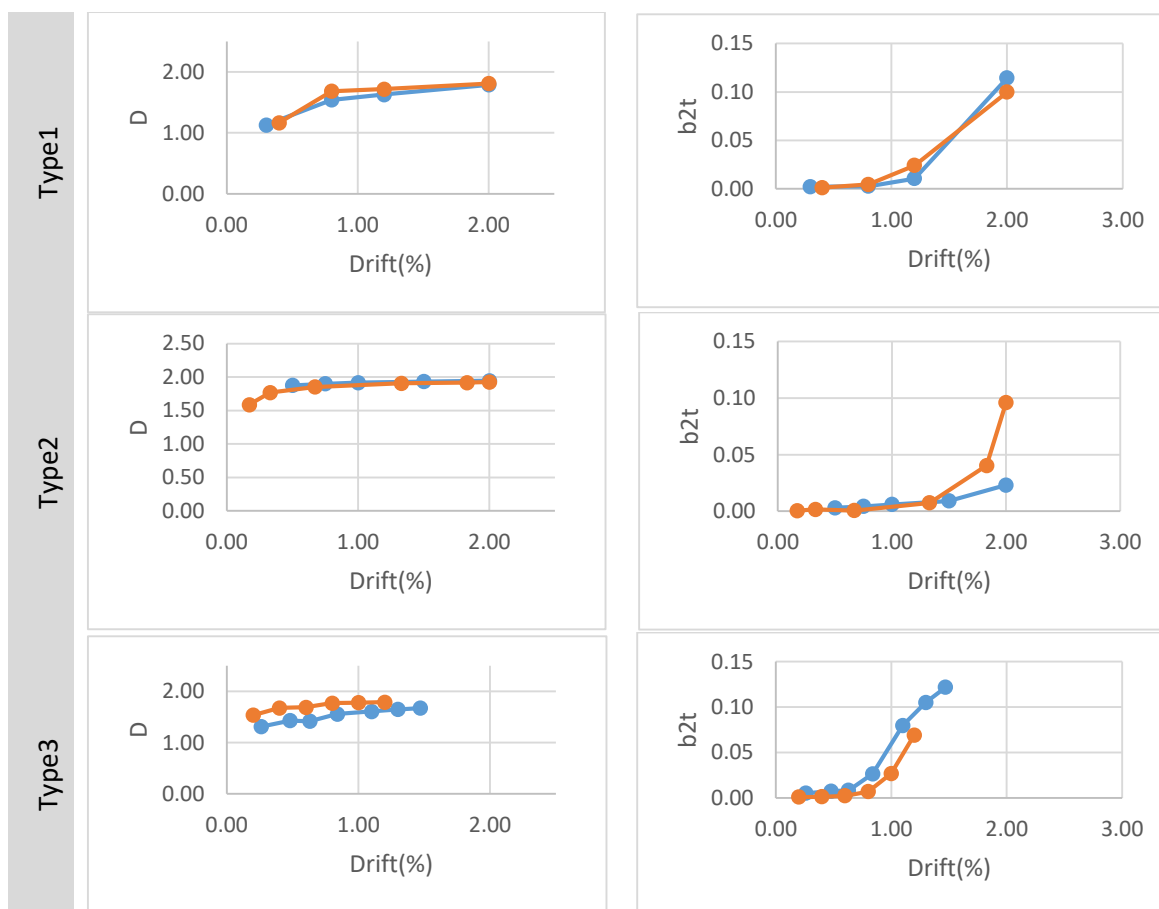
که خرابی در پای دیوار رخ داده. دسته دوم از این تقسیم بندی اما شامل دو دیوار بلندمرتبه است که الگوی ترک آن کاملاً متفاوت از دو دسته پیش‌گفته می‌باشد. در شکل ۱۱ الگوی ترک دیوارها در بیشینه جابجایی نسبی نمایش داده شده است. در این شکل علاوه بر نام دیوارها و محقق‌ها، به‌خوبی می‌توان تفاوت دسته بندی را مشاهده کرد.



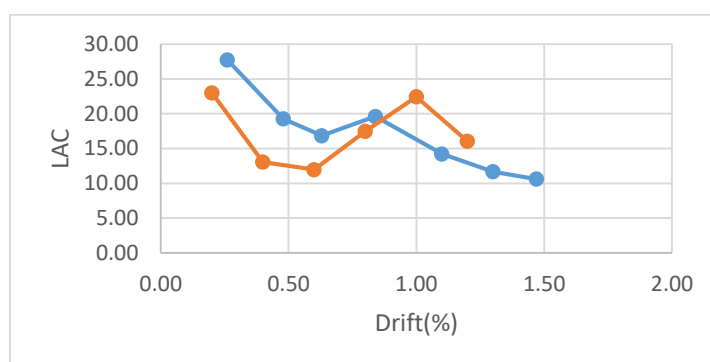
شکل ۱۱- دسته بندی دیوارها در مدلسازی اولیه

۴-۱ مقایسه روند تغییر شاخص‌های هندسه فراکتال

پس از محاسبه شاخص‌ها برای ۳۳ دیوار منتخب، روند تغییر مقادیر شاخص‌ها با افزایش جابجایی نسبی در هر دسته بندی مقایسه می‌شود. با توجه به شکل ۱۲، نمودار بعد فراکتال برحسب جابجایی نسبی نشان می‌دهد که با افزایش خرابی و کاهش مقاومت دیوار، در مقدار بعد فراکتال تغییر قابل ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود در حالی که در شکل ۱۲، نمودار انواع ساکولاریتی برحسب جابجایی نسبی با کاهش مقاومت دیوار، افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. در نتیجه استفاده از بعد فراکتال به تنهایی نمی‌تواند شاخص مناسبی برای تخمین جابجایی نسبی سازه باشد. در عین حال میزان ساکولاریتی پایین به بالا (b2t) در برابر جابجایی نسبی، روندی افزایشی دارد. در شکل ۱۳، نمودار لاکوناریتی برحسب جابجایی نسبی دیوارهای دسته سوم است که با افزایش جابجایی نسبی ابتدا کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده‌ی گستردگی خرابی در تصویر است و سپس نمودار پرش می‌کند که نشانه‌ی تمرکز خرابی است. در انتها نمودار همانند بخش اول، کاهش می‌یابد که علت آن ایجاد خرابی‌های جدید در تصویر و گسترده شدن تمام خرابی‌ها در تصویر می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، نمودار شاخص لاکوناریتی در برابر جابجایی نسبی از روند صعودی یا نزولی خاصی در تمام بازه مورد بررسی تبعیت نمی‌کند.



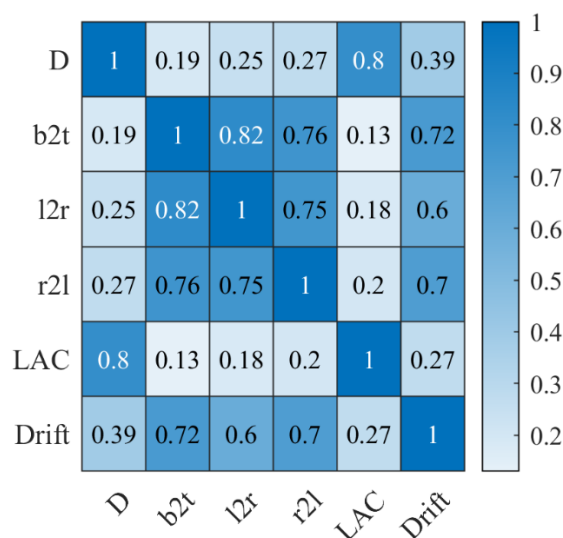
شکل ۱۲ - مقایسه روند تغییر بعد فراکتال و ساکولاریتی در دیوارهای مختلف



شکل ۱۳ - نمودار لاکوناریتی برحسب جابجایی نسبی در دیوارهای دسته سوم

۴-۲ همبستگی شاخص‌های هندسه فراکتال

در ماتریس شکل ۱۴ میزان ضرایب همبستگی (R-factor) بین شاخص‌های هندسه فراکتال با یکدیگر و همچنین با میزان شاخص خرابی جابجایی نسبی برای تمامی دیوارهای موجود در پایگاه داده نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، بیشترین میزان همبستگی جابجایی نسبی با شاخص ساکولاریتی پایین به بالا (b2t) می‌باشد. شاخص ساکولاریتی پایین به بالا (b2t) نیز کمترین میزان همبستگی را با بعد فراکتال (D) داراست. همچنین کمترین میزان همبستگی جابجایی نسبی با شاخص لاکوناریتی (LAC) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴- میزان ضرایب همبستگی بین شاخص‌های هندسه فراکتال

۴-۳ روابط پیش بینی کننده پیشنهادی

در این بخش با استفاده از مدل رگرسیون پارامتری^{۲۷} میان پارامترهای استخراجی از الگوی ترک و جابجایی نسبی دیوارها، روابط پیش بینی کننده ارائه می‌شود. در مدل رگرسیون پارامتری، پارامترهای مستقل با استفاده از عملگرهای حسابی به یکدیگر وابسته می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، جایگشت‌های مختلف پارامترها و عملگرها در جهت کاهش خطا آزموده می‌شوند [۲۹]. در این مقاله از نرم افزار اورکا^{۲۸} برای انجام رگرسیون پارامتری استفاده شده است.

۴-۳-۱ سناریوی اول

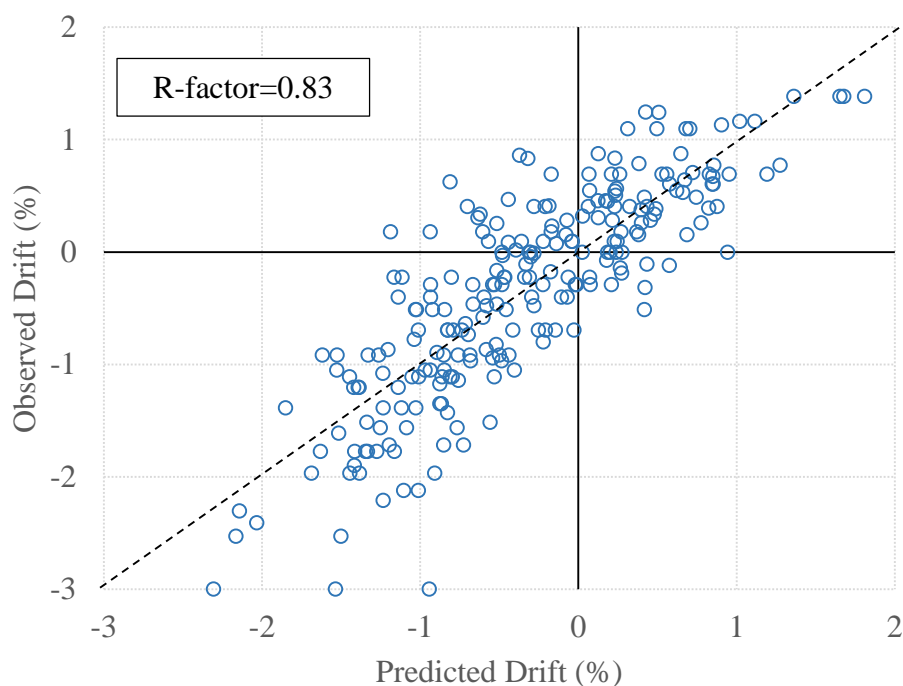
همان طور که از شکل ۱۲ نتیجه شد، بعد فراکتال (D) نمی‌تواند به تنهایی شاخص مناسبی برای ارزیابی خرابی باشد. در نتیجه در سناریوی اول که ساده‌ترین مدل را نتیجه می‌دهد، ترکیبات مختلف بعد فراکتال (D) و ساکولاریتی پایین به بالا (b2t) بررسی می‌شود. بهترین مدل در این سناریو در رابطه (۱۲) ارائه شده است. میزان ضریب همبستگی این مدل (R-factor) برابر با ۰/۸۳ است که یکی از نشانه‌های دقت بالای مدل است.

$$\ln(\text{Drift}) = 0.77 + 0.34 \log(b2t) + 0.0001 \exp(4.9D) + \frac{0.018}{1.2 - 1.4AR} \quad (12)$$

در این رابطه AR نسبت ارتفاع به طول دیوار می‌باشد. در شکل ۱۵ نمودار مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به نتایج آزمایش‌ها رسم شده است و اطلاعات هر دیوار با نقاط آبی نمایش داده شده‌اند. این نمودار هرچه به خط ۴۵ درجه نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی دقت بالاتر مدل است. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، مدل در جابجایی‌های نسبی بالا با خطا عمل می‌کند.

²⁷ Symbolic Regression

²⁸ Eureka



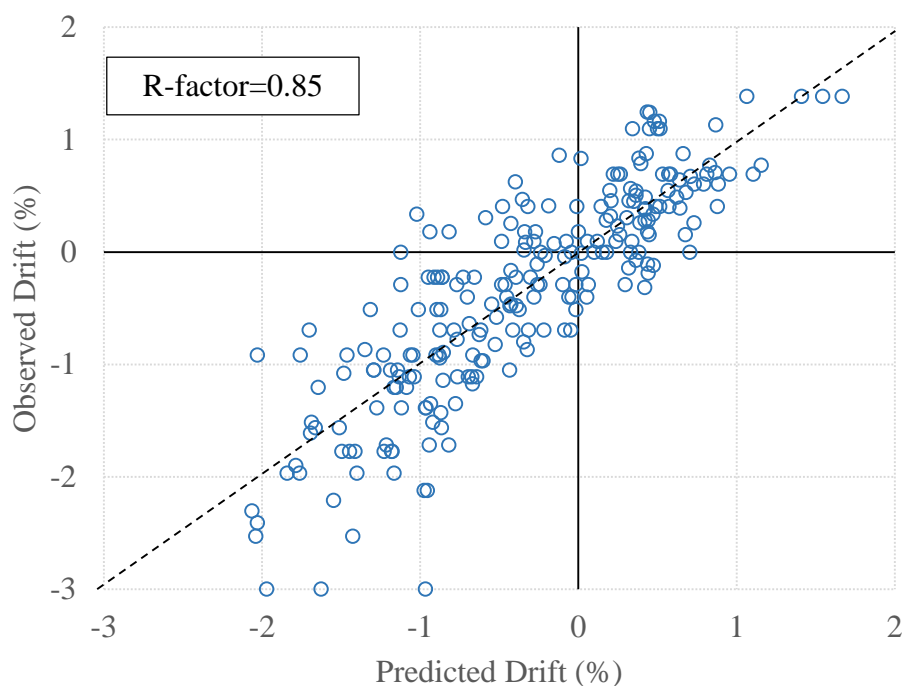
شکل ۱۵- بررسی نمودار پیش‌بینی- نتایج سناریو اول

۲-۳-۴ سناریوی دوم

در جهت افزایش دقت مدل، علاوه بر شاخص‌های مورد استفاده در سناریوی اول، در سناریوی دوم از شاخص ساکولاریتی چپ به راست $(I2r)$ و راست به چپ $(r2l)$ نیز استفاده می‌شود. در نتیجه در این مدل، ترکیبات مختلف بعد فراکتال و ساکولاریتی پایین به بالا و حاصل جمع ساکولاریتی چپ به راست و راست به چپ بررسی می‌شود.

مدل به دست آمده در این سناریو در رابطه (۱۳) آمده است. میزان R-factor این مدل برابر با ۰/۸۵ است که نشان‌دهنده‌ی افزایش دقت مدل نسبت به سناریو اول است. در شکل ۱۶ دقت مدل بررسی شده است. طبق مطالبی که در سناریوی اول مطرح شده است، این نمودارها و افزایش R-factor نشان‌دهنده‌ی افزایش دقت مدل نسبت به سناریوی اول است. هم‌چنین این مدل در جایجایی‌های نسبی بالا دقت بیشتری نسبت به مدل سناریوی اول دارد.

$$\ln(\text{Drift}) = 0.51 + 0.36 (D - 0.87)^{13} + \frac{-0.038}{0.014 + (I2r + r2l) + 2.1b2t} \quad (13)$$



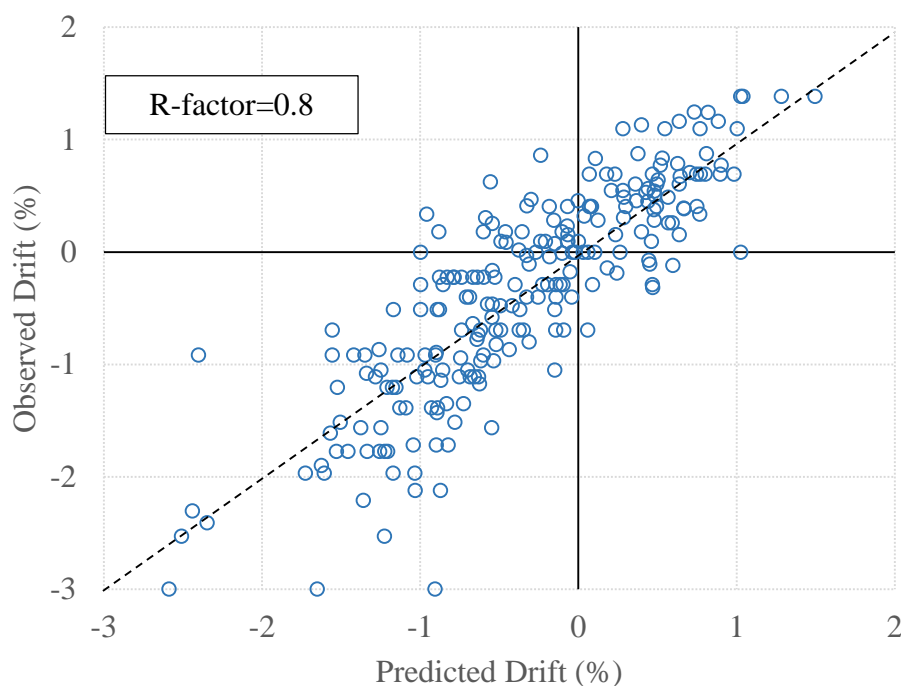
شکل ۱۶- بررسی نمودار پیش‌بینی- نتایج سناریو دوم

۳-۳-۴ سناریوی سوم

در سناریوی سوم، علاوه بر شاخص‌های مورد استفاده در سناریوی دوم، به طور همزمان از تمام شاخص‌های هندسه فراکتال استفاده می‌شود. در نتیجه در این مدل، ترکیبات مختلف بعد فراکتال و ساکولاریتی پایین به بالا، حاصل جمع ساکولاریتی چپ به راست و راست به چپ و لاکوناریتی (LAC) بررسی می‌شود.

بهترین مدل در این سناریو در رابطه (۱۴) آمده است. میزان R-factor این مدل برابر با ۰/۸ است که نشان دهنده دقت پایین‌تر این مدل در قیاس با سناریوی دوم می‌باشد. دلیل کاهش دقت در این سناریو، عدم وابستگی شاخص لاکوناریتی به میزان جابجایی نسبی می‌باشد که در بخش ۴-۱ به آن اشاره شد. به عبارت دیگر مدل سناریو دوم هم در جابجایی‌های نسبی بالا و هم در جابجایی‌های نسبی پایین عملکرد بهتری نسبت به هر دو مدل دیگر دارد. شکل ۱۷ نشان‌دهنده میزان جابجایی نسبی پیش‌بینی شده در مقایسه با جابجایی نسبی واقعی حاصل از نتایج آزمایش برای سناریوی سوم می‌باشد.

$$\ln(\text{Drift}) = 2.2 + 0.47 \ln \left(0.33b2t + \frac{(12r+r2l)}{1+LAC-D^2} \right) - (12r+r2l) \quad (14)$$



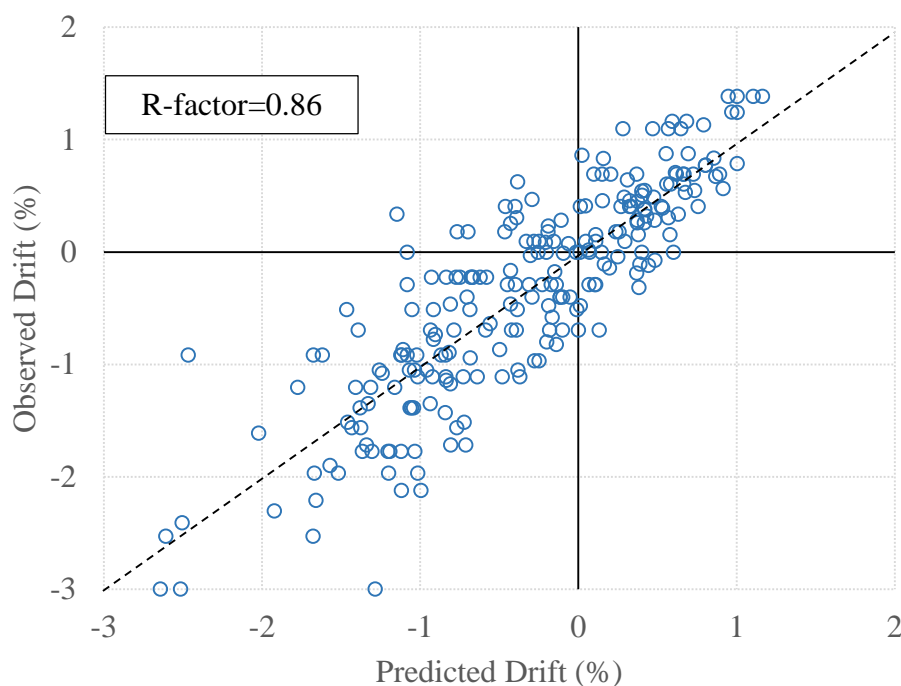
شکل ۱۷ - بررسی نمودار پیش‌بینی - نتایج سناریو سوم

۴-۳-۴ سناریوی چهارم

در سناریوی چهارم برای افزایش هر چه بیشتر دقت مدل، علاوه بر شاخص‌های هندسه فراکتال مورد استفاده در سناریوی سوم، به طور همزمان از تمام مشخصات سازه‌ای موجود برای نمونه‌ها به عنوان ورودی تحلیل استفاده می‌شود. در نتیجه در این مدل، مقاومت فشاری بتن بر حسب مگا پاسکال (f'_c)، نسبت مجموع مساحت آرماتورهای طولی به سطح مقطع طولی دیوار (ρ_l)، نسبت مجموع مساحت آرماتورهای عرضی به سطح مقطع عرضی دیوار (ρ_t)، مقاومت تسلیم آرماتورهای طولی دیوار (f_{yt}) و مقاومت تسلیم آرماتورهای عرضی دیوار (f_{yt}) نیز به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند.

بهترین مدل در این سناریو در رابطه (۱۵) آمده است. از میان مشخصات سازه‌ای پیش گفته، همانگونه که در رابطه (۱۵) مشخص است، مقاومت فشاری بتن (f'_c) و نسبت مجموع مساحت آرماتورهای طولی به سطح مقطع طولی دیوار (ρ_l) بیشترین میزان همبستگی با جابجایی نسبی را در کنار شاخص‌های فراکتال دارا می‌باشند. دیگر پارامترهای ورودی در جریان رگرسیون پارامتری به دلیل همبستگی کم حذف شده‌اند. میزان R-factor این مدل برابر با ۰/۸۶ است که نشان دهنده افزایش ناچیز دقت این مدل در قیاس با سناریوی دوم می‌باشد. به عبارت دیگر شاخه‌های هندسه فراکتال به تنهایی و بدون داشتن اطلاعات سازه‌ای دیوار آسیب دیده بر اثر زلزله، با دقت خوبی نمایانگر میزان خرابی می‌باشند. شکل ۱۸ نشان‌دهنده میزان جابجایی نسبی پیش‌بینی شده در مقایسه با جابجایی نسبی واقعی حاصل از نتایج آزمایش برای سناریوی چهارم می‌باشد.

$$\ln(\text{Drift}) = 0.28 + 0.0017f'_c - \frac{0.041}{0.015 + (12r + r2l) + b2t.D} - 0.026\rho_v LAC \quad (15)$$



شکل ۱۸ - بررسی نمودار پیش‌بینی - نتایج سناریو چهارم

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، پایگاه داده‌ای متشکل از ۲۳۶ عکس از الگوی ترک سطحی دیوارهای برشی بتن مسلح مستطیلی جمع‌آوری شده است. این عکس‌ها از ۷۲ نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط ۱۳ پژوهشگر به دست آمده‌اند. نمونه‌های مورد بررسی دارای گستره‌ای از مشخصات سازه‌ای و هندسی مانند مقاومت فشاری بتن، مقاومت تسلیم آرماتورهای طولی و عرضی، میزان آرماتورهای موجود طولی و عرضی و نسبت ابعادی می‌باشند. سپس الگوی ترک هر دیوار از روی تصویر مربوطه به صورت دستی و غیر خودکار ترسیم شده است. بعد فراکتال، بعد لاکوناریتی و بعد ساکولاریتی، برای تمامی عکس‌ها محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که بعد فراکتال و بعد ساکولاریتی با افزایش میزان جابجایی نسبی در یک نمونه خاص، افزایش می‌یابند. منتها بعد لاکوناریتی وابستگی معناداری به میزان جابجایی نسبی ندارد.

در ادامه، روابط پیش‌بینی کننده برای میزان تغییر مکان جانبی نسبی بین طبقاتی ارائه شده است. برای ورودی‌های معادلات چهار سناریوی متفاوت در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، بعد فراکتال به همراه بعد ساکولاریتی پایین به بالا به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب بعد ساکولاریتی با جهت پایین به بالا، همبستگی بیشتر این جهت با میزان جابجایی نسبی بوده است. در سناریوی دوم، میزان حاصل جمع ساکولاریتی چپ به راست و راست به چپ نیز به ورودی‌ها اضافه گردیده است. در سناریوی بعدی، بعد لاکوناریتی نیز به همراه تمامی ابعاد هندسی پیش گفته، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. در آخرین سناریو، مشخصات سازه‌ای موجود در پایگاه داده مانند مقاومت فشاری بتن، نسبت آرماتورهای طولی و عرضی و مقاومت جاری شدن آرماتورهای طولی و عرضی به ورودی‌های سناریوی سه اضافه گردیدند. سپس با استفاده از رگرسیون پارامتری، روابط پیش‌بینی کننده برای میزان جابجایی نسبی بین طبقاتی حداکثر ارائه گردیده است.

با بررسی سناریوهای مختلف برای مدل‌سازی، نشان داده شد که برای تخمین جابجایی نسبی، بعد فراکتال و ساکولاریتی پایین به بالا، چپ به راست و راست به چپ، شاخص‌های مناسبی برای تعیین میزان پیچیدگی الگوهای ترک هستند. مدل‌های سناریوی اول و

سناریوی دوم برای تخمین جابجایی نسبی پیشنهاد شده‌اند به طوری که مدل سناریوی دوم خطای کمتر و پارامترهای ورودی بیشتری دارد. برای مدل سناریوی اول R-factor برابر با ۰/۸۳ و برای مدل سناریوی دوم R-factor برابر با ۰/۸۵ می باشد.

در مدل سناریوی سوم با وجود افزایش تعداد پارامترهای ورودی به واسطه استفاده از بعد لاکوناریتی، R-factor به ۰/۸۰ کاهش یافته است. بعد لاکوناریتی با افزایش جابجایی نسبی سیر کاهشی دارد اما در نمودار آن نسبت به جابجایی نسبی، پرش مشاهده می‌شود. در نتیجه این شاخص علاوه بر توصیف ویژگی‌های مهم الگوی ترک، برخلاف شاخص‌های دیگر در هندسه فراکتال، برای تخمین جابجایی نسبی نمی‌تواند مناسب باشد.

در مدل سناریوی چهارم، R-factor با اندکی افزایش به ۰/۸۶ رسیده است. در این سناریو مقاومت فشاری بتن و نسبت آرماتورهای طولی ظاهر شده‌اند. افزایش اندک دقت رابطه پیشنهادی برای سناریوی چهارم در مقایسه با سناریوی دوم، نشانگر دقت بالای روابط پیشنهادی برای تخمین میزان جابجایی نسبی بین طبقاتی با استفاده از شاخص‌های هندسه فراکتال می‌باشد. به عبارتی الگوی ترک به تنهایی می‌تواند شاخص خوبی برای کمی سازی میزان خرابی در دیوارهای برشی بتن آرمه باشد.

شایان ذکر است، میزان نسبت ارتفاع به عرض دیوارها به عنوان پارامتر ورودی در کلیه سناریوها در نظر گرفته شده است. منتها همانگونه که در رابطه نهایی سناریو ها مشخص است، این پارامتر در سناریوی یک به صورت واضح در رابطه موجود می باشد. در دیگر سناریوها، دقت بالاتر در رگرسیون پارامتری از آن روابطی بود که این پارامتر در آن‌ها حذف شده بود. به عبارتی میزان نسبت ارتفاع به عرض دیوار اثر خود را در مود و گستردگی خرابی نشان می‌دهد که در سناریوهای دو تا چهار در شاخص‌های جدید افزوده شده فراکتال در آن سناریوها، مستتر است.

با استفاده از میزان تغییر مکان نسبی بین طبقاتی به دست آمده از روابط پیشنهادی، می‌توان سطح خرابی سازه را با استفاده از منحنی‌های شکنندگی مرتبط کمی‌سازی نمود. نتایج این مقاله نشان دهنده قدرت بالای پردازش تصویر الگوهای ترک سطحی اعضاء بتن آرمه با ابزار هندسه فراکتال برای ارزیابی غیرمخرب و پایش سلامت سازه می‌باشد.

مراجع

- [1] Farhidzadeh A, Dehghan-Niri E, Moustafa A, Salamone S and Whittaker A. (2013) Damage assessment of reinforced concrete structures using fractal analysis of residual crack patterns, *Experimental Mechanics*, 53(9), 1607–1619.
- [2] Vienna, Austria, (2002) *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, IAEA.
- [3] Issa, MA, Islam, MS, Chudnovsky A. (2003) Fractal dimension-a measure of fracture roughness and toughness of concrete, *Eng Fract Mech*, 70(1), 125-137.
- [4] Ebrahimkhanlou A, Farhidzadeh A, Salamone S. (2016) Multifractal analysis of crack patterns in reinforced concrete shear walls. *Struct Health Monit* 15(1): 81–92.
- [5] Momeni H, Dolatshahi KM. (2019). Predictive equations for drift ratio and damage assessment of RC shear walls using surface crack patterns. *Engineering Structures*, 190, 410-421.
- [6] Madani HM, Dolatshahi, KM. (2020). Strength and stiffness estimation of damaged reinforced concrete shear walls using crack patterns. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(4).
- [7] Dolatshahi KM, Beyer K. (2019) Stiffness and Strength Estimation of Damaged Unreinforced Masonry Walls Using Crack Pattern. *J. Earthq. Eng.* 1–20.
- [8] Athanasiou A, Ebrahimkhanlou A, Zaborac J, Hrynyk T, Salamone S. (2020) A machine learning approach based on multifractal features for crack assessment of reinforced concrete shells. *Comput-Aided Civ Infrastruct Eng* 35(6): 565–578.

- [9] Rezaie A, Mauron AJP, Beyer K. (2020) Sensitivity analysis of fractal dimensions of crack maps on concrete and masonry walls. *Autom Constr* 117: 103258.
- [10] Asjodi AH, Daeizadeh MJ, Hamidia M, Dolatshahi KM. (2021) Arc Length method for extracting crack pattern characteristics. *Struct Control and Heal Monit* 28(1): 1–14
- [11] Mandelbrot RP. (1983) *The fractal geometry of nature*, W.H. Freeman NewYork.
- [12] De Melo R. (2007) Using fractal characteristics such as fractal dimension, lacunarity and succolarity to characterize texture patterns on images, Master's thesis, Federal Fluminense University.
- [13] Gefen Y, Meir Y, and Aharony A. (1983) Geometric implementation of hypercubic lattices with noninteger dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices. *Physical Review Letters*, 50: 145-148.
- [14] Allain C and Cloitre M. (1991) Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets *Phys. Rev. A* 44(6), 3552.
- [15] De Melo R, Conci A. (2013) How Succolarity could be used as another fractal measure in image analysis, *Telecommunication Systems*, 52(3), 1643-1655.
- [16] Luna BN, Rivera JP, Whittaker AS. (2015) Seismic behavior of low-aspect-ratio reinforced concrete shear walls. *ACI Struct J*;112:593–603.
- [17] Tran T, Wallace JW. (2012) Experimental study of nonlinear flexural and shear deformations of reinforced concrete structural walls. *15th World Conf Earthq Eng*.
- [18] Birely A, Lehman D, Lowes L, Kuchma D, Hart C, Marley K. (2008) Investigation of the seismic behavior and analysis of reinforced concrete structural walls. *14th World Conf Earthq Eng* Oct 12-17, Beijing, China.
- [19] Kuang JS, Ho YB. (2006) Inherent ductility of reinforced concrete shear walls with non-seismic detailing. *31st Conf Our World Concr Struct*.
- [20] Massone LM. (2006) RC wall shear – flexure interaction: analytical and experimental responses. PhD Dissertation, University of California, Los Angeles.
- [21] Greifenhagen C, Lestuzzi P. (2005) Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls. *Eng Struct* 27:1703–12.
- [22] Oh YH, Han SW, Lee LH. (2002) Effect of boundary element details on the seismic deformation capacity of structural walls. *Earthq Eng Struct Dyn* 31:1583–602.
- [23] Dazio A, Beyer K, Bachmann H. (2009) Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls. *Eng Struct* 31:1556–71.
- [24] Salonikios TN, Kappos AJ, Tegos I a, Penelis GG. (2000) Cyclic load behavior of low-slenderness reinforced concrete walls : failure modes , strength and deformation analysis , and design implications 132(42).
- [25] Tomažević M, Lutman M, Capuder F, Petković L. (1996) Seismic behaviour of R. C. shear-walls : an experimental study. *Elev World Conf Earthq Eng Acapulco, Mexico*
- [26] Lopes MS.(2001) Experimental shear-dominated response of RC walls. Part I: Objectives, methodology and results. *Eng Struct* 23:564–74.
- [27] Lefas I, Kotsovos M, Ambraseys N. (1990) Behavior of reinforced concrete structural walls: strength, deformation characteristics, and failure mechanism. *ACI Struct J*.
- [28] Pilakoutas K, Elnashai a. (1995) Cyclic behavior of reinforced concrete cantilever walls, Part I: Experimental results. *ACI Struct J* 92:271–81.
- [29] Schmidt, M, Lipson H. (2009) Distilling free-form natural laws from experimental data *Science* 324 (5923), 81-85.