



Estimation of Cracking, Yield, and Ultimate Capacity of FRP-Strengthened Reinforced Concrete and Steel Sections using Wavelet Transform

M.R. Mohammadzadeh*, S. Salami

Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

ABSTRACT: Damage detection is a topic of great importance for structural health monitoring. Many varieties of structural damage can be detected by examining changes in structural response in terms of stiffness. Wavelet transform is a powerful mathematical tool for the processing and time-frequency analysis of transient signals and has great potential to be used in structural damage detection. In FRP-strengthened reinforced concrete and steel sections, stiffness changes can be caused by cracking, yielding of steel components, crushing of concrete, or rupture of FRP panels. With the help of wavelet transform, it is possible to use the continuous measurements of the response to bend or torsional loading to estimate the capacity of the cross-section corresponding to the stiffness changes. In this paper, the bending of FRP-reinforced steel beams filled by concrete under bending and CFRP-reinforced concrete beams under pure torsion is evaluated. The results showed that the location of the damage appears as perturbations in the diagram of discrete wavelet coefficients, which indicate the time of cracking, yielding of steel, crushing of concrete in the compression zone, and rupture of FRP. Therefore, a wavelet transform-based data processing procedure can be used to estimate the cracking and yielding capacities of the beams subjected to torsion, the yielding capacity of the steel, and the ultimate capacity of the beams subjected to bending. The results demonstrated a high level of agreement between the estimates obtained from the discrete wavelet transform method and the examined experimental and numerical data.

Review History:

Received: Oct. 17, 2019

Revised: Nov. 27, 2019

Accepted: Jan. 09, 2020

Available Online: Feb. 04, 2020

Keywords:

Wavelet Transform

Damage Detection

Cracking Capacity

Torsion

Bending.

1- Introduction

Detection of the damages in structural retrofitting or its reconstruction is very essential [1]. It is significant that a reliable, effective, and noninvasive detection method is used to maintain the safety and integrity of structures [2]. One of the damage detection methods is wavelet transform. Among the most important studies, we may refer to Wei *et al.* [3], Zhong and Oyadiji [4], Yang and Oyadiji [5], Patel *et al.* [6]. In the present study, first, the wavelet transform is theoretically defined. Thereafter, it will be shown that the capacity of the reinforced beams under torsion or bending will be obtained through wavelet transform analysis.

2- Wavelet transform theory

Signal processing is mainly performed aiming at obtaining as much information as possible from the initial signal. Continuous wavelet transform was developed as a method based on window Fourier transform to solve its response problem. In wavelet transform, the width of the window varies to calculate each frequency range of the signal, and this is the most important characteristic of wavelet transform [7, 8]. One of the main advantages of the wavelets is the ability of local analysis of a large signal. Wavelet transform reveals

*Corresponding author's email:mrz_mohammadzadeh@hormozgan.ac.ir

aspects of the data that could not be shown by other signal analysis techniques. Aspects such as trends, breakpoints, and discontinuities can be identified through higher derivatives in wavelet analysis [9].

3- The behavior of structural elements under the influence of load at various phases

The behavioral diagram shown in Fig. 1 indicates the various behavioral phases of reinforced concrete under bending or torsional loading. The OA segment of the curve shows the completely elastic behavior of the concrete section. As the load increases, the AB segment of the curve shows an elastoplastic behavior in the section. In the BC segment of the curve, the steel strain increases, and the concrete collapse. Finally, point C represents the failure of the section, and the corresponding force indicates the ultimate capacity of the concrete section. The phase shift always accompanies lower hardness in the section under the influence of loading. Generally, the capacity-demand curves of the reinforced concrete elements under the influence of bending or torsion are as shown in Fig. 1. By examining the capacity-demand curve and discrete wavelet transform, we can track the cracking, yielding, and ultimate capacities of the section with the increased loading in the loading regime.



Table 1. Cracking, yielding, and ultimate torsional moments of the beam obtained from experiments [10] as well as the wavelet transform results

Experimental Specimens	Cracking Torsional Moment (Exp.) ¹ (kN.m)	Cracking Torsional Moment (Wav. Trans.) ² (kN.m)	Error. Percentage %	Yielding Torsional Moment (Exp.) (kN.m)	Yielding Torsional Moment (Wav. Trans.) (kN.m)	Error Percentage %	Ultimate Torsional Moment (Exp.) (kN.m)
ACW1	13.33	13.148	1.365	17.46	16.95	2.921	21.41
ACW2	15.15	15.176	0.17	17.63	18.01	2.155	25.26
BCW1	12.46	-	-	22.5	-	-	29.48
BCUJ	16.12	16.09	0.186	23	23.63	2.739	29.85
CCW1	16.56	16.47	0.543	28	28.23	0.821	33.87

¹ Exp.: Experimental, ² Wav. Trans.: Wavelet Transform

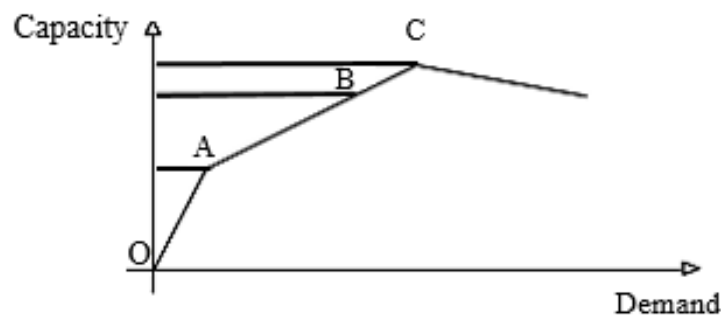


Fig. 1. Behavioral diagram of the reinforced concrete cross-section under loading

4- Methodology

To determine the cracking, yield, and ultimate capacities of CFRP-reinforced concrete beams under pure torsion, five experimental specimens from Mohammadzadeh *et al.* were used [10]. Wavelet transform coefficients obtained from the response analysis and perturbation time of the signal details of the beam end torsion angle are investigated and their compatibility with the time of the concrete cracking and yielding are discussed. Next, the results of three experimental specimens from the reference [11] are utilized to determine the yield and ultimate capacities of CFRP-reinforced steel beams filled with concrete under the influence of bending. The wavelet transform coefficients and the perturbation time of the signal details of the vertical displacement in the middle of the beam are investigated corresponding to the steel yielding moment and the ultimate strength of the section.

5- Results and Discussion

In the present study, we first investigated the response of CFRP-reinforced experimental specimens under pure torsion, so that the torsion angle corresponding to the first cracking and yielding of the concrete is determined. The experimental results were analyzed by the discrete wavelet transform, and the damaged area was specified as fluctuations in the wavelet coefficient curve. It was declared that using this method, the time of collapse and the corresponding torsion angle could be determined at first crack and yielding of the concrete by

the beam end torsion angle. By comparing the experimental results and the wavelet analysis, it can be seen that the torsional moment associated with the cracking angle obtained from the wavelet analysis corresponds to the torsional moment of the section in the laboratory results, which is obtained indirectly. Also, through numerical modeling of the steel beam filled with the CFRP-reinforced concrete in the Abacus, the response of the vertical displacement of the middle of the beam was verified in the laboratory under the influence of bending. Then the response of the vertical displacement of the middle of the beam was analyzed using discrete wavelet transform and the perturbation area of the first-level details of the signal corresponding to the steel yield moment and the ultimate section moment were compared with the corresponding values from the experimental results. Therefore, with this method and the diagram of the response of the vertical displacement of the middle of the beam, the vertical displacement corresponding to the yielding of the steel and the ultimate section was determined. Studies show that the mother wavelet functions of sym7 and db4 have very good performance in detecting the cracking, steel yield, and ultimate state in CFRP-reinforced beams and their corresponding moments. Therefore, the discrete wavelet transform has a high capability to analyze the experimental and numerical data responses and shows the discontinuities of the signal as perturbations on the wavelet coefficient graph. Table 1 shows the results of cracking torsional moment,

Table 2. The ultimate bending moment obtained from numerical analysis and ultimate bending moment obtained from wavelet transform

Specimens	Ultimate Bending Moment (Num.) ¹ (kN.m)	Ultimate Bending Moment (Wav. Trans.) ² (kN.m)	Error Percentage %
FWB-L1(3)	28	28.45	1.61
FWB-L2(3)	34.54	34.1	1.273
FWB-L3(2)	28.7	29.2	1.742

¹Num. Numerical, ²Wav.Trans. Wavelet Transform

yielding torsional moment, and ultimate torsional moment of five experimental specimens under the influence of pure torsion obtained by experiments and the corresponding results obtained from wavelet transform, as well as the error percentage.

¹Exp.: Experimental, ²Wav. Trans.: Wavelet Transform

Table 2 shows the results of the ultimate torsional moment of three specimens of steel beams reinforced by CFRP and filled with concrete under the influence of bending obtained by the numerical analysis and the corresponding results obtained from wavelet transform and error percentage.

¹Num. Numerical, ²Wav.Trans. Wavelet Transform

6- Conclusion

According to the results, it can be shown that the mother wavelet functions of sym7 and db4 have very good performance in detecting the steel cracking, yielding, and ultimate state in the CFRP-reinforced beams and their corresponding moments. Therefore, the discrete wavelet transform has a high capability to analyze the experimental and numerical data responses and shows the discontinuities of the signal as perturbations on the wavelet coefficient diagram.

References

- [1] Sumitomo, S., Matsui, Y., Kono, M., Okamoto, T., Fujii, K., 2001. "Long span bridge health monitoring system in Japan", Health Monitoring and Management Systems, Proceedings of SPIE 4337, 517–524.
- [2] Joo, D. J., 2012. "Damage Detection and System Identification using a Wavelet Energy Based Approach", (Doctoral dissertation, Columbia University).
- [3] Su, W. C., Le, T. Q., Huang, C. S., Lin, P. Y., 2018. "Locating damaged storeys in a structure based on its identified modal parameters in Cauchy wavelet domain", Applied Mathematical Modelling, 53, 1–19.
- [4] Zhong, S., Oyadiji, S. O., 2011. "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", Computers and Structures, 89(1-2), 127–148.
- [5] Yang, C., Oyadiji, S. O., 2017. "Damage detection using modal frequency curve and squared residual wavelet coefficients-based damage indicator", Mechanical Systems and Signal Processing, 83,385-405.
- [6] Patel, S. S., Chourasia, A. P., Panigrahi, S. K., Parashar, J., Parvez, N., Kumar, M., 2016. "Damage Identification of RC Structures using Wavelet Transformation", Procedia Engineering, 144,336-342.
- [7] Kumar, P., Foufoula-Georgiou, E., 1997. "Wavelet analysis for geophysical applications". Reviews of geophysics, 35(4), 385-412.
- [8] Polikar, R., The wavelet tutorial, at <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS>.
- [9] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M. 1996. "Wavelet toolbox user's guide". The Math Works Ins. 2-36.
- [10] Mohammadzadeh, M.R., Fadaie, M., Rounagh, H., 2009. "Improving torsional behaviour of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer composite".
- [11] Al Zand, A. W., Badaruzzaman, W. H. W., Mutalib, A. A., & Qahtan, A. H., 2015. "Finite element analysis of square CFST beam strengthened by CFRP composite material". Thin-Walled Structures, 96, 348-358.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M.R. Mohammadzadeh, S. Salami, H. Ghohani Arab., Estimation of Cracking, Yield, and Ultimate Capacity of FRP-Strengthened Reinforced Concrete and Steel Sections using Wavelet Transform. Amirkabir J. Civil Eng., 53(5) (2021) 439-442

DOI: [10.22060/ceej.2020.17236.6499](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17236.6499)





تخمین ظرفیت ترک خوردگی، تسلیم و نهایی مقاطع بتن مسلح و فولادی مقاوم سازی شده با استفاده از FRP به کمک تبدیل موجک

محمد رضا محمدی زاده^{*}، سامان سلامی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۵
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

کلمات کلیدی:

تبدیل موجک
تشخیص خرابی
ظرفیت ترک خوردگی
پیش
خمش

خلاصه: امروزه تشخیص خرابی در سازه ها، از موضوعات مورد توجه در بحث پایش سلامت سازه ها می باشد. با بررسی تغییرات ایجاد شده در پاسخ سازه ای به لحاظ تغییر سختی، می توان انواع خرابی ها را شناسایی نمود. تبدیل موجک یک ابزار نسبتاً جدید ریاضی در زمینه پردازش سیگنال های ناپایدار می باشد و با مباحث زمان و فرکانس ارتباط نزدیکی داشته و قابلیت زیادی را برای تشخیص آسیب سازه ای دارد. تغییرات سختی شامل ترک خوردگی، تسلیم شدگی فولاد، خردشدگی بتن و گسیختگی FRP در مقاطع مقاوم سازی شده بتن مسلح یا فولادی می باشد. به کمک تبدیل موجک می توان با اندازه گیری لحظه به لحظه پاسخ حاصل از بارگذاری خمشی یا پیچشی، ظرفیت مقطع متناظر با تغییرات سختی را تعیین نمود. نمونه های آزمایشگاهی مورد بررسی شامل تیرهای فولادی مقاوم سازی شده با FRP پر شده با بتن تحت اثر خمش و تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با CFRP تحت اثر پیچش خالص موجود در ادبیات فنی می باشد. نتایج حاصل از تبدیل موجک نشان می دهد که محل آسیب به صورت اغتشاشاتی در نمودار ضرایب موجک گسسته نمایان می شود که بیانگر زمان رخداد ترک خوردگی، تسلیم شدگی فولاد، خردشدگی بتن در ناحیه فشاری و گسیختگی FRP است. لذا با استفاده از تبدیل موجک و پردازش داده ها می توان ظرفیت های ترک خوردگی و تسلیم مقطع تیرهای تحت اثر پیچش و ظرفیت تسلیم فولاد و ظرفیت نهایی مقطع تیرهای تحت اثر خمش را محاسبه نمود. نتایج نشان می دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج بدست آمده از روش تبدیل موجک گسسته با نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.

۱- مقدمه

شکل های سازه می شود. بنابراین، اندازه گیری های نسبتاً ساده ای ارتعاش یک سازه و استخراج اطلاعات فرکانسهای طبیعی و مد شکل-ها از داده ها، امکان تشخیص آسیب را ممکن می سازد [۲] برای حفظ ایمنی و یکپارچگی سازه ها، روش قابل اعتماد و کارآمد تشخیص غیرمخرب آسیب، اهمیت ویژه ای دارد [۳] بیشتر روشهای تشخیص آسیب غیرمخرب را می توان به دو دسته موضعی یا سراسری بسته به سطح مقیاس بکار گرفته شده، تقسیم کرد. روش های تشخیص آسیب موضعی به روشهای غیرمخرب بازمی گردد که در آن وجود و محل آسیب موضعی قابل شناسایی است. بازرسی بصری یکی از معمول ترین روشها برای مشاهده آسیب سازه ای است، اما برای سازه هایی با پیچیدگی بیشتر، کارایی بازرسی بصری کاهش می یابد

تمام سازه های ساخت بشر دارای عمر محدودی هستند و با گذر زمان از بین می روند. خستگی، خوردگی، پدیده های طبیعی، بارگذاری بیش از حد و شرایط محیطی می تواند باعث تخریب آنها شود. تشخیص زودهنگام آسیب بسیار ضروری است؛ زیرا گسترش آن ممکن است منجر به خرابی فاجعه بار شود. همچنین تشخیص دقیق آسیب در تقویت سازه و یا بازسازی آن بسیار ضروری است [۱] آسیب باعث تغییر مقادیر پارامترهای دینامیکی در سازه می شود و وجود آن در سازه موجب کاهش سختی و افزایش خستگی می شود. کاهش سختی در سازه باعث کاهش فرکانسهای طبیعی ارتعاش و تغییر مد

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: mrzmohammadzadeh@yahoo.com



روی مقطع تیر طره آلومینیومی ترک خورده، تحت اثر یک جابه-جایی استاتیک (ایستا) در انتهای آزاد آن برای شناسایی ترک انجام شد. آنها تشخیص خرابی تیر را برای ترکهایی با عمق متفاوت انجام دادند و ثابت شد که تبدیل موجک مکانی در تشخیص ناحیه آسیب دیده، حتی زمانی که عمق ترک حدود ۲۶ درصد ضخامت تیر است، مؤثر می‌باشد [۹]. اسپاگنولی و همکاران^۷ به تحقیق بر روی تشخیص خرابی غیرخطی در تیرهای کامپوزیت ترکدار تقویت شده با الیاف، از طریق آنالیز موجک زمان-مکان پرداختند [۱۰]. باقری و کورهللی^۸ به تحقیق بر روی تشخیص خرابی ساختمان تحت اثر اعمال نیروی زلزله به کمک آنالیز موجک گسسته پرداختند. روش پیشنهادی آنها بر پایه تشخیص تغییرات ناگهانی در پاسخ ارتعاش لرزه‌های به وسیله آنالیز پاسخ جابه‌جایی یا پاسخ سرعت به کمک آنالیز موجک می‌باشد [۱۱]. در این مطالعه ابتدا به تعریف تئوری تبدیل موجک پرداخته می‌شود. سپس در این مطالعه نشان داده می‌شود که با استفاده از آنالیز موجک می‌توان ظرفیت تیرهای مقاوم‌سازی شده تحت اثر پیچش یا خمش را بدست آورد. برای تعیین ظرفیت ترک‌خوردگی، تسلیم و نهایی در تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با CFRP تحت اثر پیچش خالص از نتایج چندین نمونه آزمایشگاهی مربوط به کار تحقیقاتی محمدی زاده و همکاران استفاده می‌شود [۱۲] برای حصول اطمینان و افزایش دقت در تشخیص محل کاهش سختی‌ها جهت آنالیز پاسخ‌ها به کمک تبدیل موجک گسسته، مدل‌سازی عددی تیرهای ذکر شده در نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است. ضرایب تبدیل موجک حاصل از آنالیز پاسخ و زمان اغتشاشات جزئیات سیگنال زاویه پیچش انتهایی تیر مورد بررسی قرار گرفته و تطابق آن با زمان رخداد ترک‌خوردگی بتن و تسلیم‌شدگی فولاد، بحث و بررسی می‌شود. در ادامه برای تعیین ظرفیت تسلیم و نهایی در تیرهای فولادی مقاوم سازی شده با CFRP پر شده از بتن تحت اثر خمش از نتایج سه نمونه آزمایشگاهی مربوط به کار تحقیقاتی مرجع [۱۳] استفاده می‌شود. سه نمونه تیر آزمایشگاهی که قبلاً در آزمایشگاه تست شده و نتایج آن در ادبیات فنی موجود است را به کمک نرم افزار آباکوس مدل‌سازی و کالیبره می‌شود. پس از استخراج نتایج جابه‌جایی قائم وسط تیر از نرم‌افزار آباکوس، تحلیل موجک گسسته مشابه قبل صورت می‌پذیرد. ضرایب تبدیل موجک و زمان اغتشاشات جزئیات سیگنال جابه‌جایی قائم

و شناسایی آسیب‌هایی که پنهان و غیرقابل مشاهده با چشم انسان است، غیر ممکن است. به این ترتیب روشهای دیگر موضعی مانند روشهای صوتی و یا اولتراسونیک (فراصوت)، مغناطیسی، رادیوگرافی و جریانهای حرارتی به عنوان گزینه‌های مناسبتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مزیت‌های اصلی این روشها آن است که مستقیماً به داده‌های بدست آمده از سازه آسیب دیده نیاز می‌باشد و به اطلاعات سازه سالم هیچ وابستگی وجود ندارد. ایده اساسی در مورد روشهای تشخیص آسیب سراسری این است که پارامترهای سازه‌های هنگامی که آسیب در یک سازه اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند و این تغییرات در نتیجه تغییر خصوصیات دینامیکی می‌باشد [۴]. از جمله تحقیقات انجام گرفته در خصوص تشخیص آسیب با استفاده از تبدیل موجک می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

وی و همکاران^۱ در مقاله‌های به توسعه تشخیص موضعی محل آسیب بر اساس انعطاف‌پذیری در موارد ارتعاش لرزه‌های در جایی که مدل اجزاء محدود و ماتریس جرم در دسترس نیست، پرداختند [۴] ژانگ و اودایجی^۲ یک رویکرد جدید برای تشخیص آسیب سازه‌های تیر مانند با ترکهای کوچک (نسبت ترک‌خوردگی کمتر از ۵ درصد) در داده‌های مود شکل یک تیر ترک‌خورده، به کمک تبدیل موجک ارائه دادند [۵] فن و ژیاو^۳ تشخیص آسیب بر پایه تبدیل موجک دوبعدی را برای سازه‌های ورق‌گونه با استفاده از موجک Dergauss^{۲d} ارائه کردند. الگوریتم پیشنهادی یک تکنیک تشخیص آسیب مبتنی بر پاسخ بود که فقط به مود شکل صفحات آسیب‌دیده نیاز داشت [۶] یانگ و اودایجی^۴ یک مطالعه تئوری و تجربی از روش تشخیص آسیب براساس فرکانس ارائه دادند و مشخصات خرابی را از منحنی فرکانس مودال به کمک تبدیل موجک گسسته استخراج نمودند. آنها روش پیشنهادی خود را برای یک نمونه آلومینیومی با خرابی از پیش تعیین شده بکار بردند [۷] پاتل و همکاران^۵ امکان استفاده از روش تبدیل موجک را برای تشخیص خرابی در یک ساختمان بتن مسلح بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ضرایب موجک به طور مستقیم از تغییرات ویژگی‌های فیزیکی سازه تأثیر می‌پذیرد و می‌تواند به صورت منطقی خرابی را شناسایی کند [۸]. تحقیق تجربی واو و وانگ^۶ بر

- 1 Wei et al.
- 2 Zhong & Oyadiji
- 3 Fan & Qiao
- 4 Zhong & Oyadiji
- 5 Patel et al.
- 6 Wu & Wang

7 Spagnoli et al.

8 Bagheri, & Kourehli

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad \text{نامیده می‌شود:}$$

که در آن s و τ به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند [۱۷ و ۱۸]

برای آنکه یک تابع به عنوان تابع پایه (تابع موجک مادر) در تبدیل موجک مورد استفاده قرار گیرد باید دارای خواص زیر باشد:

۱. تابع موجک $\psi(t)$ باید دارای میانگین صفر باشد:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (۳)$$

۲. تابع موجک $\psi(t)$ باید دارای انرژی محدود باشد:

$$E_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (۴)$$

که در آن E_{ψ} انرژی تابع موجک $\psi(t)$ میباشد. اغلب اوقات در عمل تابع موجک $\psi(t)$ نرمال شده است؛ بنابراین دارای انرژی واحد است:

$$E_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (۵)$$

۳. تابع موجک $\psi(t)$ شرط پذیرفتگی را ارضا کند:

$$C_{\psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad 0 < C_{\psi} < \infty \quad (۶)$$

که $\Psi(\omega)$ نشاندهنده تبدیل فوری $\psi(t)$ میباشد و C_{ψ} ضریب پذیرفتگی $\psi(t)$ نامیده می‌شود [۳]

اینگرید دابشیز یکی از ستاره های جهان در تحقیقات موجک، با اختراع توابع موجک، تجزیه و تحلیل موجک گسسته را عملی ساخت. توابع موجک مادر Symlet از جمله توابع موجک متقارن پیشنهاد شده توسط دابشیز برای اصلاح خانواده توابع db می باشند و به یکدیگر شباهت دارند. توابع موجک مادر sym^۷ و db^۴ به ترتیب در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است.

یکی از مزیت‌های اصلی فراهم شده توسط موجک، توانایی انجام تجزیه و تحلیل موضعی از یک سیگنال بزرگ میباشد. آنالیز موجک قادر به آشکارسازی جنبه‌هایی از داده‌ها است که دیگر تکنیک‌های آنالیز سیگنال دارای این توانایی نمی باشند. جنبه‌هایی نظیر روندها، نقاط شکست و ناپیوستگی‌ها در مشتقات بالاتر در آنالیز موجک قابل

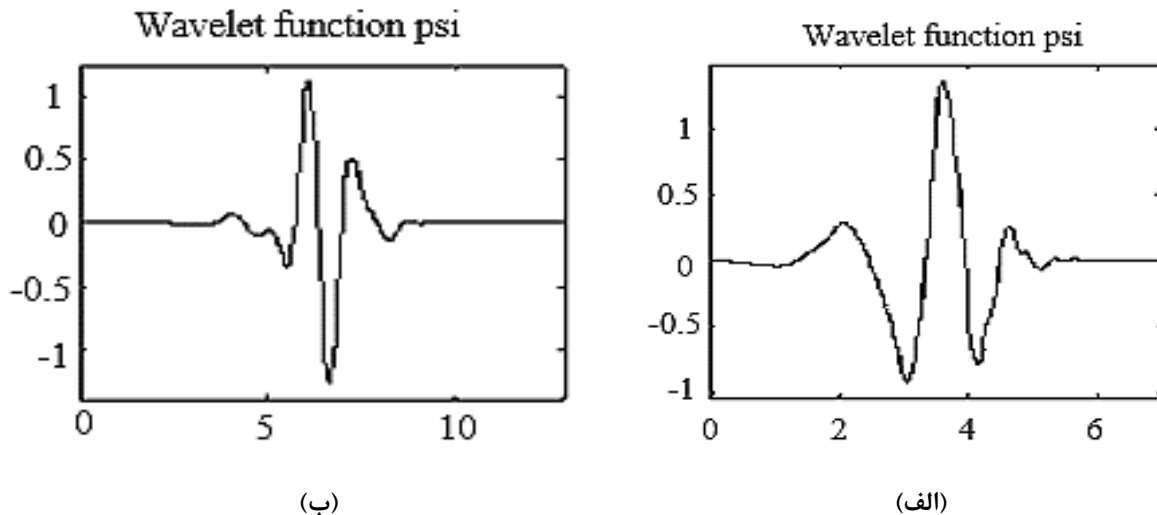
وسط تیر با لحظه تسلیم فولاد و پارگی FRP و همچنین مقاومت نهایی مقطع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تئوری تبدیل موجک

هدف اصلی از پردازش سیگنال بدست آوردن اطلاعات بیشتر از سیگنال خام تا حد ممکن می باشد. در سال ۱۸۰۸، جوزف فوریه ریاضیدان فرانسوی، نشان داد که هر سیر تناوبی را می‌توان به وسیله مجموعه ارتعاشات سینوسی بیان کرد. تبدیل فوریه در حقیقت یک تابع را به سینوس‌هایی با فرکانس‌های مختلف تجزیه می‌کند. این تبدیل یک نمایش فرکانس سیگنال را فراهم کرده و اطلاعاتی را در خصوص مؤلفه‌های فرکانسی موجود در سیگنال ارائه میکند. تبدیل فوریه ابزار مناسبی برای آنالیز سیگنال‌های پایدار که مؤلفه‌های فرکانس در تمام لحظات وجود دارد، می باشد. اما برای سیگنال‌های ناپایدار که زمان مؤلفه‌های طیفی مورد نیاز است، به تبدیلی که زمان-فرکانس را ارائه دهد، نیاز می باشد. در سال ۱۹۴۶، دنیس گابور تبدیل فوریه را برای تجزیه و تحلیل بخش‌های کوتاهی از یک سیگنال بکار برد. فرض شد که این بخش‌های کوتاه پایدار هستند و جداگانه با استفاده از یک تابع پنجره، در امتداد سیگنال انتقال می‌یابند. گابور این روش را تبدیل فوریه پنجره‌های نامید که سیگنال را به یک تابع دو بعدی از زمان و فرکانس نگاشت می‌کند. ضعف تبدیل فوریه پنجره-ای این واقعیت است که این تبدیل از پنجره مشابه برای تحلیل کل سیگنال استفاده می‌کند [۱۴] تبدیل موجک پیوسته به عنوان روشی به دنبال تبدیل فوریه پنجره‌های برای فائق آمدن بر مشکل پاسخ آن گسترش یافت. در تبدیل موجک برای محاسبه ی هر طیف فرکانسی سیگنال، پهنای پنجره تغییر می‌کند و این مهمترین مشخصه ی تبدیل موجک است [۱۵ و ۱۶] تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

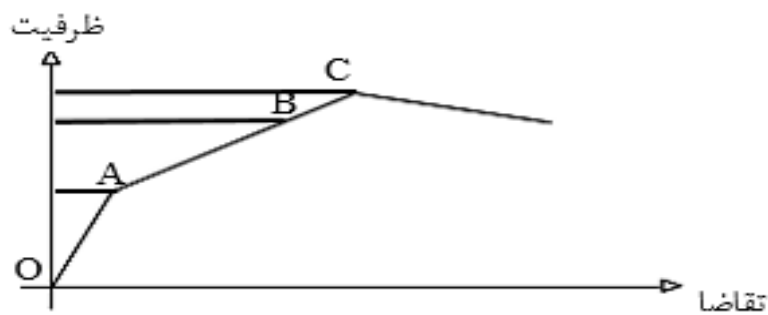
$$CWT(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt = \langle f(t), \psi_{s,\tau}(t) \rangle \quad (۱)$$

خانواده موجک $\psi_{s,\tau}(t) \psi_{s,\tau}(t)$ به عنوان مجموعه ای از توابع پایه که توسط مقیاس دهی (فشرده‌گی و گسترده‌گی) و انتقال دهی (جابجایی زمانی) تولید شده، معرفی شده است و توابع موجک مادر



شکل ۱. الف) تابع موجک مادر sym7 و ب) تابع موجک مادر db4 [۱۹]

Fig. 1. Mother wavelet function: a) sym7, b) db4



شکل ۲. منحنی رفتاری مقطع بتن مسلح تحت اثر بارگذاری

Fig. 2. The behavioral curve of cross section of reinforced concrete under loading

استفاده از گسسته ساز، لگا، بتم، با، امت، مقاب، ه، گام های، مکانی

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi\left(\frac{t - k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad \text{و(بلگته به آن است.)}$$

$$s = s_0^j, \tau = k\tau_0 s_0^j, \text{ for } s_0 > 1, \tau_0 \geq 1, j, k \in \mathbb{Z} \quad (۸)$$

برای تأثیرپذیری کاربردی و محاسباتی، به طور معمول پارامترهای
 $s_0 = 2s_0 = 2$ و $\tau_0 = 1\tau_0 = 1$ تعریف می شوند و موجک شبکه

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t - k2^j}{2^j}\right) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad k \in \mathbb{Z} \quad \text{دو(۹)}$$

تشخیص است. در واقع تبدیل موجک، در تاریخ کوتاه خود در زمینه پردازش سیگنال به عنوان ابزار تحلیلی ضروری مورد استفاده قرار میگیرد و محبوبیت آن روز به روز رو به رشد است [۱۹]

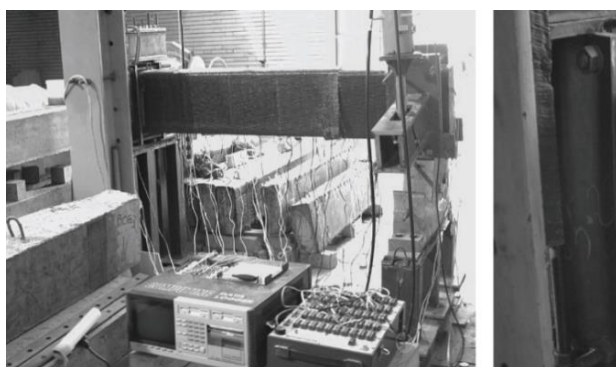
۲-۱- گسسته کردن تبدیل موجک پیوسته

امروزه برای انجام بسیاری از محاسبات از کامپیوترها استفاده می شود. واضح است که نمی توان در عمل با استفاده از معادلات تحلیلی و انتگرال های تبدیل فوریه، تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک را محاسبه نمود و لازم است که این تبدیل ها گسسته شوند [۱۶]. یک روش عملی برای نمونه برداری از پارامترهای پیوسته s و τ

ظرفیت-تقاضا، به کمک تئوری تبدیل موجک، موارد فوق را بدست آورد.

۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی تحت اثر پیچش خالص

پنج تیر بتن مسلح با سطح مقطع مربع مستطیل ۱۵۰×۳۵۰ mm و پوشش بتن به ضخامت ۲۵ mm در آزمایشگاه ساخته شد. طول کلی تیر برابر ۲۰۰۰ mm می‌باشد و طول ناحیه مورد آزمایش تیر، ۱۶۰۰ mm در وسط تیر در نظر گرفته شده است. تقویت بیشتر تیر در خارج از طول ناحیه مورد آزمایش برای جلوگیری از شکست زودرس، اعمال شده است. مطابق شکل ۳، چهار میلگرد طولی با قطر ۱۰ mm، ۱۴ mm و ۱۶ mm به ترتیب برای تیرهای گروه A، B و C در هر گوشه از مقطع قرار داده شده‌اند. در تیرهای گروه A و B از خاموتیایی با قطر ۸ mm و فاصله ۸۰ mm از یکدیگر و در تیر گروه C، خاموتیایی با قطر ۱۰ mm و به فاصله ۸۰ mm از یکدیگر بکار برده شده است. نسبت کلی فولاد طولی و عرضی به کار برده شده در مقطع تیرهای گروه A، B و C به ترتیب برابر ۵۶٪، ۱٪ و ۲/۱۳٪ و ۳/۰۳٪ می‌باشد. نمونه‌های ACW^۱، BCW^۱ و CCW^۱ با استفاده از یک لایه و نمونه ACW^۲، با استفاده از دو لایه CFRP پیرامون مقطع و در سرتاسر طول تیر در جهت طولی محور تیر مقاومسازی شده است. تیر با نام BCUJ، با ورقهای CFRP در دو وجه جانبی و وجه پایین تیر به شکل U اجرا و مقاومسازی شده است [۱۲] نمای کلی از دستگاه آزمایش برای اعمال پیچش خالص به نمونه‌ها در شکل ۴

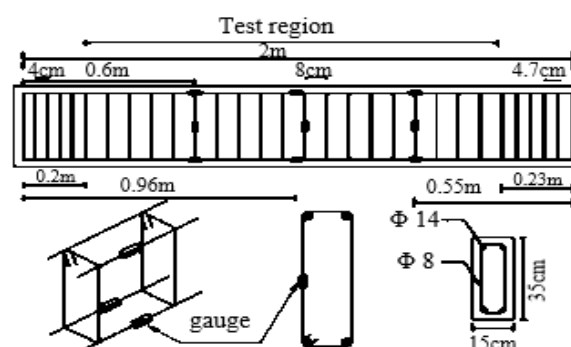


شکل ۴. بارگذاری پیچشی برای نمونه‌های آزمایشگاهی [۱۲]
Fig. 4. Torsional loading for experimental specimens

۳- رفتار المان‌های سازه‌ای تحت اثر بار در فازهای مختلف

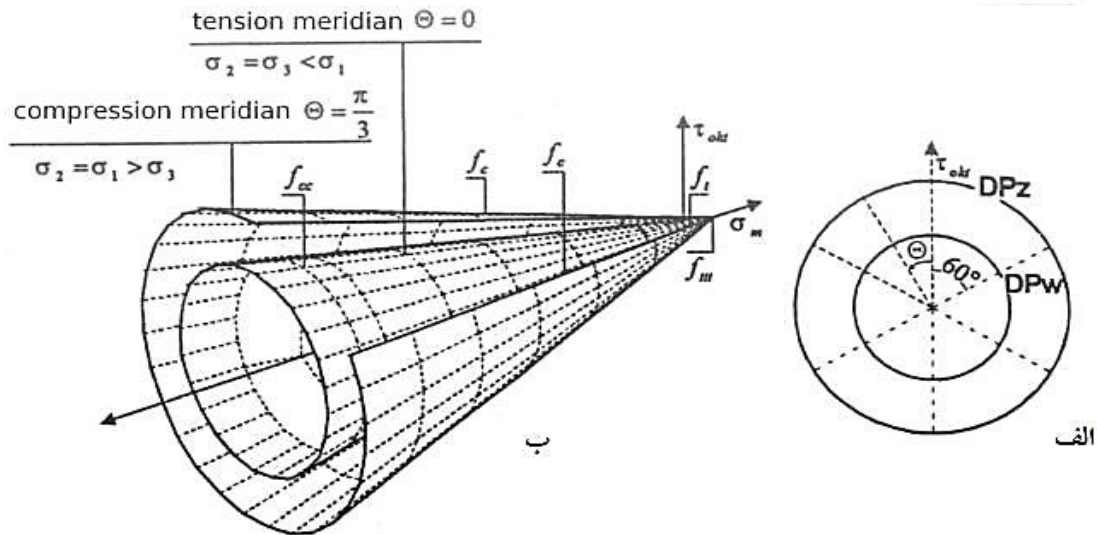
منحنی رفتاری نشان داده شده در شکل ۳، فازهای مختلف رفتاری یک مقطع بتن مسلح تحت اثر بارگذاری خمشی یا پیچشی را نمایش می‌دهد. ناحیه OA از این منحنی، نشانگر رفتار کاملاً الاستیک مقطع می‌باشد. در نقطه A، ترکخوردگی بتن آغاز می‌شود و نیروی متناظر در این نقطه، معرف ظرفیت ترکخوردگی مقطع می‌باشد. با افزایش بارگذاری، ناحیه AB از منحنی، نشانگر رفتار الاستوپلاستیک مقطع می‌باشد. تسلیمشدگی فولاد نیز در نقطه B رخ داده و نیروی متناظر با آن، ظرفیت مقطع همراه با تسلیمشدگی فولاد را نشان می‌دهد. در ناحیه BC از منحنی، افزایش کرنش در فولاد و خردشدگی بتن رخ می‌دهد. در نهایت، نقطه C معرف شکست مقطع و نیروی متناظر با آن، ظرفیت نهایی مقطع را نشان می‌دهد. همواره انتقال از یک فاز به فاز دیگر، همراه با کاهش سختی در مقطع تحت اثر بارگذاری می‌باشد. کاهش سختی نیز می‌تواند بر روی پاسخ سازه تحت اثر بارگذاری تأثیرگذار باشد. بصورت کلی، منحنیهای ظرفیت-تقاضا برای المانهای بتن مسلح تحت اثر خمش و پیچش به صورت شکل ۲ می‌باشد. با بررسی منحنی ظرفیت-تقاضا و به کمک تبدیل موجک گسسته، می‌توان ظرفیتهای ترکخوردگی، تسلیم و نهایی مقطع را با افزایش بار در رژیم بارگذاری رصد نمود.

بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود، می‌توان بدون داشتن دانش تئوری تعیین ظرفیتهای ترکخوردگی، تسلیم و نهایی مقطع، با تشخیص محل کاهش عمده سختی ناشی از تغییر فاز در منحنی



شکل ۳. آرایش آرماتوربندی و محل قرارگیری کرنش سنج ها در نمونه ها [۱۲]

Fig. 3. Reinforcement bars configuration and location of strain gauges in specimens



شکل ۵. سطوح مرزی معیار دراگر پراگر [۲۱]
Fig. 5. Boundary Levels of the Dragger Prager criterion

جدول ۱. مقادیر K_s [۲۱]

Table 1. Values for K_s

۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	f'_c
۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۱	K_s

جدول ۲. مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی

Table 2. Characteristics of longitudinal and transverse reinforcements

نوع آرماتور	سطح مقطع (mm ²)	مدول الاستیسیته (MPa)*10 ⁴	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)
آرماتور عرضی (Ø 8mm)	۵۰/۲۷	۲۳/۹۸	۴۸۰	۶۹۵
آرماتور طولی (Ø 10mm)	۷۰/۵۴	۱۷/۶	۳۵۲	۵۶۸
آرماتور طولی (Ø 14mm)	۱۵۳/۹۴	۱۹/۸۳	۳۹۷	۶۱۰
آرماتور طولی (Ø 16mm)	۲۰۱/۰۶	۲۰/۲	۴۰۴	۶۲۰

قاب، مخزن، پل و اجزای سازه ای مانند اتصالات فولادی، اعضای فولادی یا بتنی را به روشهای مختلف فراهم می سازد. همچنین مدل های رفتاری مختلفی از مصالح شکل پذیر و ترد مانند مدل های دو و

نشان داده شده است.

۵- مدل سازی عددی

نرم افزار آباکوس امکان تحلیل انواع مختلف سازه ها نظیر تیر،

T³D² استفاده شده است. جهت مدل سازی الیاف کربن از المان S⁴R که اثر برش عرضی در این المان لحاظ شده، استفاده شده است. این المان پوسته‌ای چهار گره‌ای چند منظوره قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرالگیری برای به حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان آنالیز را دارا می‌باشد [۲۰]

۵-۲- سطح تسلیم مدل خسارت پلاستیک بتن

مدل خسارت پلاستیک بتن تعمیم یافته معیار شکست دراگر-پراگر می باشد. این معیار یک سطح شکست مخروطی مطابق شکل ۵ دارد و یکی از تئوری‌های قوی در مدل سازی شکست بتن آرمه می باشد [۲۱]

به منظور معرفی رابطه تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن از رابطه هاگنستاد اصلاح شده مطابق روابط شماره (۹) و (۱۰) استفاده

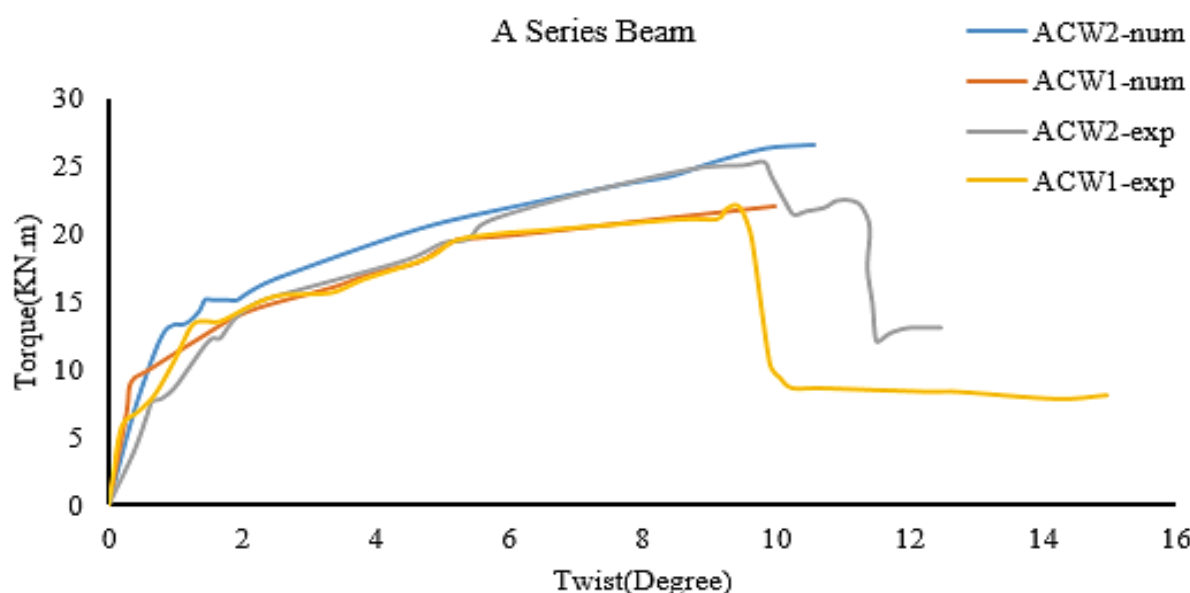
چند خطی فولاد و مدل شکست بتن در آن پیش بینی شده است که در حوزه رفتار غیرخطی بکار می روند.

۵-۱- معرفی المان ها و رفتار مواد استفاده شده

برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح ترد نظیر بتن از یک المان سه بعدی C³D⁸R (از دسته المانهای Solid) در نرم افزار آباکوس استفاده می‌شود. المان خرابایی یکی دیگر از المان های سازهای معمول در آباکوس می باشد. این المان عضوی دو نیروی است که نیروها فقط در گره‌های آن اعمال شده و این گره ها تنها دارای درجه آزادی انتقالی می باشند. از این المان ها برای مدل های اعضای سازه- ای که تحت نیروهای محوری کششی یا فشاری قرار دارند، استفاده می‌شود. جهت مدل سازی آرماتورهای طولی و عرضی از المان خرابایی

جدول ۳. مشخصات CFRP
Table 2. CFRP Specifications

نوع الیاف	ضخامت (mm)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	درصد کرنش نهایی
CF 240	۰/۱۷۶	۲۴۰۰۰۰	۳۸۰۰	۱/۵۵٪



شکل ۶. ممان پیچشی بر حسب زاویه پیچش برای نمونه ACW1 از گروه A

Fig. 6. Torsional moment in terms of torsion angle for specimen ACW1 from Group A

از گزینه Lamina استفاده شده است. کامپوزیتهای FRP دارای مقاومت کششی بسیار بالایی بوده و رفتار تنش-کرنش آنها تا لحظه گسیختگی به صورت خطی می‌باشد. مشخصات CFRP در این تحقیق در جدول ۳ نمایش داده شده است.

نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به ممان پیچشی-زاویه پیچش تیرهای بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با استفاده از CFRP در شکل-های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. از نمودارها می‌توان مشاهده نمود که نتایج عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. ممان پیچشی ترک‌خوردگی، ممان پیچشی تسلیم و ممان پیچشی نهایی تیرهای حاصل از نتایج آزمایشگاهی در جدول ۴ آورده شده است.

توزیع ترک‌خوردگی در وجوه جانبی تیر ۱ CCW در نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی عددی بترتیب در اشکال (۹-الف و ۹-ب) نمایش داده شده است. با مقایسه این دو شکل می‌توان دریافت که زاویه ترک‌خوردگی و توزیع ترک‌ها در هر دو نمونه یکسان می‌باشد.

۶- محاسبه زاویه پیچش متناظر با ترک خوردگی بتن و تسلیم

فولاد تیرهای مقاوم‌سازی شده با استفاده از تئوری موجک

پس از حصول پاسخ زاویه پیچش انتهایی تیرها تحت اثر پیچش خالص در آزمایشگاه (زاویه پیچش بر حسب زمان سیگنال ورودی

$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$f_c'' = K_s * f_c' \quad (11)$$

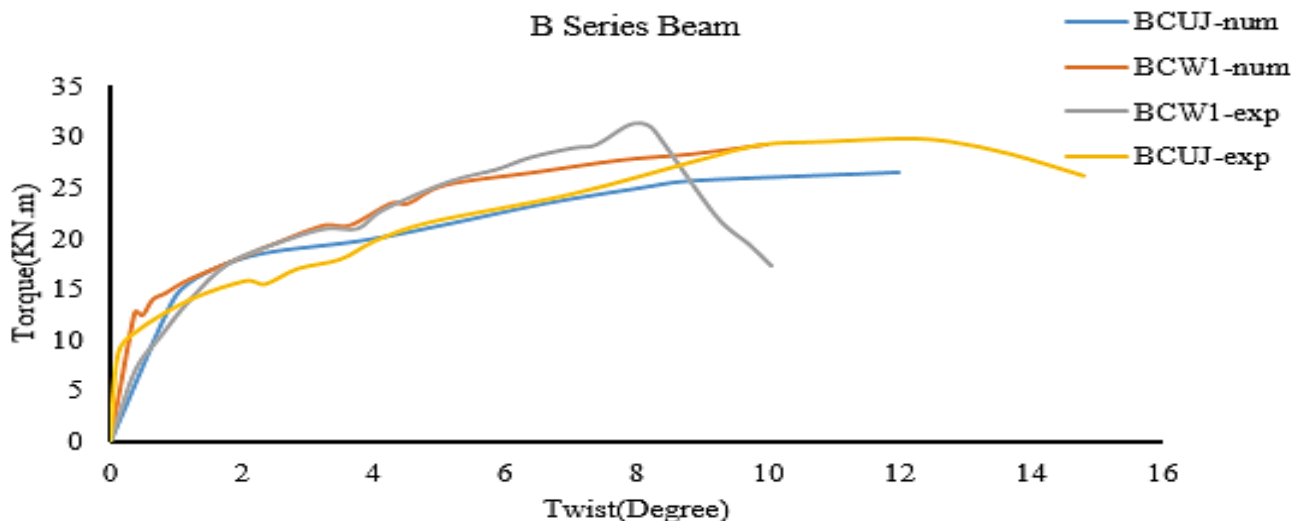
در این رابطه ε_0 کرنش نظیر تنش بیشینه است که معمولاً از آزمایش بدست می‌آید و در غیر این صورت برابر ۰/۰۰۲ برای بتن معمولی می‌باشد و f_c'' تنش بیشینه در عضو بتنی است.

۳-۵ رفتار فولاد

منحنی تنش-کرنش فولاد در کشش و فشار یکسان است. نرم افزار برای در نظر گرفتن بخش غیر خطی فولاد سه نوع مدل ایزوتروپیک، کینماتیک و ترکیب غیرخطی ایزوتروپیک با کینماتیک ارائه میکند. در این تحقیق برای مدل‌سازی میلگردهای فولادی از مدل دوخطی الاستوپلاستیک کامل استفاده شده است. مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی تیرهای مدل‌سازی شده در جدول ۲ آمده است.

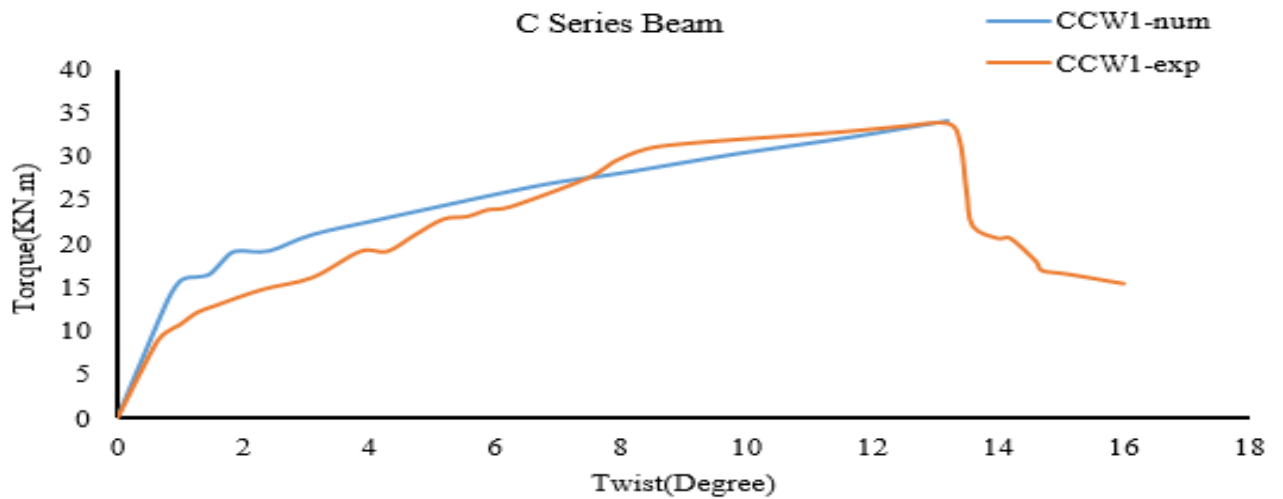
۴-۵ رفتار کامپوزیت FRP

کامپوزیت FRP به صورت یک لایه ارتوتروپیک در نظر گرفته می‌شود و برای معرفی مشخصات مکانیکی FRP در نرم افزار آباکوس

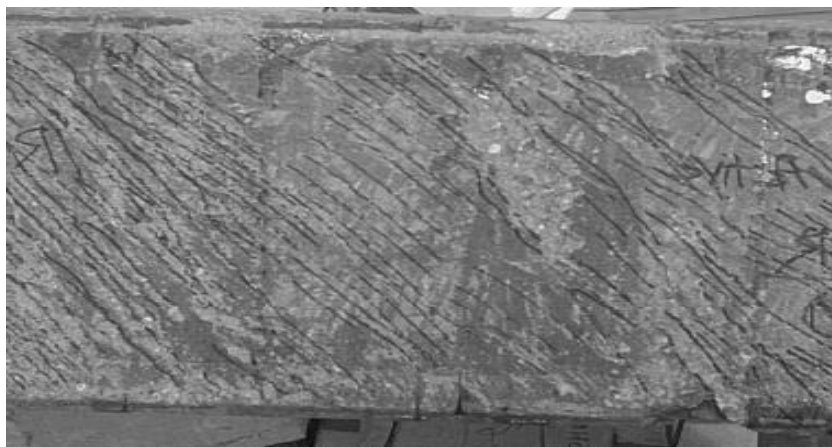
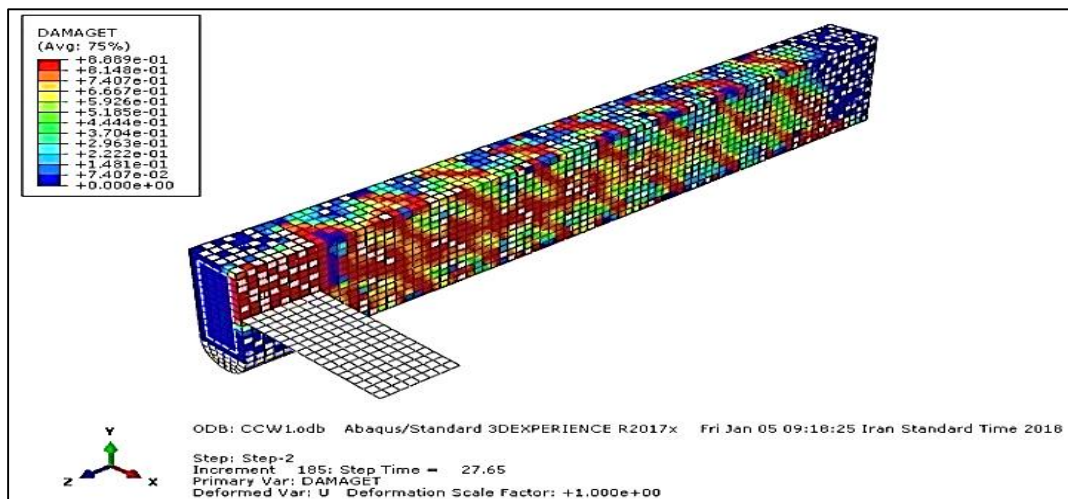


شکل ۷. ممان پیچشی بر حسب زاویه پیچش برای نمونه BCW2 از گروه B

Fig. 7. Torsional moment in terms of torsion angle for specimen BCW2 Group B



شکل ۸. ممان پیچشی بر حسب زاویه پیچش برای نمونه CCW1 از گروه C
 Fig. 8. Torsional moment in terms of torsion angle for specimen CCW1 from group C



شکل ۹. توزیع ترک خوردگی و زاویه ترک در نمونه CCW1؛ الف) حاصل از آزمایش، ب) حاصل از آباکوس
 Fig. 9. Cracking distribution and crack angle in the specimen CCW1 obtained from, a: Experimental work, b: Abaqus

می‌باشد)، آنالیز تبدیل موجک گسسته بر روی آن صورت می‌پذیرد. همانطور که در شکل ۱۰-الف و ۱۰-ت مشاهده می‌شود، زمان وقوع اولین ترک خوردگی در بتن و زمان تسلیم شدگی فولاد در نمودار زاویه پیچش انتهایی تیر بر حسب زمان اندازه‌گیری در نمونه تیرهای آزمایشگاهی و عددی قابل تشخیص نمی‌باشد. برای تشخیص این موضوع، داده‌های زاویه‌های پیچش، تحت تبدیل موجک گسسته قرار گرفته و پاسخ تجزیه می‌شود. سپس به کمک فیلتر بالاگذر^۱ توابع موجک مادر sym^7 و db^4 ، جزئیات سیگنال زاویه پیچش انتهایی تیر استخراج می‌شود و تحلیل بر روی نمودار جزئیات سیگنال انجام می‌گردد. تحلیل و بررسی نمودار جزئیات سیگنال نشان می‌دهد که وقوع اولین آشفستگی در این نمودار، نشان‌دهنده رخداد ترک خوردگی‌های اولیه و معرف ممان پیچشی ترک خوردگی در تیر مربوطه می‌باشد. همچنین در لحظه تسلیم شدگی فولاد نیز، نمودار جزئیات سیگنال زاویه پیچش انتهایی تیر دچار اغتشاش می‌شود. همان‌طور که در اشکال ۱۰-ب و ۱۰-پ مشاهده می‌شود، اولین آشفستگی در نمودار سطح اول جزئیات سیگنال (d_1) حاصل از تجزیه پاسخ تیر ACW_1 ، در اطراف پانزدهمین لحظه ثبت زاویه پیچش انتهایی تیر رخ داده است. پانزدهمین لحظه ثبت، زاویه پیچشی برابر $1/6$ درجه دارد (شکل ۱۰ و شکل ۶). ممان پیچشی مربوط به زاویه $1/6$ درجه برابر $13/13$ kN.m می‌باشد که با توجه به نتایج آزمایشگاهی نزدیک به ظرفیت ترک خوردگی مقطع ($13/13$ کیلونیوتن-متر) است (شکل ۶). بنابراین زاویه پیچش حاصل از آنالیز پاسخ تیر به کمک تبدیل موجک گسسته، معرف رخداد ترک خوردگی‌های اولیه در تیر می‌باشد. نتایج حاصل از آنالیز پاسخ تیر ACW_1 شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد که آشفستگی در 551 امین لحظه ثبت زاویه پیچش ($1/66$ درجه) به وقوع پیوسته که ممان پیچشی متناظر با آن $13/148$ kN.m می‌باشد (شکل ۱۰-ث و ۱۰-ج). بنابراین با استفاده از آنالیز پاسخ تیر به کمک تبدیل موجک گسسته، ممان پیچشی ترک خوردگی‌های اولیه در تیر با دقت بالا پیش‌بینی می‌شود. همچنین در اطراف بیست و هشتمین لحظه ثبت زاویه پیچش انتهایی تیر ($4/1$ درجه)، نمودار جزئیات سطح اول سیگنال دچار اغتشاش شده که متناظر با ممان تسلیم‌شدگی فولاد با مقدار $16/95$ kN.m می‌باشد که با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. نتایج آنالیز موجک

1 High-pass

نمونه شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که در 1563 امین لحظه ثبت زاویه پیچش که برابر با $4/2$ درجه است، نمودار جزئیات سطح اول سیگنال در شکلهای ۱۰-ث و ۱۰-ج دارای آشفستگی است و ممان پیچشی متناظر با آن برابر $17/52$ kN.m می‌باشد. در آنالیز موجک پاسخ نمونه آزمایشگاهی ACW_2 مطابق با شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-پ اغتشاش در اطراف بیست و یکمین لحظه ثبت زاویه پیچش رخ داده است که متناظر با ممان پیچشی $15/15$ kN.m می‌باشد. در آنالیز پاسخ نمونه عددی ACW_2 با توجه با شکل‌های ۱۱-ث و ۱۱-ب، اغتشاش در دویست و هجدهمین لحظه ثبت زاویه پیچش رخ داده است که متناظر با ممان پیچشی $15/176$ kN.m می‌باشد. در جدول ۴، ممان پیچشی ترک خوردگی آزمایشگاهی برابر با $15/15$ kN.m می‌باشد. همچنین بیست و نهمین لحظه ثبت زاویه پیچش در نمونه آزمایشگاهی ACW_2 در شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-پ، همراه با آشفستگی است که متناظر با ممان پیچشی $17/41$ kN.m است که به ممان پیچشی تسلیم‌شدگی آزمایشگاهی برابر با $17/63$ kN.m نزدیک است. در شکل‌های ۱۱-ث و ۱۱-ج، چهارصد و سی و هفتمین لحظه ثبت زاویه پیچش در نمونه عددی همراه با آشفستگی است که متناظر با ممان پیچشی تسلیم‌شدگی $18/01$ kN.m است. در آنالیز موجک پاسخ نمونه آزمایشگاهی BCUI، هفتمین و سیزدهمین لحظه ثبت زاویه پیش‌دارای آشفستگی در نمودار جزئیات سطح اول سیگنال شکل ۱۲-ب و ۱۲-پ می‌باشد که به ترتیب متناظر با ممان پیچشی ترک خوردگی $15/94$ kN.m و ممان پیچشی تسلیم‌شدگی فولاد $23/89$ kN.m می‌باشد. همچنین در آنالیز موجک نمونه عددی BCUI، آشفستگی در پنجاه و سومین و صد و یکمین لحظه ثبت در شکل‌های ۱۲-ث و ۱۲-ج مشهود است که به ترتیب متناظر با ممان پیچشی ترک خوردگی $16/09$ kN.m و ممان پیچشی تسلیم‌شدگی فولاد برابر با $23/63$ kN.m می‌باشد. ممان پیچشی ترک خوردگی و ممان پیچشی تسلیم‌شدگی فولاد حاصل از آزمایش در جدول ۴ به ترتیب برابر با $15/16$ kN.m و 23 kN.m می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه سیگنال زاویه پیچش در شکل ۱۳ برای نمونه CCW_1 آمده است. همان‌طور که در شکل ۱۳-ب و ۱۳-پ مربوط به نمونه آزمایشگاهی مشاهده می‌شود، اغتشاش در شانزدهمین و چهل و یکمین لحظه ثبت زاویه پیچش آشکار است، که به ترتیب متناظر با

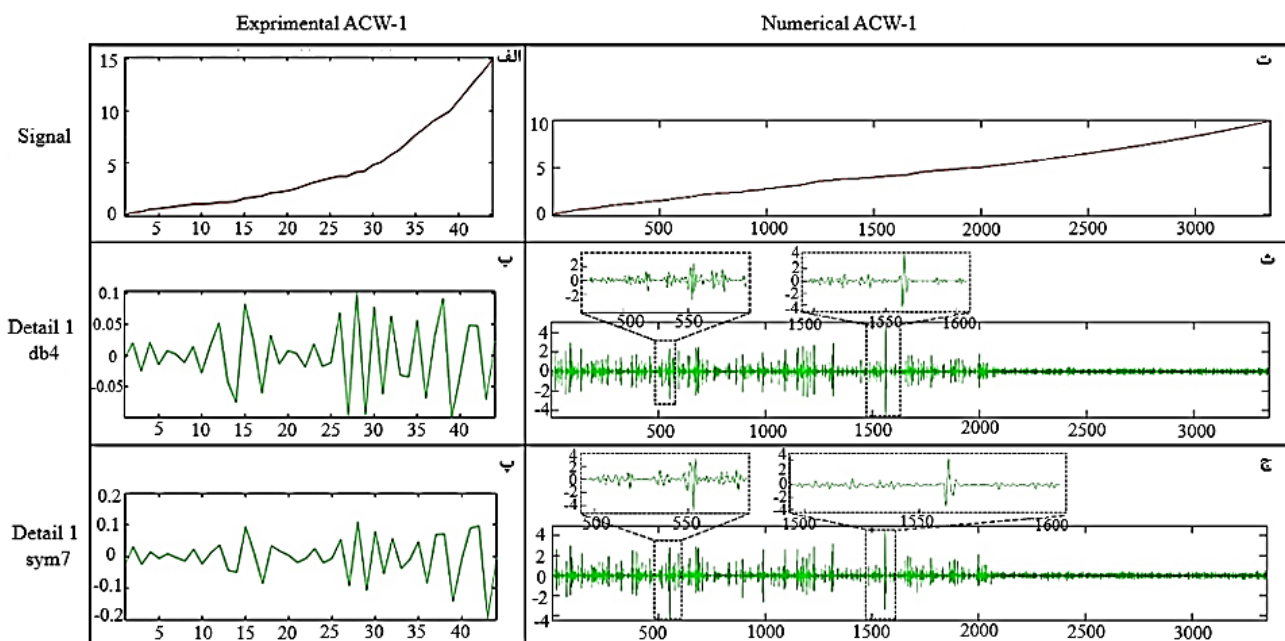
است. برای آنالیز پاسخ نمونه عددی CCW^1 مطابق با شکل‌های ۱۳-ث و ۱۳-ج به ترتیب آشفته‌گی در صد و چهارمین لحظه ثبت زاویه پیچش و نهصد و پنجاه و چهارمین لحظه ثبت رخ داده است که به ترتیب متناظر با ممان پیچشی $۱۶/۴۷ \text{ kN.m}$ و $۲۸/۲۳ \text{ kN.m}$

زاویه پیچش $۳/۱$ درجه و $۷/۵$ درجه می باشد. ممان پیچشی متناظر با این زوایا به ترتیب برابر $۱۶/۱۹ \text{ kN.m}$ و ۲۸ kN.m است. در جدول ۴، ممان ترک خوردگی نمونه CCW^1 از آزمایشگاه برابر $۱۶/۵۶ \text{ kN.m}$ و ممان پیچشی تسلیم‌شدگی فولاد برابر با ۲۸ kN.m آمده

جدول ۴. ممان پیچشی ترک خوردگی، ممان پیچشی تسلیم و ممان پیچشی نهایی تیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی [۱۹] و نتایج تبدیل موجک

Table 4. Torsional cracking moment, torsional yielding moment and ultimate torsional moment from experimental [19] and wavelet results

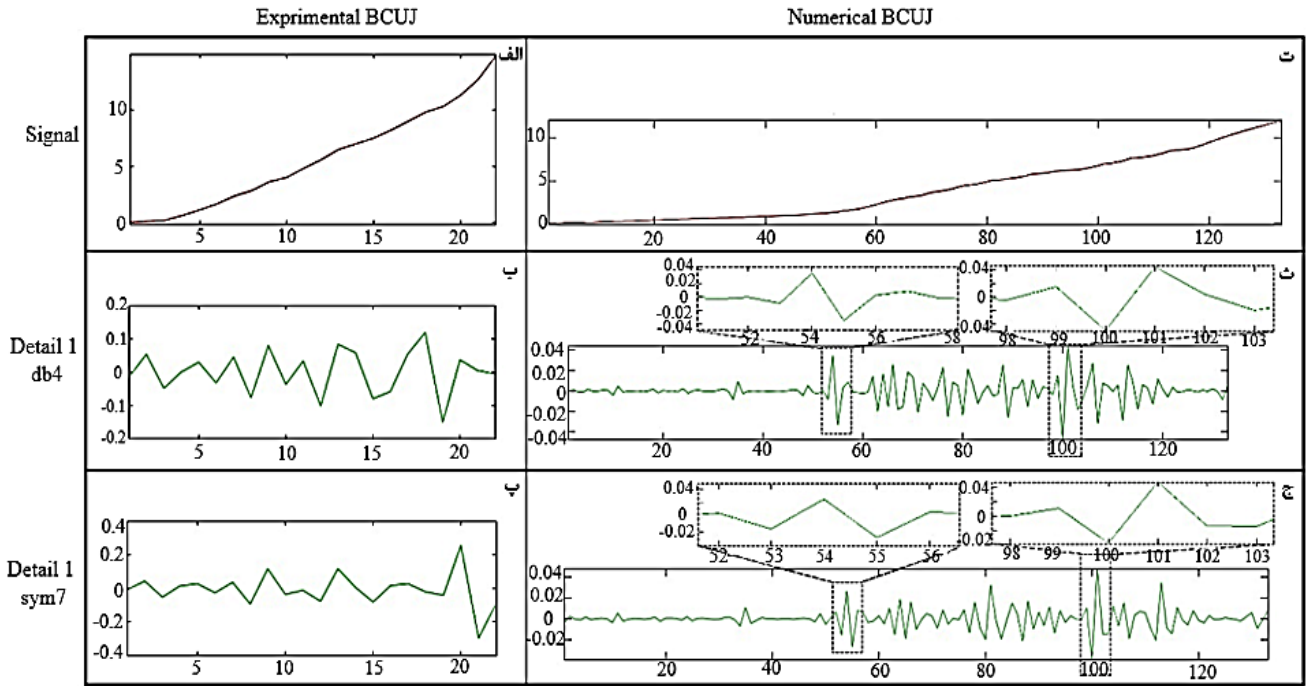
نمونه‌های آزمایشگاهی	ممان پیچشی ترک خوردگی (kN.m)	ممان پیچشی ترک خوردگی از تحلیل موجک (kN.m)	درصد خطا %	ممان پیچشی تسلیم‌شدگی (kN.m)	ممان پیچشی تسلیم‌شدگی از تحلیل موجک (kN.m)	درصد خطا %	ممان پیچشی نهایی (kN.m)
ACW1	۱۳/۳۳	۱۳/۱۴۸	۱/۳۶۵	۱۷/۴۶	۱۶/۹۵	۲/۹۲۱	۲۱/۴۱
ACW2	۱۵/۱۵	۱۵/۱۷۶	۰/۱۷	۱۷/۶۳	۱۸/۰۱	۲/۱۵۵	۲۵/۲۶
BCW1	۱۲/۴۶	-	-	۲۲/۵	-	-	۲۹/۴۸
BCUJ	۱۶/۱۲	۱۶/۰۹	۰/۱۸۶	۲۳	۲۳/۶۳	۲/۷۳۹	۲۹/۸۵
CCW1	۱۶/۵۶	۱۶/۴۷	۰/۵۴۳	۲۸	۲۸/۲۳	۰/۸۲۱	۳۳/۸۷



محورهای عمودی زاویه پیچش بر حسب درجه و محورهای افقی زمان ثبت زاویه پیچش بر حسب ثانیه

شکل ۱۰. تجزیه سیگنال پاسخ زاویه پیچش انتهایی تیر برای نمونه $ACW1$ آزمایشگاهی و شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس به کمک تبدیل موجک

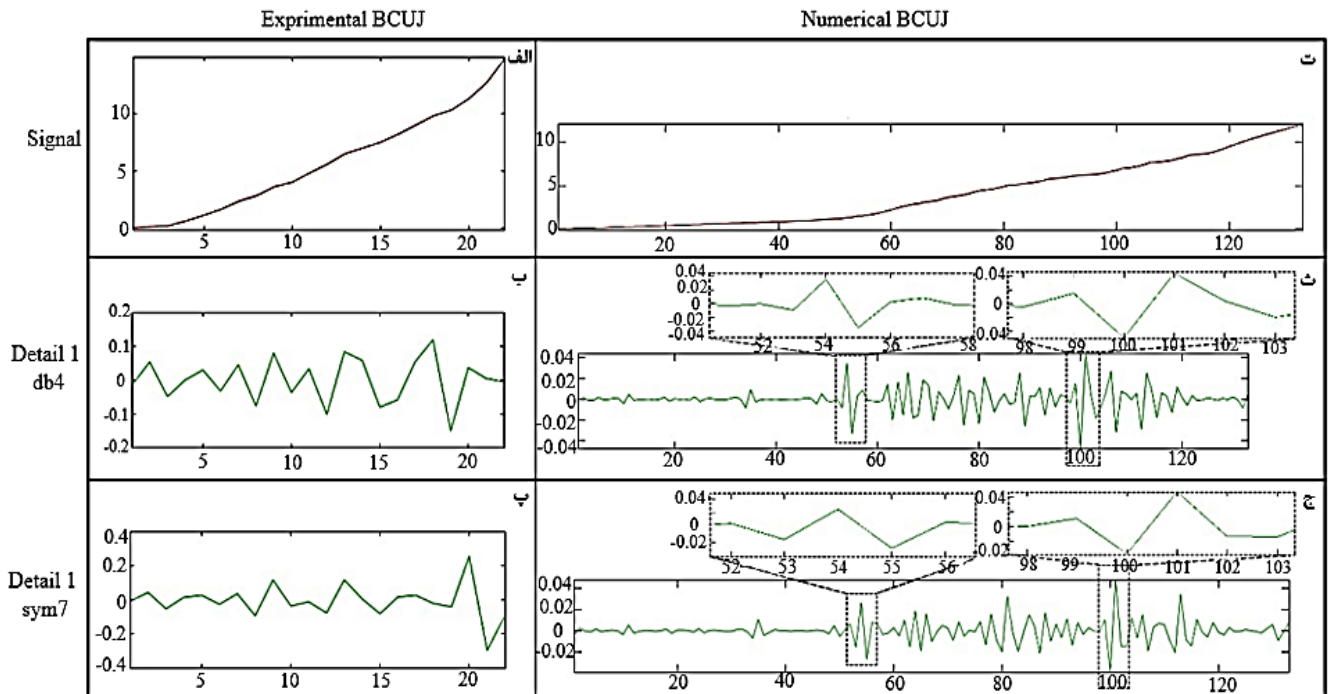
Fig. 10. Signal Analysis for angel of twist at the end of beam for specimen ACW1 constructed in laboratory and simulated in Abaqus using wavelet transform



محورهای عمودی زاویه پیچش بر حسب درجه و محورهای افقی زمان ثبت زاویه پیچش بر حسب ثانیه

شکل ۱۱. تجزیه سیگنال پاسخ زاویه پیچش انتهای تیر برای نمونه ACW2 ساخته شده در آزمایشگاه و شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس به کمک تبدیل موجک

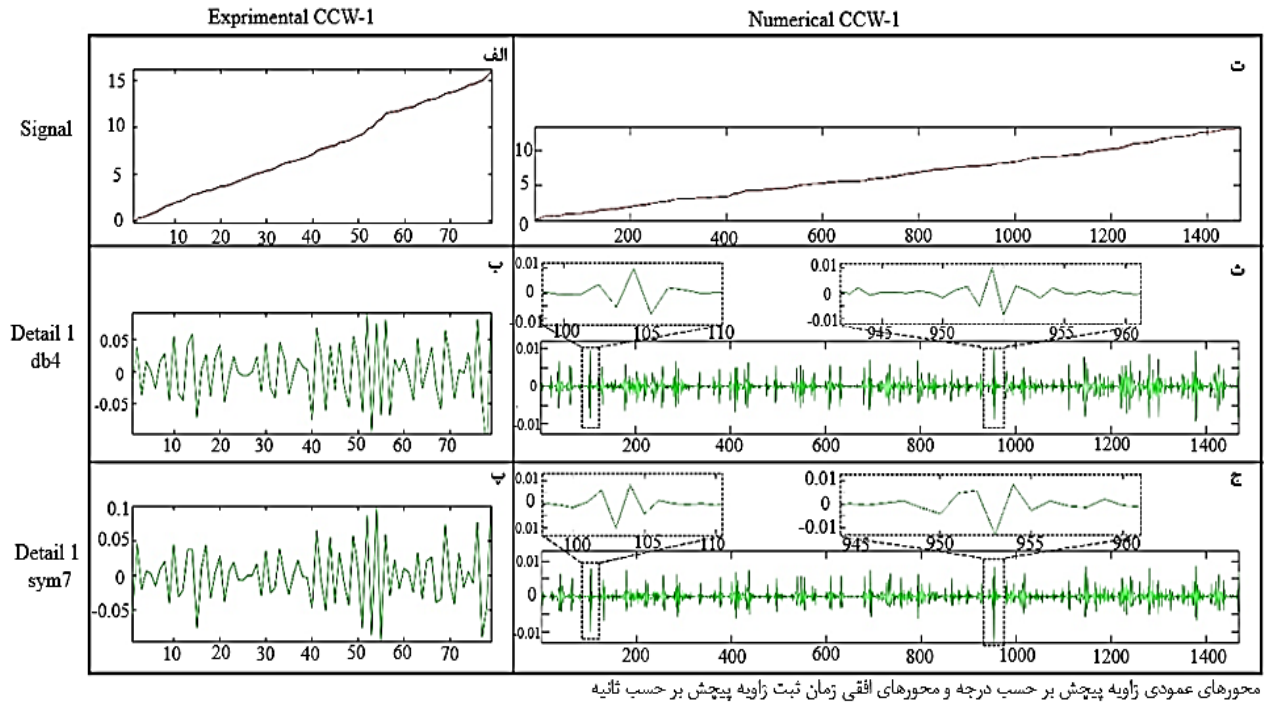
Fig. 11. Signal Analysis for angel of twist at the end of beam for specimen ACW2 constructed in laboratory and simulated in Abaqus using wavelet transform



محورهای عمودی زاویه پیچش بر حسب درجه و محورهای افقی زمان ثبت زاویه پیچش بر حسب ثانیه

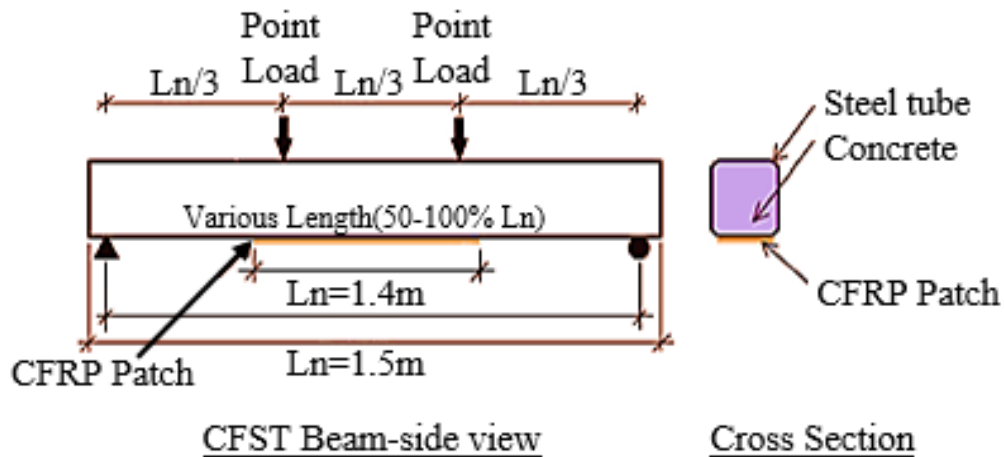
شکل ۱۲. تجزیه سیگنال پاسخ زاویه پیچش انتهای تیر برای نمونه BCUJ ساخته شده در آزمایشگاه و شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس به کمک تبدیل موجک

Fig. 12. Signal Analysis for angel of twist at the end of beam for specimen BCUJ constructed in laboratory and simulated in Abaqus using wavelet transform



شکل ۱۳. تجزیه سیگنال پاسخ زاویه پیچش انتهایی تیر برای نمونه CCW1 ساخته شده در آزمایشگاه و شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس به کمک تبدیل موجک

Fig. 13. Signal Analysis for angel of twist at the end of beam for specimen CCW1 constructed in laboratory and simulated in Abaqus using wavelet transform



شکل ۱۴. شرایط تکیه گاهی و بارگذاری تیرهای فولادی پر شده با بتن و مقاوم سازی شده با CFRP [۱۳]

Fig. 14. Boundary conditions and loading of steel box beams filled with concrete and retrofitted using CFRP

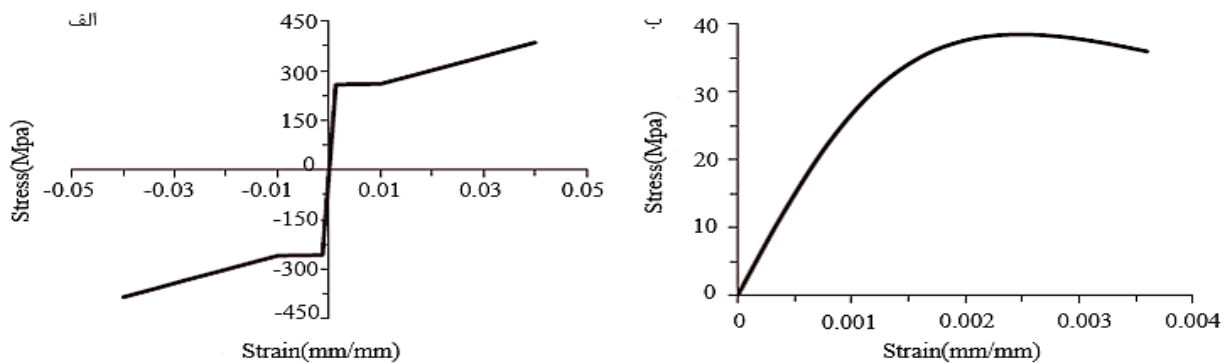
است. ممان تسلیم شدگی فولاد، تسلیم CFRP و ممان نهایی مقطع، نمودار جابه جایی تیرهای فولادی پر شده با بتن که با ورقهای CFRP تقویت شده را به کمک نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS ترسیم می شود.

۷- مشخصات نمونه های عددی تحت اثر خمش چهار نقطه ای به منظور نشان دادن کاربرد روش پیشنهادی برای تشخیص

جدول ۵. مشخصات مصالح بکار رفته در مدل اجزا محدود [۱۳]

Table 5. Specifications of materials used in the finite element model

مصالح	ضریب پواسون	مدول الاستیک (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی نهایی (MPa)
قوطی فولادی	۰/۳	۲۰۳	۲۴۰	-	۳۸۰
بتن	۰/۲	۳۱/۰۲	-	۳۸/۵	-
ورق CFRP	۰/۴	۲۴۰	-	-	۳۸۰۰



شکل ۱۵. رابطه تنش کرنش مصالح به کار رفته در مدل عددی (الف) بتن (ب) فولاد [۱۳]

Fig. 15. Strain- stress relationship of materials used in Numerical Model (a) Concrete (b) Steel

مشخصات مکانیکی داده شده در جدول ۵ می باشد. منحنی تنش-کرنش فولاد و بتن تعریف شده در برنامه به ترتیب در اشکال ۱۵-الف و ۱۵-ب نشان داده شده است.

ورقهای CFRP یک جهت با ضخامت ۰/۲۳۴ میلی متر در مدل مدنظر با عملکرد تقویتی مقطع مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که این ورق ها مصالحی ترد هستند، گزینه معیار آسیب هشین^۱ برای ورقهای تقویتی کامپوزیتی در نرم افزار ABAQUS انتخاب می شود.

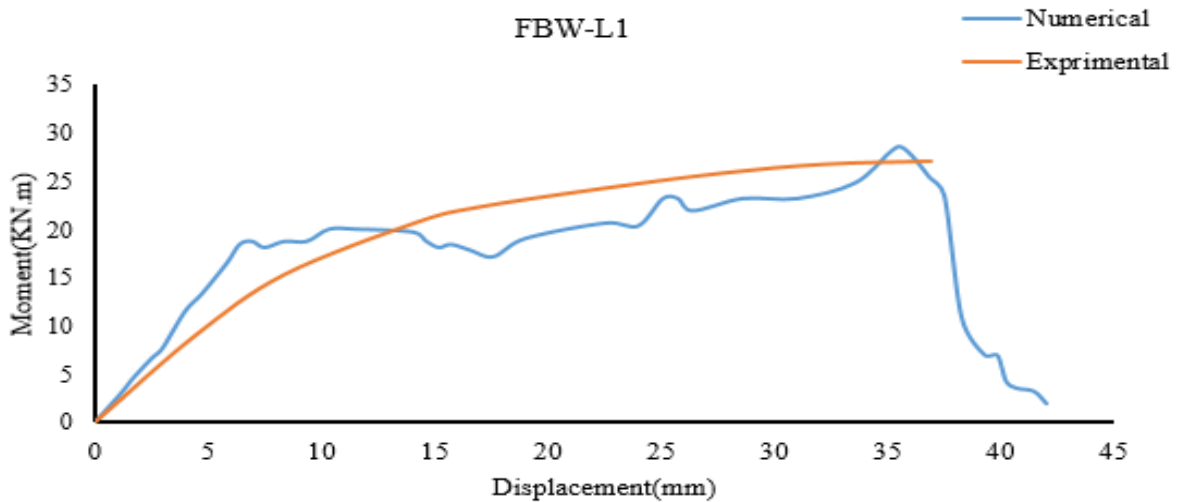
۸- صحت سنجی نتایج عددی

مدل سازی عددی، با استفاده از نمونه آزمایشگاهی (ساندراجا و گانش)^۲ انجام گردید. مقایسه نتایج نشان می دهد که تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. سه نمونه ۱-FWB-L^(۳)،

شکل ۱۴ نمای شماتیک از تمام مدل های مقاوم سازی شده همراه با بارگذاری دو نقطه ای اعمال شده در فاصله مساوی از تکیه گاه های ساده که باعث خمش در تیر می شود را نشان می دهد.

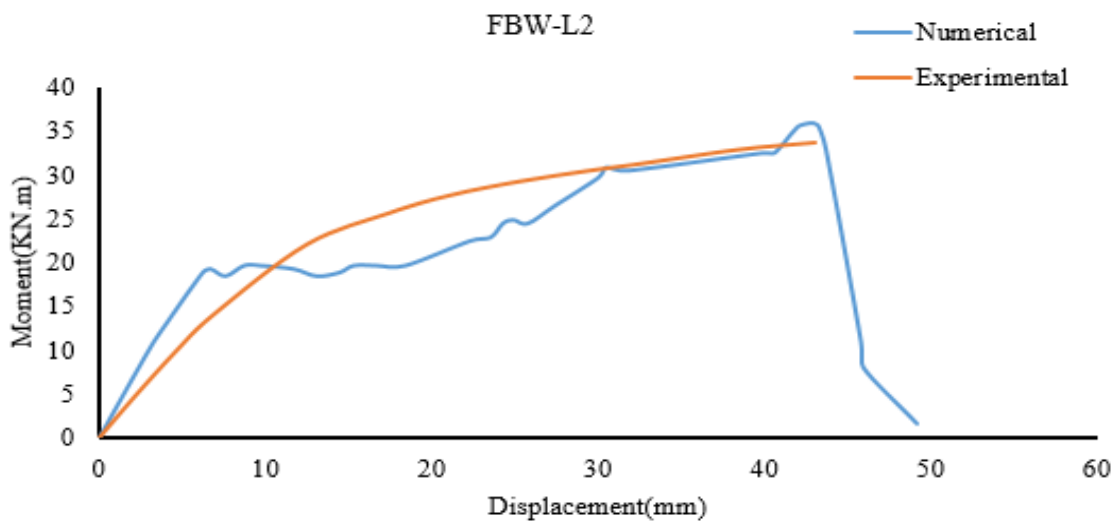
در مدل سازی تیرها با استفاده از اجزاء محدود نمودارهای تنش-کرنش سه ماده تشکیل دهنده نمونه های تیر فولاد، بتن شکل ۱۵ و CFRP معرفی می شود. المان های انتخاب شده برای قوطی فولادی و هسته بتنی از نوع صلب سه بعدی مکعبی هشت گرهی C3D8R و برای ورقهای CFRP از نوع المان پوسته ای با چهار گره S4R تعریف شده است. در مدل سازی عددی اثر متقابل در فصل مشترک سطح داخلی قوطی فولادی و سطح بیرونی هسته بتن از نوع TIE تعریف شده است. مشخصات مصالح استفاده شده در مدل سازی عددی در جدول ۵ نشان داده شده است. مقطع قوطی فولادی استفاده شده در مدل اجزا محدود دارای ابعاد (۹۱/۵ mm*۹۱/۵ mm*۳/۶ mm) با

1 Hashin damage
2 Sundarraja & Ganesh



شکل ۱۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمودار ممان - جا به جایی وسط تیر FWB-L1

Fig. 16. Comparison of experimental and numerical results of moment - middle beam displacement curve of FWB-L1

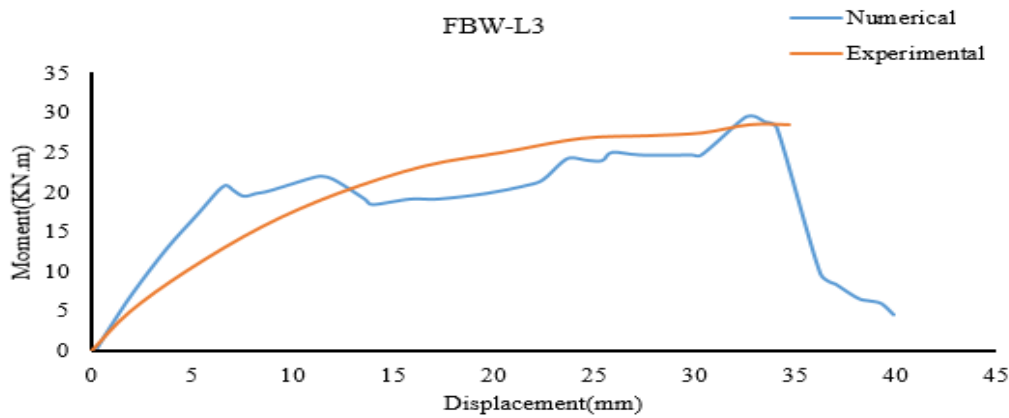


شکل ۱۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمودار ممان - جا به جایی وسط تیر FWB-L2

Fig. 17. Comparison of experimental and numerical results of moment - middle beam displacement curve of FWB-L2

جایی در شکل های (۱۶ تا ۱۸) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، ظرفیت خمشی نهایی در تیر FWB-L^۱ در نمونه آزمایشگاهی برابر با ۲۸ kN.m و در نمونه عددی آن برابر با ۲۸/۴۵ kN.m میباشد که ۱ درصد اختلاف دارند. به همین ترتیب ظرفیت خمشی نهایی در تیر آزمایشگاهی FWB-L^۲ برابر با ۲۸/۷ kN.m و در نمونه عددی آن برابر با ۲۹/۳ kN.m میباشد که دارای اختلاف ۲/۱ درصد می باشد. همچنین ظرفیت خمشی نهایی در نمونه آزمایشگاهی FWB-L^۳ برابر

FWB-L^۲ (۳) و FWB-L^۳ (۲) از مرجع [۲۲] انتخاب گردید و نمودار ممان خمشی-جابه‌جایی قائم وسط تیر از آن استخراج شد. برای مثال برای تشخیص بهتر نام‌گذاری نمونه FWB-L^(۳)، با یک لایه CFRP بصورت کامل در زیر بال تحتانی تیر چسبانده شده است. نتایج مربوط به ممان خمشی گسیختگی CFRP، ممان خمشی نهایی، جابه‌جایی حداکثر وسط دهانه تیر و مود شکست تیر در جدول ۶ آمده است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی نمودار ممان- جابه-



شکل ۱۸. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نمودار ممان - جا به جایی وسط تیر FWB-L3

Fig. 18. Comparison of experimental and numerical results of moment - middle beam displacement curve of FWB-L3

جدول ۶. ممان خمشی گسیختگی CFRP، ممان خمشی نهایی، جابه‌جایی حداکثر وسط دهانه تیر حاصل از آنالیز عددی و ممان خمشی نهایی از تبدیل موجک

Table 6. Flexural failure Moment of CFRP, the ultimate bending moment, maximum displacement of midspan obtained from numerical analysis and the ultimate bending moment obtained from the wavelet transform

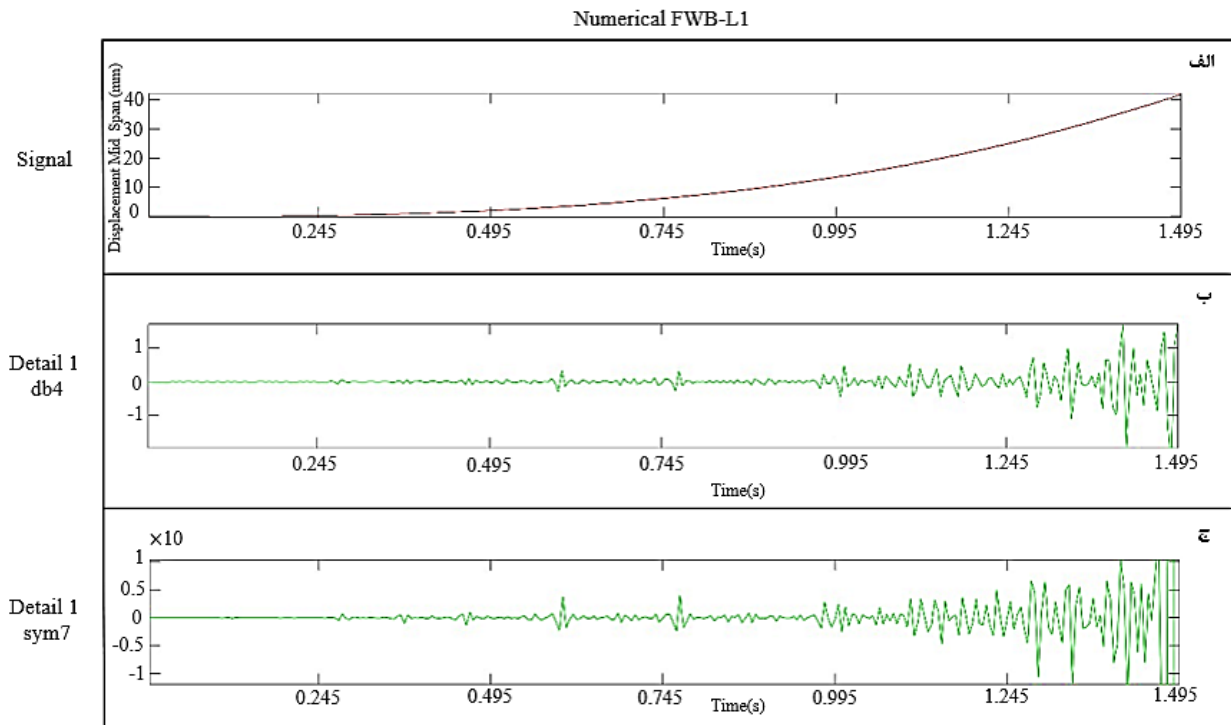
ممان شکست	درصد خطا %	ممان خمشی نهایی از تبدیل موجک (kN.m)	ممان خمشی نهایی (kN.m)	ممان گسیختگی FRP (kN.m)	حداکثر جابه‌جایی وسط دهانه (mm)	نمونه
گسیختگی FRP اطراف نقطه بارگذاری	۱/۶۱۰	۲۸/۴۵	۲۸	۲۶/۸۴	۳۷/۶۲	FWB-L1(3)
گسیختگی FRP بین نقطه بارگذاری و مرکز نمونه	۱/۲۷۳	۳۴/۱۰	۳۴/۵۴	۲۳/۳۳	۳۴/۶۲	FWB-L2(3)
گسیختگی FRP در نقطه بارگذاری و حرکت به سمت تکیه‌گاه	۱/۷۴۲	۲۹/۲۰	۲۸/۷۰	۲۶/۶۱	۴۳/۶۲	FWB-L3(2)

سیگنال ورودی می‌باشد. برای تعیین ممان خمشی متناظر با تسلیم شدن فولاد و ممان خمشی نهایی نمونه‌ها، مشابه قبل باید به آشفستگی-ها در نمودار سطح اول جزئیات سیگنال (d_1) حاصل از تجزیه پاسخ جابه‌جایی قائم وسط نمونه‌ها توجه نمود. برای نمونه FWB-L1 در شکل (۱۹-ب و ۱۹-پ) مشاهده می‌شود، آشفستگیها در زمان ۰/۶ و ۱/۴۱ رخ داده است. با توجه به شکل (۲۰) تسلیم قوطی فولادی (۲۴۰ Mpa) در نرمافزار آباکوس در معیار زمانی، در زمان ۰/۶ صورت

با ۳۴/۵۴ kN.m و در نمونه عددی برابر با ۳۵/۸۷ kN.m میباشد که ۳/۸ درصد اختلاف مشاهده می‌شود.

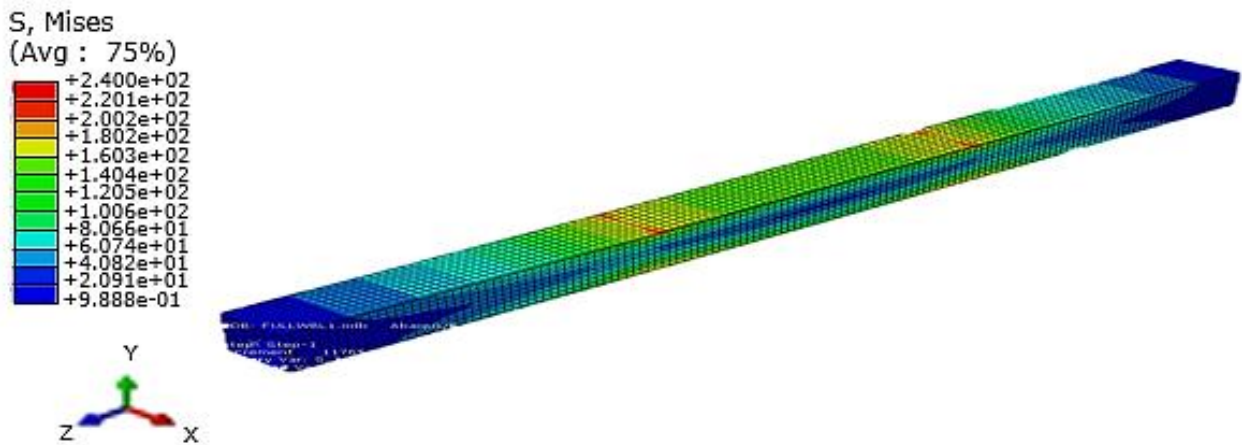
۹- تعیین زمان وقوع تسلیم‌شدگی فولاد و مقاومت نهایی مقطع با استفاده از تئوری موجک

در شکل ۱۹-الف نمودار جابه‌جایی-زمان مربوط به وسط نمونه FWB-L1 از نتایج مدل‌سازی عددی نمایش داده شده است که



شکل ۱۹. الف) نمودار جابه‌جایی-زمان قائم وسط نمونه FWB-L1 حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی، نمودار تجزیه شده پاسخ عددی تیر FWB-L1 توسط توابع مادر، ب) موجک db4، ج) موجک sym7

Fig. 19. a: Time-displacement curve of middle span of specimen FWB-L1 obtained from numerical analysis, decomposed numerical response of FWB-L1 specimen using mother wavelet functions, b: wavelet db4, c: wavelet sym7

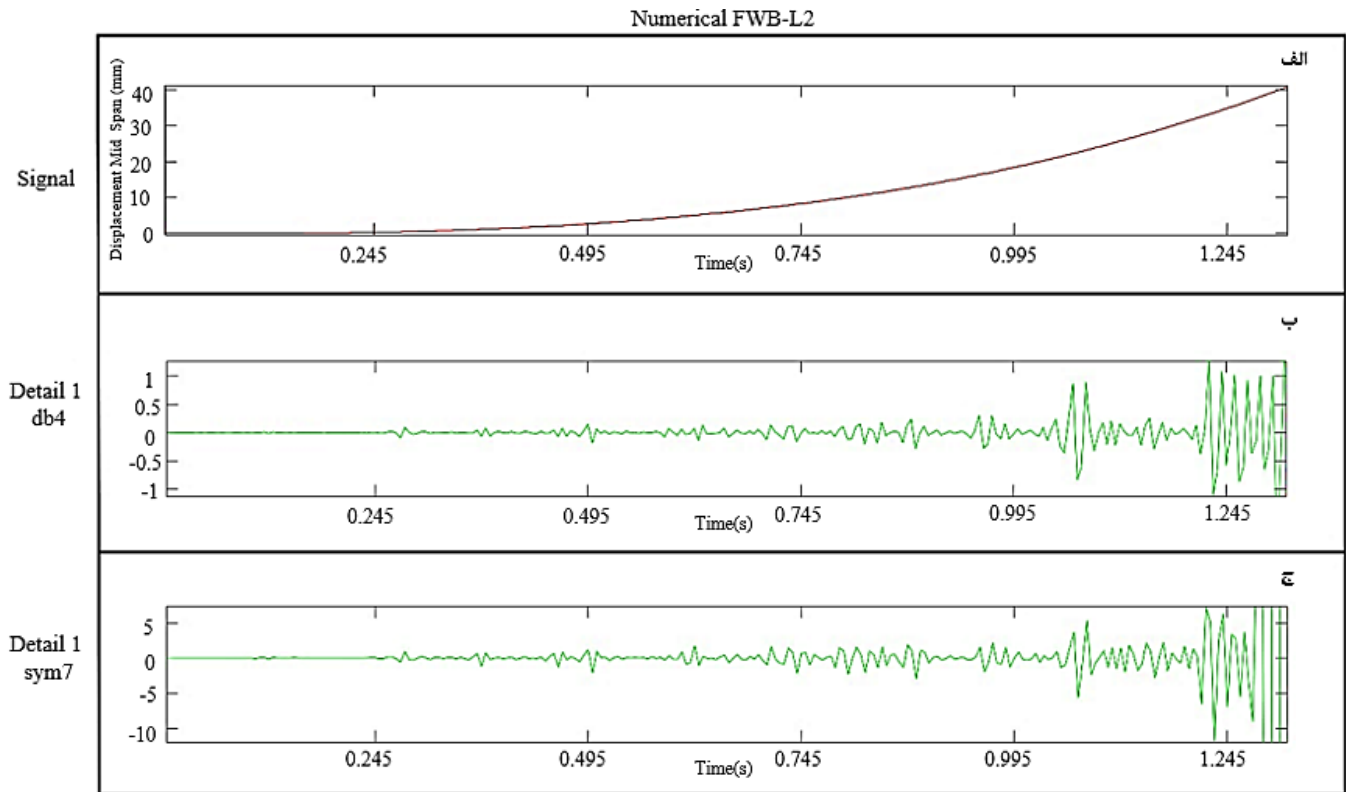


شکل ۲۰. لحظه وقوع تسلیم قوطی فولادی حاصل از مدل‌سازی عددی در نمونه FWB-L1

Fig. 20. Yielding moment of steel box in numerical analysis for specimen FWB-L1

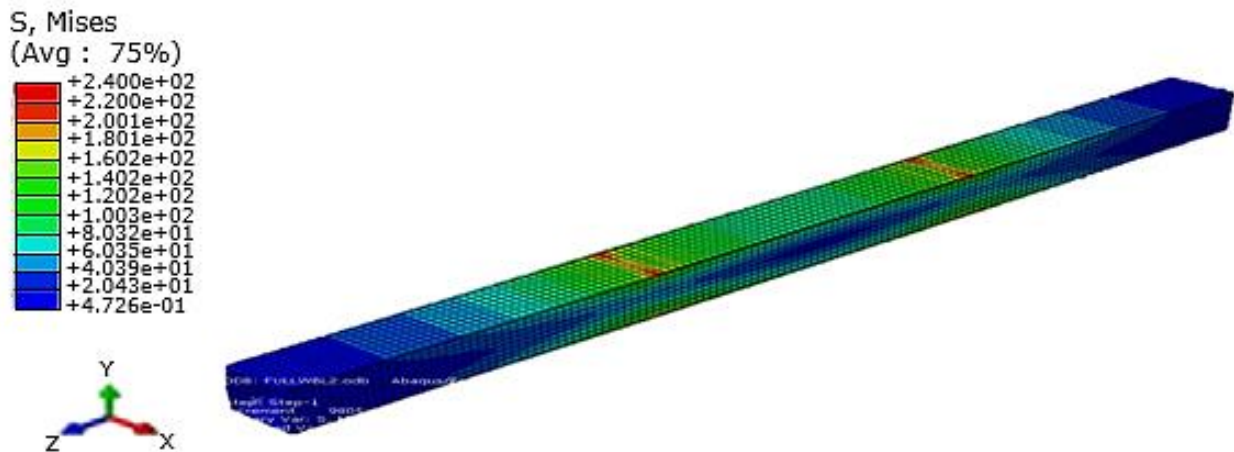
مقطع با دقت بالا پیش بینی می‌شود. نمودار جزئیات سطح اول حاصل از آنالیز تبدیل موجک برای نمونه عددی FWB-L2 در شکل‌های ۲۱-ب و ۲۱-پ نشان می‌دهد آشفتگی در معیار زمانی ۰/۵ و ۱/۲۲ صورت پذیرفته است. با توجه

پذیرفته است. همچنین با توجه به نمودار شکل‌های (۱۹-الف و ۱۶)، مقاومت نهایی مقطع ۲۸/۴۵ kN.m در زمان ۱/۴۱ اتفاق افتاده است. بنابراین با استفاده از آنالیز پاسخ جابه‌جایی قائم تیر به کمک تبدیل موجک گسسته، ممان متناظر با تسلیم‌شدگی فولاد و مقاومت نهایی



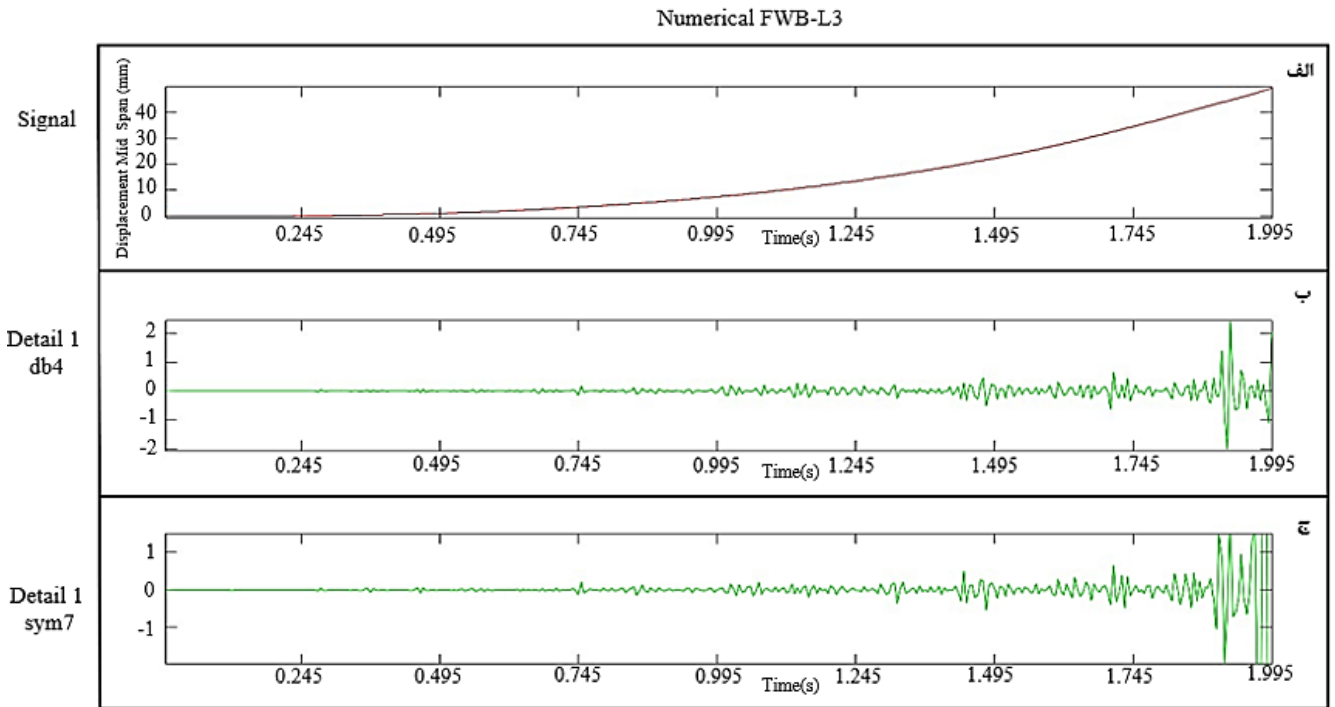
شکل ۲۱. الف) نمودار جابه‌جایی-زمان قائم وسط نمونه FWB-L2 حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی، نمودار تجزیه شده پاسخ عددی نمونه FWBL2 توسط توابع مادر ب) موجک db4، ج) موجک sym7

Fig. 21. a: Time-displacement curve of middle span of specimen FWB-L2 obtained from numerical analysis, decomposed numerical response of FWBL2 specimen using mother wavelet functions, b: wavelet db4, c: wavelet sym7



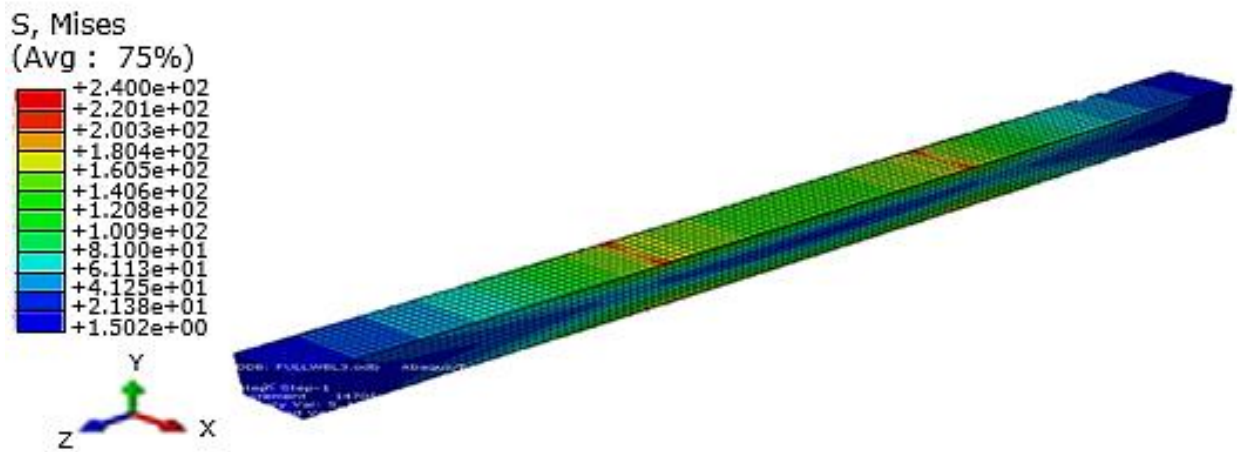
شکل ۲۲. لحظه وقوع تسلیم قوطی فولادی حاصل از مدل‌سازی عددی در نمونه FWBL2

Fig. 22. Yielding moment of steel box in numerical analysis for specimen FWBL2



شکل ۲۳. الف) نمودار جابه‌جایی-زمان قائم وسط نمونه FWB-L3 حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی، نمودار تجزیه شده پاسخ عددی نمونه FWB-L3 توسط توابع مادر، ب) موجک db4، ج) موجک sym7

Fig. 23. a: Time-displacement curve of middle span of specimen FWB-L3 obtained from numerical analysis, decomposed numerical response of FWB-L3 specimen using mother wavelet functions, b: wavelet db4, c: wavelet sym7



شکل ۲۴. لحظه وقوع تسلیم قوطی فولادی حاصل از مدل‌سازی عددی در نمونه FWB-L3
Fig. 24. Yielding moment of steel box in numerical analysis for specimen FWB-L3

و با مشاهده نمودار جزئیات سطح اول سیگنال جابه‌جایی وسط تیر در شکل‌های ۲۳-ب و ۲۳-پ، می‌توان دریافت که اغتشاشات در زمانهای ۰/۷۵ و ۱/۸۹ رخ داده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در شکل‌های ۱۸ و ۲۴ می‌توان مشاهده نمود که زمان وقوع تسلیم-

به نمودار شکل ۱۷ و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (شکل ۲۲)، تسلیم شدگی قوطی فولادی و مقاومت نهایی مقطع نیز در همان زمان از معیار زمانی رخ داده است. با بررسی پاسخ نمونه FWB-L3 نشان داده شده در شکل ۲۳-الف

مراجع

- [1] S. Sumitro, Y. Matsui, M. Kono, T. Okamoto, K. Fujii, Long span bridge health monitoring system in Japan, Health Monitoring and Management Systems, Proceedings of SPIE 4337, (2001), 517–524.
- [2] P. Cawley, R.D. Adams, The location of defects in structures from measurements natural frequencies, The Journal of Strain Analysis, 14(2), (1979), 49–57.
- [3] D.J. joo, Damage Detection and System Identification using a Wavelet Energy Based Approach, (Doctoral dissertation, Columbia University), (2012).
- [4] Wei.C. Su, T.Q. Le, C.S. Huang, P.Y. Lin, Locating damaged storeys in a structure based on its identified modal parameters in Cauchy wavelet domain, Applied Mathematical Modelling, 53, (2017), 1–19.
- [5] S. Zhong, S.O. Oyadiji, Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data, Computers and Structures, 89(1-2), (2011), 127–148.
- [6] W. Fan, P. Qiao, A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures, International Journal of Solids and Structures, 46(25-26), (2009), 4379–4395.
- [7] C. Yang, S.O. Oyadiji, Damage detection using modal frequency curve and squared residual wavelet coefficients-based damage indicator, Mechanical Systems and Signal Processing, 83, (2017), 385-405.
- [8] S.S. Patel, A. P. Chourasia, S.K. Panigrahi, J. Parashar, N. Parvez, M. Kumar, Damage Identification of RC Structures using Wavelet Transformation, Procedia Engineering, 144, (2016), 336-342
- [9] N. Wu, Q. Wang, Experimental studies on damage detection of beam structures with wavelet transform, International Journal of Engineering Science, 49, (2011), 253-261.
- [10] A. Spagnoli, L. Montanari, B. Basu, B. Broderick, Nonlinear Damage Identification in Fiber-Reinforced Cracked Composite Beams through Time-Space Wavelet Analysis, Procedia Materials Science, 3, 2014, 1579-

شدگی قوطی فولادی و مقاومت نهایی مقطع با زمان وقوع آشفستگی در نمودار جزئیات سطح اول سیگنال جابه‌جایی وسط نمونه، تطابق بسیار خوبی دارد.

۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا مطالعه بر روی پاسخ حاصل از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی مقاوم سازی شده با CFRP تحت اثر پیچش خالص انجام گردید تا زاویه پیچش متناظر با وقوع اولین ترک خوردگی و تسلیم شدگی فولاد تعیین گردد. نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی به کمک تبدیل موجک گسسته، تجزیه و تحلیل گردید و محل آسیب به صورت اغتشاشاتی در نمودار ضرایب موجک نمایان شد. مشاهده شد که به کمک این روش می‌توان با در اختیار داشتن نمودار زاویه پیچش انتهای تیر، زمان رخداد خرابی و زاویه پیچش متناظر با وقوع اولین ترک خوردگی و تسلیم شدن فولاد را شناسایی نمود. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌توان مشاهده نمود که ممان پیچشی متناظر با زاویه ترک خوردگی حاصل از آنالیز موجک، منطبق بر ممان پیچشی ترک خوردگی مقطع حاصل از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که به صورت غیرمستقیم حاصل می‌شود. همچنین با مدل‌سازی عددی تیر فولادی پر شده با بتن مقاوم سازی شده با CFRP در نرم افزار آباکوس، پاسخ جابه‌جایی قائم وسط تیر تحت اثر خمش استخراج شده و با نمونه آزمایش شده در آزمایشگاه صحت سنجی گردید. سپس پاسخ جابه‌جایی قائم وسط تیر به کمک تبدیل موجک گسسته آنالیز شده و محل اغتشاشات نمودار جزئیات سطح اول سیگنال متناظر با ممان تسلیم شدن فولاد و ممان نهایی مقطع با مقادیر متناظر از نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. بنابراین به کمک این روش می‌توان با در اختیار داشتن نمودار پاسخ جابه‌جایی قائم وسط تیر، جابه‌جایی قائم متناظر با تسلیم شدن فولاد و مقاومت نهایی مقطع را شناسایی نمود. با بررسی‌های صورت گرفته، مشاهده می‌شود که توابع مادر موجک sym^7 و db^4 دارای کارایی بسیار مناسبی در تشخیص وقوع ترک خوردگی، تسلیم فولاد و حالت نهایی در تیرهای مقاوم سازی شده با CFRP و ممان‌های متناظر با آنها هستند. بنابراین تبدیل موجک گسسته، توانایی بالایی در تحلیل پاسخ داده‌های آزمایشگاهی و عددی دارد و ناپوستگی‌های سیگنال را به صورت اغتشاش بر روی نمودار ضرایب موجک نمایان می‌نماید.

- edu/~polikar/WAVELETS.
- [17] S.J. Mallat, A theory of multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 7, (1989).
- [18] S.J. Mallat. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$, Transactions of the American mathematical society, 315(1), (1989).
- [19] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, Wavelet Toolbox User's Guide, The Math Works Ins, First version, (1996), 2-36.
- [20] Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.10, (2010).
- [21] O. Omid, V. Lotfi, Numerical Analysis of Cyclically Loaded Concrete under Large Tensile Strain by the Plastic-Damage Model, Sharif University of Technology, Scientia Iranica, 17(3), (2010), 194-208.
- [22] M.C. Sundarraja, G. Ganesh Prabhu, Finite element modelling of CFRP jacketed CFST members under flexural loading, Thin-Walled Struct, 49, (2011), 1483-1491.
- [11] Bagheri, S. Kourehli, Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis, Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), 14, 2013, 289-304.
- [12] M.R. Mohammadzadeh, M.J. Fadaee, M. R. Ronagh, Improving Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite, Iranian Polymer Journal, 18, (2009), 315-327.
- [13] A.W. AlZand, W.H.W. Badaruzzaman, A.A. Mutalib, A.H. Qahtan, Finite element analysis of square CFST beam strengthened by CFRP composite material, Thin-Walled Structures, 96, (2015), 348-358.
- [14] M. Rucka, K. Wilde, Application of wavelet analysis in damage detection and localization. Wydaw, PG, (2007).
- [15] P. Kumar, E. Fofoula-Georgiou, Wavelet analysis for geophysical applications, Reviews of geophysics, 35, (1997), 385-412.
- [16] R. Polikar, The wavelet tutorial, <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.R. Mohammadzadeh, S. Salami, H. Ghohani Arab., (2021). Estimation of Cracking, Yield, and Ultimate Capacity of FRP-Strengthened Reinforced Concrete and Steel Sections using Wavelet Transform. Amirkabir J. Civil Eng., 53(5): 1937-1958.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17236.6499](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17236.6499)



