نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۴۰

نشریه مهندسی عمران فردوسی
سال ۳۵، شماره ٤، ۱٤۰۱
شماره پیاپی ٤۰

ISSN 2783-2805

توسعه مدل پیش بینی عمق شیارشدگی مخلوط های آسفالتی گرم با استفاده از شبکه عصبی ۱
مهسا روحی فریمان - سید علی حسینی - منصور فخری

بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک بر روی سایش ابزار برشی ماشین‌های EPB ۱۷
محمد داربر- حمید چاکری- طاها انصاری

حل معکوس (در زمان) معادله انتقال آلودگی در رودخانه با استفاده از طرح حافظ گروه ۳۵
امیر محمد سعادت - مهدی مظاهری - جمال محمدولی سامانی

بررسی تأثیر جرم و موقعیت ارتفاعی میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات ناشی از باد ساختمان‌های بلند ۵۳
نهمت خدایی - حامد تیموری

شناسایی عیوب ظاهری جوش با استفاده از بینایی ماشین بر اساس یادگیری عمیق ۷۳
موسی محمودی صاحبی - سروش قادری - فائزه محمودی صاحبی

ارزیابی خواص مکانیکی بتن با جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی ۸۷
عارف سرهنگی - فریدون امیدی نسب - احمد دالوند

سال ۳۵، شماره ٤
زمستان، ۱٤۰۱

نشریه مهندسی عمران فردوسی

ISSN : 2008-7454

سردبیر : محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز : دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه :

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون ایرانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید محمود حسینی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر ناصر حافظی مقدس	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر شهناز دانش	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر غلامرضا رخشنده رو	استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده راه و ساختمان
دکتر محمدحسین سبط	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر فرزاد شهابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکترحسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون مقدس نژاد	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

ویراستار ادبی : دکتر یوسف بینا　　**مسئول دفتر نشریه** : تکتم هوشمند

ویرایش و صفحه آرایی : سیده عاطفه نوعی باغبان-تکتم هوشمند

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود. http://www.srlst.com

نشانی: مشهد- دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی : ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵

تلفاکس : ۳۸۸۰۶۰۲۴-۰۵۱ پست الکترونیکی : **ejour@um.ac.ir** وب سایت : **http://civil-ferdowsi.um.ac.ir**

چاپ : چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

توسعه مدل پیش‌بینی عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از شبکه عصبی	مهسا روحی فریمان - سید علی حسینی منصور فخری	۱
بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک بر روی سایش ابزار برشی ماشین‌های EPB	محمد داربر- حمید چاکری - طاها انصاری	۱۷
حل معکوس (در زمان) معادله انتقال آلودگی در رودخانه با استفاده از طرح حافظ گروه	امیر محمد سعادت – مهدی مظاهری جمال محمدولی سامانی	۳۵
بررسی تأثیر جرم و موقعیت ارتفاعی میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات ناشی از باد ساختمان‌های بلند	نهمت خدایی – حامد تیموری	۵۳
شناسایی عیوب ظاهری جوش با استفاده از بینایی ماشین بر اساس یادگیری عمیق	موسی محمودی صاحبی – سروش قادری فائزه محمودی صاحبی	۷۳
ارزیابی خواص مکانیکی بتن با جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی	عارف سرهنگی – فریدون امیدی نسب احمد دالوند	۸۷

Journal Ferdowsi Civil Engineering, 35, 34, 2022. (1-16)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Developing a Prediction Model for Rutting Depth of Warm Mix Asphalt Mixture using Neural Network

Research Article

Mahsa Rouhi Fariman[1], Sayyed Ali Hosseini[2], Mansour Fakhri[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.74238.1104

1. Introduction

Pavements are the national capital of every country. A good pavement should have a smooth driving surface, withstand high traffic volumes, and sufficient resistance to fatigue, cracking, and rutting. In order to increase the resistance of pavements against destructive factors such as fatigue, cracks caused by severe temperature changes, and permanent deformation, additives are used to improve the mechanical properties of asphalt pavement. Less tensile strength of asphalt mixtures compared with their compressive strength has given rise to the use fiber with high tensile resistance as a solution to transfer the existing tensile stresses in the mixture through fiber and also the increase of absorbed strain energy during fatigue and fracture process. The benefits of using fibers in asphalt mixtures are increased tensile strength, fatigue resistance, resistance against rutting, and improved moisture susceptibility. Moreover, the addition of reclaimed asphalt pavement (RAP) can significantly improve the resistance to permanent deformation of asphalt mixtures. The benefits of using RAP are reducing energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions, reducing the required new asphalt content (virgin binder), and preserving nonrenewable natural resources such as virgin aggregate and asphalt, reduction of waste production, and reduction of landfill use.

This study uses the data obtained from the laboratory results of the previous study that warm mix asphalt modified with glass fibers and 0, 20, 40, and 50% recycled asphalt pavement (RAP).

The rutting depth of the mixtures was determined by multilayer perceptron neural network (MLP) and radial basis function neural network (RBF), and the results were compared. The post-compaction and rutting depth prediction model agreed well with the experimental results.

Post-compaction (PC) consolidation is defined as deformation (mm) at 500 cycles. Rutting is also a widespread failure mechanism observed in flexible asphalt pavements. Usually, rutting is observed with longitudinal depressions in the wheel path.

In a previous study, the measurement of rutting and moisture sensitivity of warm asphalt mixtures and their short-term aging characteristics in dry and wet test conditions was carried out using the KNTU Wheel Track test. The KNTU Wheel Track was developed in 2015 at KN Toosi University of technology, which could build asphalt concrete slabs in 260 mm width, 400 mm length, and 50–100 mm thickness through rolling compaction, which is the closest method to field compaction. Another capability of this device is performing rutting test in dry and wet conditions.

2. Method

2.1. Artificial neural networks

Artificial Neural Network (ANN) is a mathematical model that tries to simulate the structure and functionalities of biological neural networks. The neural network consists of a large number of processing elements called neurons that work together to solve a problem and transfer information through synapses. The neuron is a basic unit of the nervous system and a simple processing unit that receives and processes the signal from other neurons. A network is created between the neurons, and the network is trained by the training algorithm (Figure 1). This study's post-compaction and rutting depth prediction was made with a multilayer perceptron and radial basis function neural network.

*Manuscript received: December 18, 2021, Revised, June 1, 2022, Accepted, September 18, 2022.

[1]. Postgraduate Student in Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Assistant Professor in Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
Email: ahosseini@shahroodut.ac.ir
[3]. Professor in Civil Engineering Faculty of K.N. Toosi University of Technology.

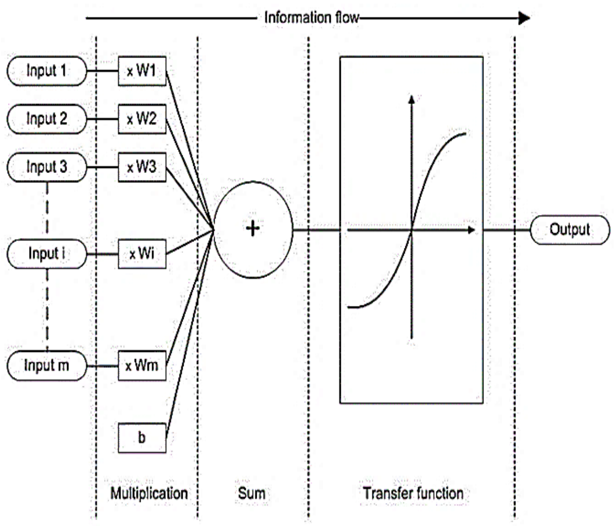


Figure 1. Artificial neural network model

2.1.1. Multilayer Perceptron neural networks

Multilayer Perceptron has at least three layers: input layer, hidden layer, and output layer. Multilayer perceptron has a set of weights and biases that are adjusted to train the neural network. The number of elements in the input layer is actually the same number of input variables introduced to the network. The hidden layer contains several neurons that influence the behavior of the network. Determining the number of hidden layers and neurons is the responsibility of the user. He determines the optimal number of layers and neurons by trial and error. The output layer of the neural network also represents the output of the problem that the network must predict**.**

2.1.2. Radial Basis Function neural networks

Radial Basis Function (RBF) neural network is another type of feed-forward neural network that uses radial basis functions as activation functions. RBF network consists of three layers: input layer, hidden layer with radial basis function as activation function, and output layer. The output of an RBF network is a linear combination of weighted radial basis functions. RBF networks are trained faster than MLP networks and create better decision boundaries. Although these networks require more neurons than MLP networks, they can be trained in a shorter time than the time required for MLP networks.

3. Conclusion

In this study, the data obtained from the laboratory results in a previous study were analyzed by Multilayer Perceptron Neural network (MLP) and Radial Basis Neural network (RBF), and the results of these methods were compared with each other. The results of this research are as follows:

1. Prediction of post-compaction by MLP neural network has a correlation coefficient of 0.999. The correlation coefficient for RBF neural network is 0.995, and the prediction of rutting depth by MLP neural network has a correlation coefficient of 0.997. The RBF neural network has a correlation coefficient of 0.945. MLP neural network was more accurate in prediction.
2. In order to further validate the model, additional data that were never used during modeling were used. The MLP neural network performed better for simulating these data compared to the RBF neural network and presented a lower error percentage.

مهندسی عمران فردوسی،۳۵، ٤، ١٤٠١. (١٦-١)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

توسعه مدل پیش‌بینی عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از شبکه عصبی *

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/JFCEI.2022.74238.1104

مهسا روحی فریمان(۱) سید علی حسینی(۲) منصور فخری(۳)

چکیده *محققان و مهندسان دائماً در تلاش هستند تا عملکرد روسازی‌های آسفالتی را بهبود بخشند. روسازی‌ها، به عنوان سطوحی که اغلب توسط محورهای سنگین بارگیری می‌شوند، باید مقاومت کافی در برابر خستگی، ترک‌خوردگی و شیارشدگی داشته باشند. در این مقاله با استفاده از داده‌های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی مطالعه قبلی که مخلوط‌های آسفالتی گرم(WMA) اصلاح شده با الیاف شیشه و ۰، ۲۰، ٤۰ و ۵۰ درصد آسفالت تراشیده شده بازیافتی (RAP) برای بررسی مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی ساخته شدند، پیش‌بینی عمق شیارشدگی مخلوط‌ها توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه (MLP) و شعاعی پایه (RBF) انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. مدل پیش‌بینی عمق شیارشدگی و پیش‌تراکم با نتایج تجربی مطابقت خوبی نشان دادند. برای بررسی قدرت تعمیم شبکه عصبی با استفاده از داده‌هایی که در طول مدل‌سازی به کار گرفته نشده بودند، شبکه عصبی چندلایه عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی شعاعی پایه داشت.*

واژه‌های کلیدی آسفالت بازیافتی، پیش‌تراکم شیارشدگی، شبکه عصبی مصنوعی چندلایه، شبکه عصبی مصنوعی شعاعی پایه.

Developing a Prediction Model for Rutting Depth of Warm Mix Asphalt Mixture Using Neural Network

Mahsa Rouhi Fariman Sayyed Ali Hosseini Mansour Fakhri

Abstract *Researchers and engineers are constantly working to improve the performance of asphalt pavements. Pavements, as surfaces that are often loaded by heavy axles, must have sufficient resistance to fatigue, cracking and rutting. In this paper, using the data obtained from the laboratory results of the previous study that warm mix asphalt modified with glass fibers and 0, 20, 40 and 50% recycled asphalt pavement (RAP) were made to evaluate the resistance of the mixture against rutting, rutting depth of the mixtures was determined by multilayer perceptron neural network (MLP) and radial basis function neural network (RBF) and the results were compared with each other. The prediction model of post compaction and rutting depth showed good agreement with the experimental results. To evaluate the generalizability of the neural network using data that were not used during modeling, the multilayer perceptron neural network (MLP) performed better than the radial basis function neural network (RBF).*

Keywords Recycle asphalt pavement, Rutting, Multilayer perceptron neural network, Radial basis function neural network, Post compaction.

* تاریخ دریافت مقاله ١٤٠٠/٩/٢٧ و تاریخ پذیرش آن ١٤٠١/٦/٢٧ می‌باشد

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

(۳) استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

Email: ahosseini@shahroodut.ac.ir

مقدمه

آسفالت مخلوطی از قیر، سنگدانه و فیلر است که از جمله معمولترین روسازی مورد استفاده در جهان است [1]. روسازی راه‌ها سرمایه ملی هر کشور است و حمل و نقل جاده‌ای کارا، شرط اصلی در توسعه پایدار و توسعه اقتصادی است [2]. یک روسازی خوب باید سطحی صاف برای رانندگی داشته باشد، حجم بالای ترافیک را تحمل کند و کشش را با حداقل خسارت به سطح پایین منتقل کند [3]. خرابی‌هایی که در طول عمر مفید روسازی‌ها رخ می‌دهد، عمدتاً شامل تغییر شکل دائمی در مسیر چرخ خودروها، خراب شدن و ترک‌خوردگی حرارتی است [4]. از آنجا که هزینه‌های زیادی باید برای بازسازی این خرابی‌ها صرف شود، بنابراین پیشگیری زودهنگام مقرون به صرفه‌تر است. برای افزایش انعطاف‌پذیری روسازی‌ها و همچنین افزایش مقاومت آنها در برابر عوامل مخرب مانند خستگی، ترک‌های ناشی از تغییرات شدید دما و تغییر شکل دائمی، افزودنی‌هایی با قابلیت بهبود خواص مکانیکی روسازی آسفالتی استفاده می‌شود. در مطالعه قبلی، اندازه‌گیری شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم، با و بدون الیاف شیشه حاوی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد آسفالت بازیافتی (Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)) و ویژگی‌های پیرشدگی کوتاه‌مدت آنها در شرایط خشک و مرطوب آزمایش با استفاده از آزمایش مسیر چرخ KNTU انجام شد [5]. مسیر چرخ KNTU در سال ۲۰۱۵ در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی توسعه یافت (شکل ۱)، که می‌تواند دال‌های بتن آسفالتی با عرض ۲۶۰ میلی‌متر، طول ۴۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر را از طریق تراکم نورد، که نزدیک‌ترین روش به تراکم میدانی است، بسازد [5]. از دیگر قابلیت‌های این دستگاه انجام تست شیارشدگی در شرایط خشک و مرطوب بر روی دال‌های آسفالتی است.

نتایج نشان داد، اگرچه افزودن الیاف شیشه به تنهایی به مخلوط‌های آسفالتی گرم، مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط را بهبود می‌بخشد، اما نمی‌تواند حساسیت رطوبتی مخلوط را بهبود بخشد. ترکیب RAP و الیاف شیشه می‌تواند به مخلوط‌هایی منجر شود که مقاومت بالایی در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی دارند. مشخص شد که RAP پتانسیل بهبود مقاومت شیارشدگی همه مخلوط‌ها را دارد و با افزایش در صد RAP، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم اصلاح‌شده با الیاف شیشه برای هر دو شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت و پیرنشده افزایش می‌یابد [5].

شکل ۱ دستگاه مسیر چرخ KNTU

در این مقاله، با استفاده از داده‌های به دست آمده از نتایج آزمایش در مطالعه قبلی، پیش‌بینی پیش‌تراکم و عمق شیارشدگی توسط شبکه عصبی چندلایه (Multi Layer Perceptron) و شبکه عصبی شعاعی پایه (Radial Basis Function) انجام شد و نتایج این دو روش بایکدیگر مقایسه شد. همچنین برای بررسی قدرت تعمیم شبکه‌های عصبی از داده‌های اضافی که در طول مدل‌سازی به کار گرفته نشدند استفاده شد. پیش‌تراکم (Post Compaction) به عنوان تغییر شکل روسازی (میلی‌متر) در ۵۰۰ چرخه بارگذاری تعریف می‌شود [5]. شیار شدگی نیز یک مکانیزم خرابی بسیار رایج مشاهده شده در روسازی‌های آسفالتی انعطاف‌پذیر است. به طور معمول شیارشدگی با فرورفتگی‌های طولی در مسیر چرخ مشاهده می‌شود [6].

پیشینه تحقیق

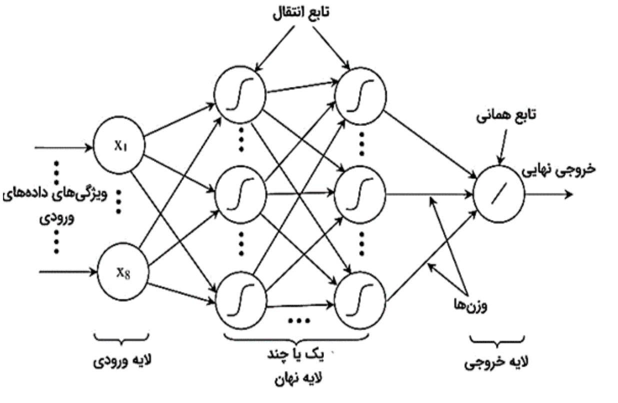
فعالیت‌های آزمایشگاهی از آن رو که زمان‌بر و پرهزینه هستند محققان را واداشته است تا امکان پیش‌بینی نتایج آزمایش را بررسی کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی در بیشتر رشته‌های

مهندسی، کاربرد قابل ملاحظه‌ای برای پیش‌بینی داشته‌اند. در تحقیقی، مدل تجربی برای تخمین عمق شیارشدگی مخلوط بتن آسفالتی با استفاده از پارامترهای ویسکوالاستیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شد. بر این اساس، نمونه‌های بتن آسفالتی حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد فضای خالی با دو نوع سنگدانه آهکی و سیلیسی و قیرهای PG64-22 و PG58-28 ساخته شد و در معرض آزمایش خزش دینامیکی در دمای ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده تنش ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. سپس پارامترهای ویسکوالاستیک نمونه‌ها از نمودارهای خزش استخراج شد و در نهایت مدل پیش‌بینی عمق شیارشدگی توسط شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شد. مقایسه نتایج خروجی با نتایج آزمایش تجربی نشان داد که با استفاده از این مدل می‌توان رفتار خزشی و عمق شیارشدگی روسازی‌های بتن آسفالتی را بر اساس پارامترهای مؤثر بدون نیاز به آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر تخمین زد [7]. در مطالعه دیگری آزمایش خزش دینامیکی تحت دماها و سطوح تنش مختلف برای ارزیابی عملکرد شیارشدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی داغ اصلاح‌شده با الیاف فورتا انجام شد. کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی عمق شیارشدگی بررسی و همچنین مقایسه‌ای بین مدل برگرز و مدل برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP) در براورد عمق شیارشدگی مخلوط آسفالتی انجام شد. نتایج نشان داد، مدل شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی (ANN) برای عمق شیارشدگی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داده است. همچنین نتیجه گرفتند، مدل برنامه‌ریزی ژنتیکی پیشنهادی نسبت به مدل برگرز خطای کمتری در پیش‌بینی عمق شیارشدگی مخلوط آسفالتی داغ دارد [4]. در تحقیقی دیگر کاربرد شبکه عصبی مصنوعی بر پیش‌بینی تغییر شکل دائمی مخلوط‌های بتن آسفالتی اصلاح‌شده توسط نانو افزودنی‌ها مورد بحث قرار گرفت. ۲۷۰ مخلوط آسفالتی از دو منبع مختلف سنگدانه (طبیعی و سرباره فولادی) ساخته شد و توسط نانو افزودنی‌ها اصلاح شد. همه نمونه‌ها در سه دمای آزمایش مختلف ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و پنج تنش ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش قرار گرفتند. مدل شبکه عصبی با استفاده از پنج پارامتر ورودی شامل نوع سنگدانه، نوع افزودنی، درصد افزودنی، دما و تنش ایجاد شد. نتایج انطباق عالی بین داده‌های پیش‌بینی‌شده و آزمایش را نشان داد [8].

روش‌های مدل‌سازی

شبکه‌های عصبی مصنوعی. سیستم‌های شبکه عصبی مصنوعی با الگوبرداری از ساختار مغز انسان، عملکرد مغز را به صورت مدل‌های ریاضی ساده‌شده شبیه‌سازی می‌کنند و برای پردازش داده‌ها استفاده می‌کنند [9]. این مطالعه از الگوریتم لونبرگ–مارکواردت (Levenberg-Marquardt) برای به حداقل رساندن تابع خطا استفاده کرده است [10]. شبکه‌های عصبی برای تقریب و براورد توابع ناشناخته استفاده می‌شوند. شبکه‌های عصبی نیز مانند مغز، از نورون‌های متصل به هم تشکیل شده است که ورودی را دریافت، اطلاعات را پردازش و خروجی تولید می‌کنند [11]. در این مطالعه پیش‌بینی پیش‌تراکم و عمق شیارشدگی با شبکه عصبی چندلایه و شبکه عصبی شعاعی پایه انجام شد.

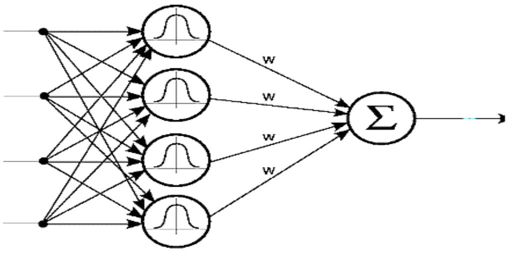
شبکه عصبی چندلایه پرکاربردترین نوع شبکه عصبی است. سه نوع لایه مشخص می‌شود: لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی (شکل ۲). هر نورون ورودی‌های دریافتی را پردازش می‌کند و با توجه به عملکردی که به درستی تعریف شده است، خروجی تولید می کند [12]. هر اتصال به وزن خاصی (W_i) مربوط می‌شود که ورودی را تقویت یا کاهش می‌دهد [11]. رابطه بین ورودی‌ها (X_i) و خروجی (Y_i) با استفاده از یک تابع انتقال خاص که معمولاً دارای شکل سیگموئید لجستیک است تعریف می‌شود [13].



شکل ۲ شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

شبکه عصبی شعاعی پایه دارای سه لایه (لایه ورودی، لایه پنهان با تابع فعال‌ساز گوسی و لایه خروجی) می‌باشند (شکل ۳). این شبکه‌ها از تابع شعاعی پایه (Radial Basis Function)، به عنوان تابع فعال‌سازی استفاده می‌کنند. شبکه‌های عصبی RBF و شبکه‌های MLP از نظر ساختاری تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند

و تنها نوع پردازشی که نورون‌ها روی ورودی‌هایشان انجام می‌دهند، متفاوت است. شبکه‌های RBF سریعتر از شبکه‌های MLP آموزش داده می‌شوند و نیز محدوده‌های تصمیم‌گیری بهتری را ایجاد می‌کنند. با وجود اینکه، این شبکه‌ها نیازمند نورون‌های بیشتری نسبت به شبکه‌های MLP هستند، ولی می‌توان در زمانی کوتاهتر نسبت به زمان مورد نیاز برای شبکه‌های MLP، آن‌ها را آموزش داد.



شکل ۳ شبکه عصبی شعاعی پایه

پس از اتمام مرحله آموزش شبکه‌های عصبی، کارایی مدل آموزش دیده توسط ضریب همبستگی (R)، میانگین مربعات خطا (Mean Square Error) و ریشه مانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) ارزیابی شد.

مقدار ضریب همبستگی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [14]:

$$R = \frac{\sum(D_i - \bar{D})(Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum(D_i - \bar{D})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2\right]^{0.5}} \qquad (۱)$$

که در آن D_i خروجی هدف برای داده i ام از دسته آزمایش، Y_i خروجی پیش‌بینی شده توسط شبکه برای داده i ام از دسته آزمایش، $\bar{D}, \bar{Y}$ به ترتیب میانگین خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه و خروجی‌های هدف و R ضریب همبستگی خطی است.

مقادیر MSE و RMSE نیز مطابق روابط (۲و۳) محاسبه می‌شود [15]:

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{n} \qquad (۲)$$

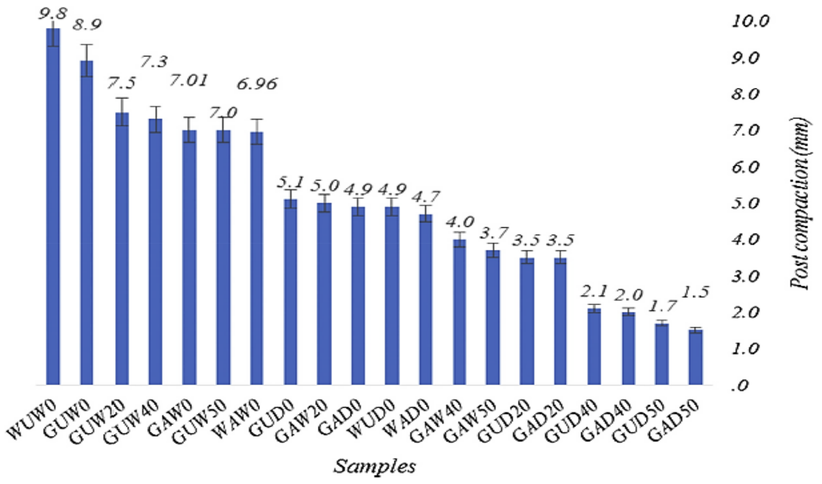
که در آن Y_i خروجی مطلوب برای مثال i ام از دسته آزمایش، $\hat{Y}_i$ خروجی شبکه برای مثال i ام از دسته آزمایش و n تعداد مثال‌های موجود در دسته آموزشی یا آزمایش است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{n}} \qquad (۳)$$

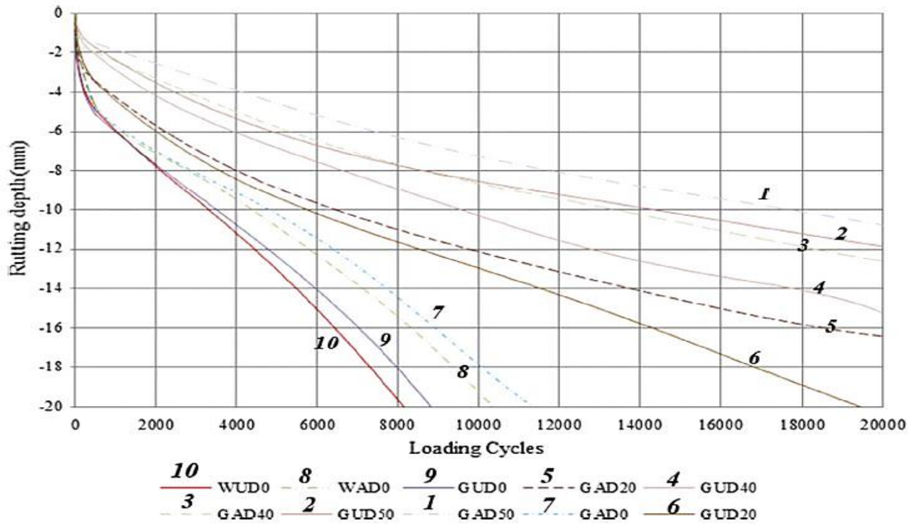
داده‌ها. در این مقاله پیش‌بینی پیش‌تراکم و عمق شیارشدگی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی براساس داده‌های برداشت شده مطالعه قبلی انجام شده است [5]. نتایج آزمایشگاهی مطالعه قبلی در شکل‌های (٤-٦) ارائه شده است. همچنین در جدول (۱) کد هر یک از مخلوط‌ها که در مطالعه قبل مورد بررسی قرار گرفتند، بدون در نظر گرفتن درصد RAP خلاصه شده است. داده‌های ورودی به شبکه عصبی شامل چرخه بارگذاری، درصد RAP، شرایط آزمایش (خشک (۱) و مرطوب (۲))، شرایط پیرشدگی نمونه‌ها (پیرنشده (۱) و کوتاه مدت پیرشده (۲)) و نوع نمونه (اصلاح نشده (۱) و اصلاح شده با الیاف شیشه (۲)) بودند.

جدول ۱ کد مخلوط‌های آزمایش شده در مطالعه قبل

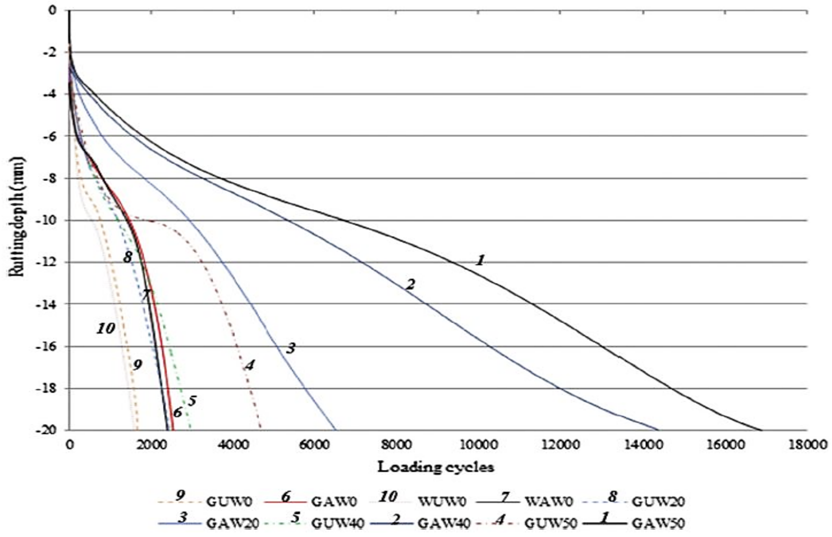
توضیحات	کد مخلوط ها
مخلوط آسفالتی گرم و آزمایش در شرایط خشک	WUD
مخلوط آسفالتی گرم و آزمایش در شرایط مرطوب	WUW
مخلوط آسفالتی گرم کوتاه مدت پیرشده و آزمایش در شرایط خشک	WAD
مخلوط آسفالتی گرم کوتاه مدت پیرشده و آزمایش در شرایط مرطوب	WAW
مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با الیاف شیشه و آزمایش در شرایط خشک	GUD
مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با الیاف شیشه و آزمایش در شرایط مرطوب	GUW
مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با الیاف شیشه، کوتاه مدت پیرشده و آزمایش در شرایط خشک	GAD
مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با الیاف شیشه، کوتاه مدت پیرشده و آزمایش در شرایط مرطوب	GAW



شکل ٤ پیش‌تراکم [5]



شکل ٥ عمق شیارشدگی برای آزمایش در شرایط خشک [5]



شکل ٦ عمق شیارشدگی برای آزمایش در شرایط مرطوب [5]

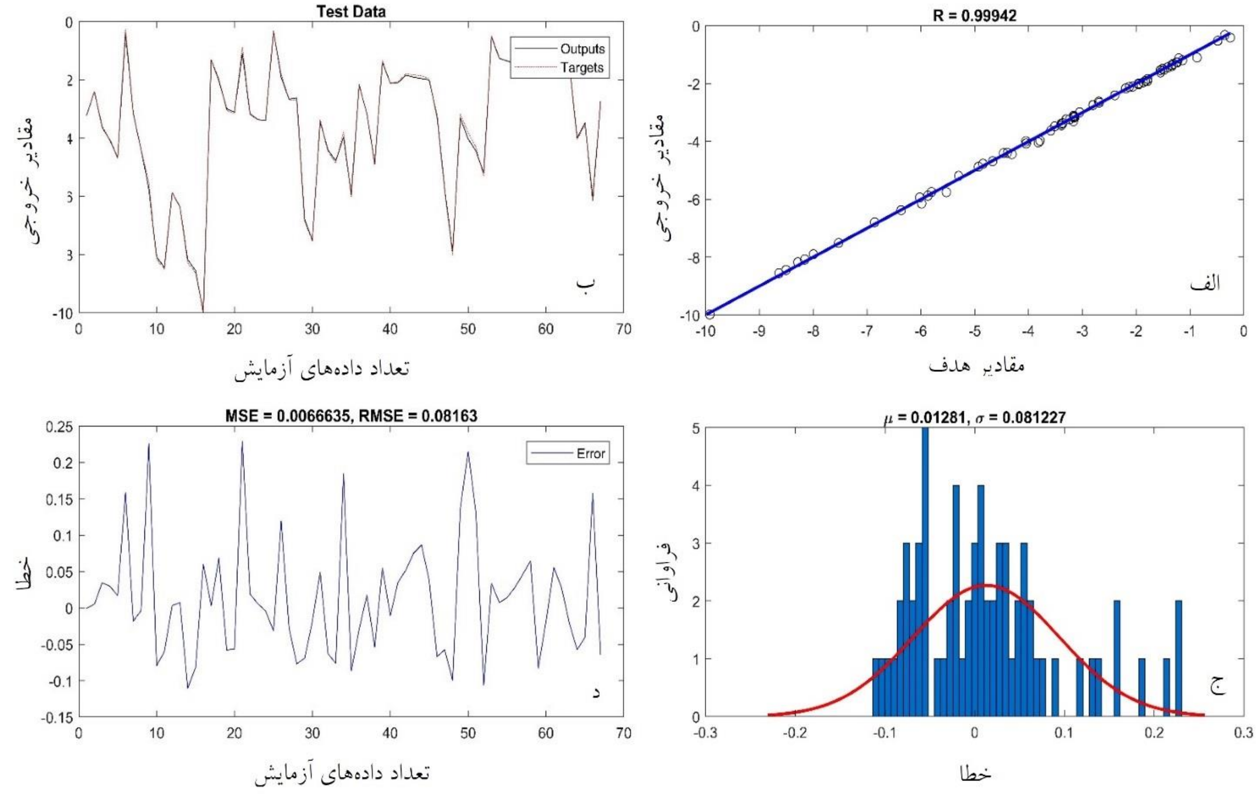
نتایج و بحث

نتایج حاصل از آنالیز مدل با شبکه عصبی MLP . شبکه چند لایه مورد نظر، یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی دارد. تعداد عنصرهای موجود در لایه ورودی در حقیقت همان تعداد متغیرهای ورودی معرفی شده به شبکه هستند. لایه پنهان حاوی ۱۰ نورون (سلول عصبی) است که بر رفتار شبکه اثر می‌گذارد و با سعی و خطا تعداد بهینه آن مشخص شده است. لایه خروجی شبکه عصبی نیز بیانگر خروجی مسئله است که شبکه باید آن را پیش‌بینی کند. در شکل (۷) و شکل (۸) نتایج آموزش شبکه برای داده‌های آزمایش و برای دیگر داده‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

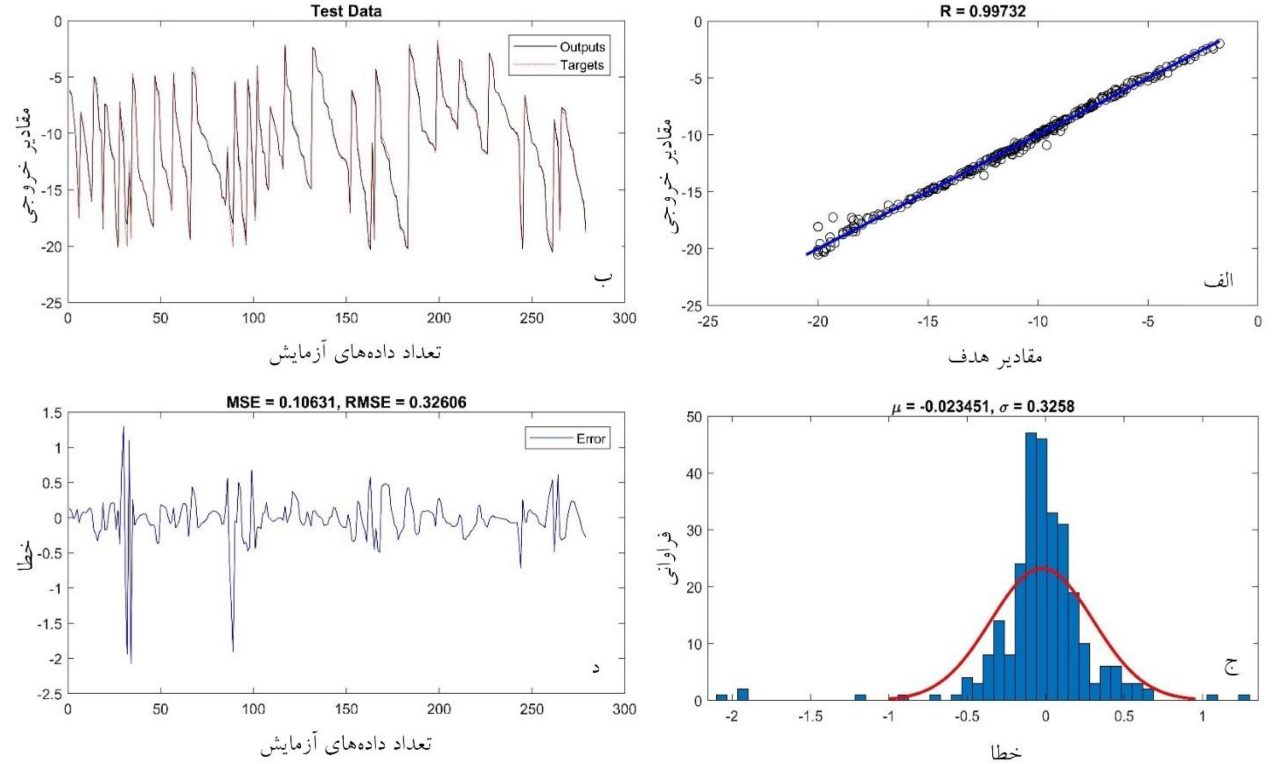
شکل‌های (۷-الف) و (۸-الف) نمودار همبستگی را نشان می‌دهند. خط برازش شده با توجه به مقادیر هدف و مقادیر پیش-بینی شده توسط شبکه عصبی رسم شده است که هرچه بر خط مبنا که به صورت خط چین نشان داده شده است، منطبق‌تر باشد، دقت شبکه بیشتر است.

ضریب همبستگی شدت ارتباط بین مقادیر هدف و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی را نشان می‌دهد. سنجش این همبستگی با استفاده از ضریبی به نام ضریب همبستگی خطی (R) انجام می‌شود. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند که ۱ به معنای همبستگی مثبت کامل، ۰ به معنای عدم همبستگی و ۱- به معنی همبستگی منفی کامل است [16]. در این مقاله، با توجه به ضرایب همبستگی، میزان یادگیری و عملکرد شبکه عصبی مناسب است.

در شکل‌های (۷- ب) و (۸-ب) داده‌های هدف و شبیه‌سازی شده در برنامه که به صورت منحنی رسم و با انطباق بر یکدیگر خطای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد، ارائه شده است. محور x تعداد داده‌هاست و محور y مقادیر داده‌های هدف و خروجی شبکه (نتایج مدل‌سازی) را نشان می‌دهد.



شکل ۷ نتایج داده‌های آزمایش برای پیش‌بینی پیش‌تراکم توسط شبکه عصبی MLP



شکل ۸ نتایج داده‌های آزمایش برای پیش‌بینی عمق شیارشدگی توسط شبکه عصبی MLP

جدول ۲ نتایج داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و تمام داده‌های شبکه عصبی MLP

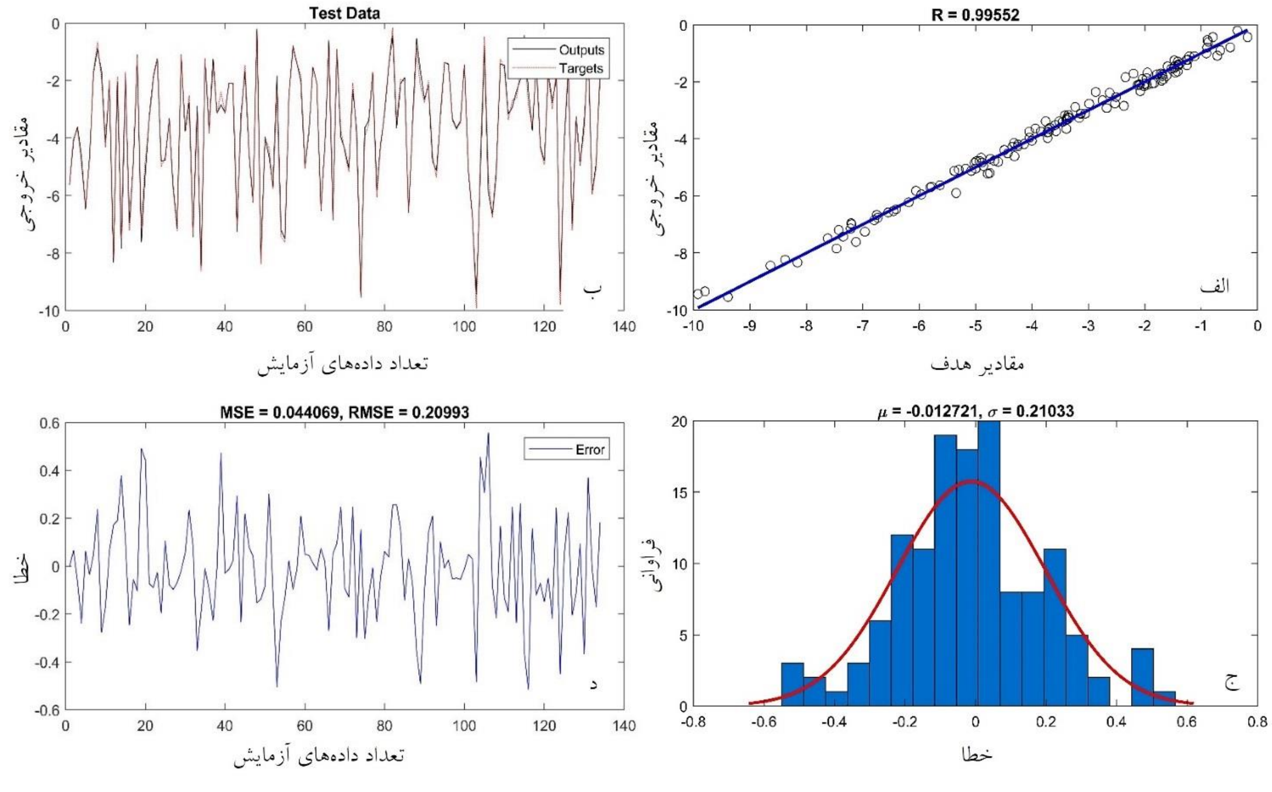
پیش‌تراکم				
σ	RMSE	MSE	R	
۰/۰۷۲۳	۰/۰۷۲۲	۰/۰۰۵۲۱	۰/۹۹۹	داده‌های آموزش
۰/۰۸۶۵	۰/۰۸۵۸	۰/۰۰۷۳۷	۰/۹۹۹	داده‌های صحت‌سنجی
۰/۰۷۵۹	۰/۰۷۵۸	۰/۰۰۵۷۵	۰/۹۹۹	تمام داده‌ها
عمق شیارشدگی				
σ	RMSE	MSE	R	
۰/۲۴۷۷	۰/۲۴۷۶	۰/۰۶۱۳	۰/۹۹۸	داده‌های آموزش
۰/۳۰۷۸	۰/۳۰۷۹	۰/۰۹۴۸	۰/۹۹۷	داده‌های صحت‌سنجی
۰/۲۷۰۴	۰/۲۷۰۳	۰/۰۷۳۱	۰/۹۹۸	تمام داده‌ها

شکل‌های (۷-ج) و (۸-ج) توزیع خطای پیش‌بینی شبکه از کل مجموعه داده‌ها را نشان می‌دهد. پراکندگی هرچه متمرکزتر باشد شبکه عملکرد بهتری دارد (پراکندگی مرتبط است با میزان خطای کل شبکه عصبی). هرچه مقدار سیگما کمتر باشد نمودار متمرکزتر و عملکرد شبکه بهتر خواهد شد [17]. مقدار μ، میانگین خطا و σ، انحراف معیار خطا می‌باشد. مقدار سیگما تقریباً باید برابر RMSE باشد، هنگامی که میانگین نزدیک صفر باشد این دو مقدار تقریباً برابر هستند. منحنی قرمز رنگ در نمودارها، توزیع نرمال می‌باشند و هرچه میله‌ها شبیه منحنی رفتار کنند، به این معنا است که خطاها رفتار نرمال دارند، به معنای

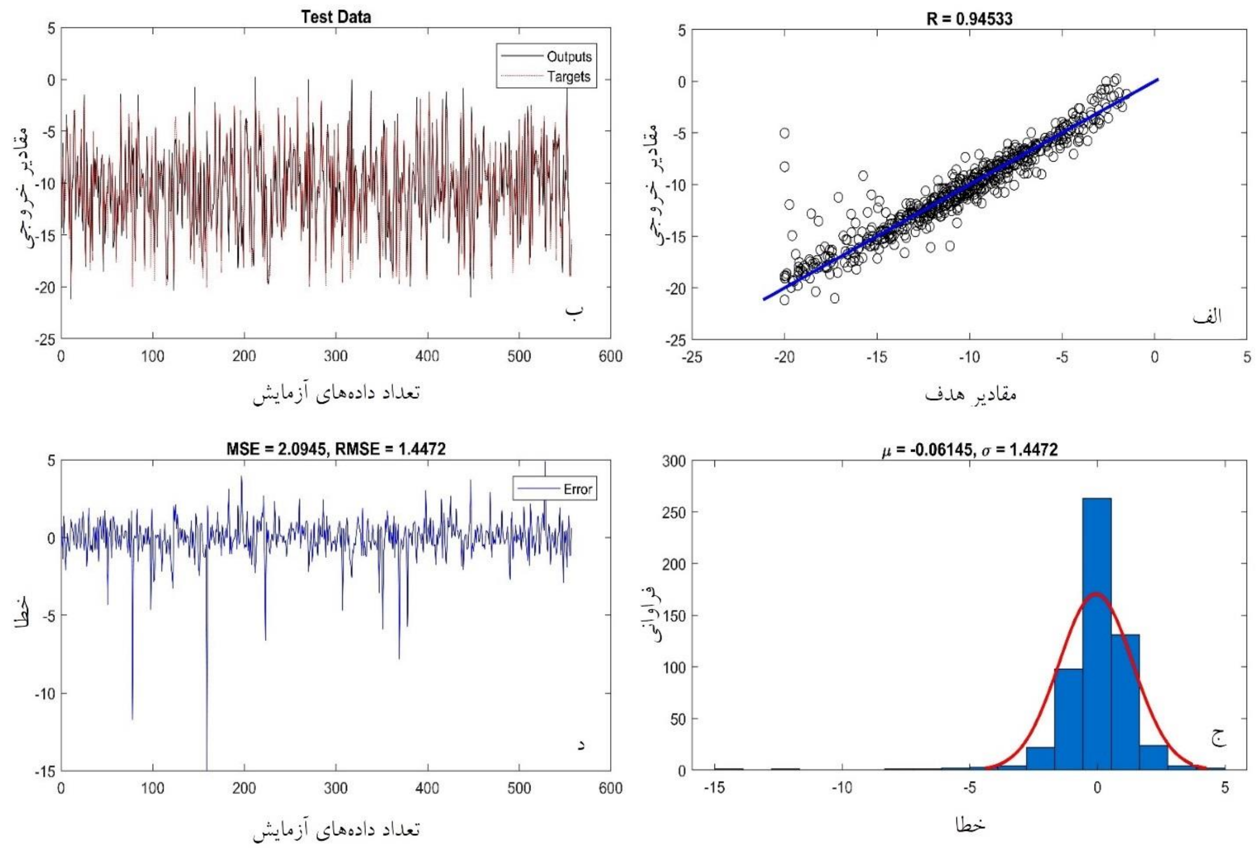
دیگر هرچه منحنی نوک تیزتر باشد، مقدار سیگما کمتر، در نتیجه RMSE و MSE نیز کوچکتر خواهند شد. همان طور که در شکل مشخص است برابری قابل قبول در مقایسه چنین توزیع خطا در هر مجموعه داده (آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش) مشاهده شد که نشان می‌دهد تقسیم‌بندی پایگاه داده مناسب است و هر مجموعه داده نماینده کل مجموعه داده است.

شکل‌های (۷-د) و (۸-د) میانگین مربعات خطا (MSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را نشان می‌دهد. میانگین مربعات خطا (MSE) در شبکه عصبی، روشی برای براورد میزان خطاست که در واقع تفاوت بین مقادیر هدف و آنچه تخمین زده شده، می‌باشد. هر چه مقدار MSE کمتر باشد، باعث می‌شود شبکه، ورودی‌ها را بهتر آموزش ببیند و خروجی دقیقتری ارائه دهد و هر قدر مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، نشان دهنده میزان کمتر خطاست [16]. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) همیشه غیر منفی است و مقدار ۰ (تقریباً هرگز در عمل به دست نیامده است) نشان‌دهنده تناسب کامل با داده‌ها است [16]. نقاط اکسترمم و مینیمم نیز نشان‌دهنده این است که در آن نقاط اختلاف داده‌های هدف و خروجی شبکه بیشتر از نقاط دیگر است.

نتایج حاصل از آنالیز مدل با شبکه عصبی RBF. شبکه RBF دارای سه لایه است. لایه اول مربوط به ورودی‌های شبکه است، لایه دوم یک لایه پنهان است که شامل توابع RBF است و لایه آخر مربوط به خروجی نهایی شبکه است. از تابع گوسی به عنوان تابع انتقال در واحدهای محاسباتی استفاده می‌شود [18]. معماری شبکه عصبی RBF استفاده شده در این مقاله شامل سه لایه است (لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی) و تعداد نورون‌های لایه پنهان نیز براساس سعی و خطا، ۱۰۰ نورون انتخاب شد. در شکل (۹) و شکل (۱۰) نتایج آموزش شبکه برای داده‌های آزمایش و در جدول (۳) برای دیگر داده‌ها ارائه شده است.



شکل ۹ نتایج داده‌های آزمایش برای پیش‌بینی پیش‌تراکم توسط شبکه عصبی RBF



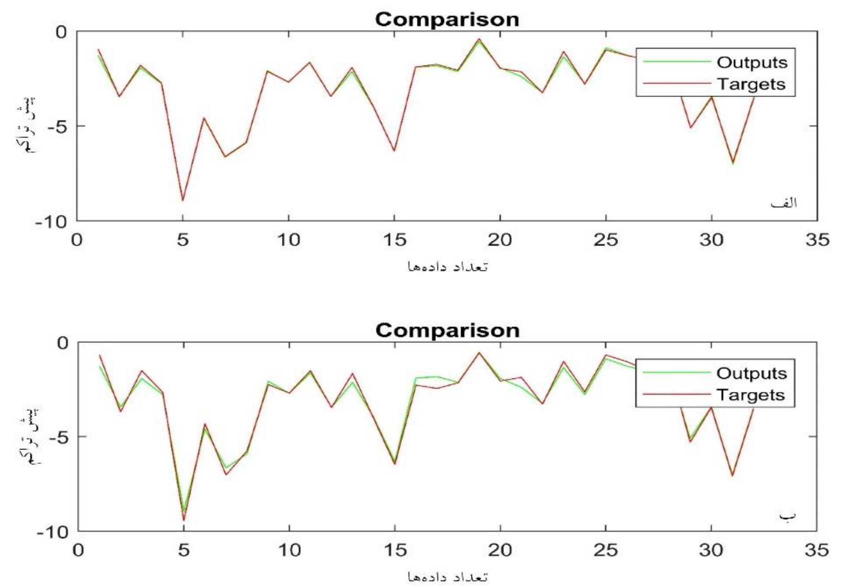
شکل ۱۰ نتایج داده‌های آزمایش برای پیش‌بینی عمق شیارشدگی توسط شبکه عصبی RBF

جدول ۳ نتایج داده‌های آموزش و تمام داده‌های شبکه عصبی RBF

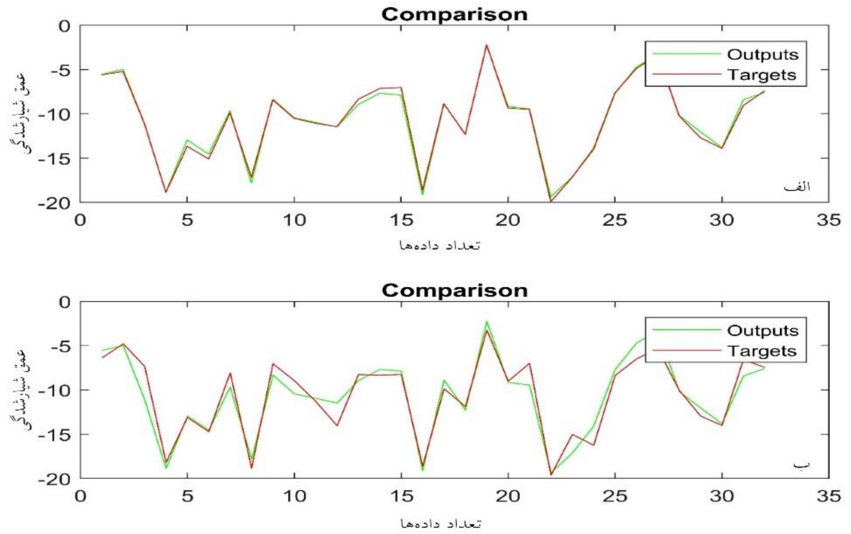
پیش‌تراکم				
σ	RMSE	MSE	R	
۰/۱	۰/۰۹۹۹	۰/۰۰۹۹۸	۰/۹۹۸	داده‌های آموزش
۰/۱٤۲۱	۰/۱٤۲۰	۰/۰۲۰۱۷	۰/۹۹۷	تمام داده‌ها
عمق شیارشدگی				
σ	RMSE	MSE	R	
۰/٦۸۸۲	۰/٦۸۷۹	۰/٤۷۳۲	۰/۹۸۷	داده‌های آموزش
۰/۹۷۹٦	۰/۹۷۹۵	۰/۹۵۹۵	۰/۹۷٤	تمام داده‌ها

ضریب همبستگی بین خروجی‌های هدف و شبکه عصبی نتایج خوبی را نشان می‌دهد، اما عملکرد شبکه عصبی MLP بهتر از RBF است. میزان یادگیری و عملکرد شبکه عصبی زمانی بهتر است که ضریب همبستگی به یک نزدیکتر و همچنین مقادیر MSE و RMSE نزدیک به صفر باشد.

بررسی قدرت تعمیم شبکه‌های عصبی. برای اعتبار بیشتر مدل توسعه یافته و به دست آوردن براورد بی‌طرفانه از خطای تعمیم، داده‌های اضافی که هرگز در طول توسعه مدل شبکه عصبی استفاده نشده بود، به شبکه ارائه شدند. در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نمودار مقایسه مقادیر هدف (مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی) و مقادیر خروجی (مقادیر به دست آمده از شبکه عصبی) برای پیش‌تراکم و عمق شیارشدگی ارائه شده است.



شکل ۱۱ نتایج حاصل از مقایسه شبیه‌سازی شبکه عصبی با نتایج تجربی برای پیش‌تراکم: الف) MLP، ب) RBF



شکل ۱۲ نتایج حاصل از مقایسه شبیه‌سازی شبکه عصبی با نتایج تجربی برای عمق شیارشدگی: الف) MLP، ب) RBF

همان طور که از شکل‌های (۱۱و ۱۲) مشخص است، در نمودار مقایسه، مقادیر هدف (مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی) و مقادیر خروجی (مقادیر به دست آمده از شبکه عصبی) برای شبکه عصبی MLP نسبت به شبکه عصبی RBF بر یکدیگر منطبقتر می‌باشند.

مدل ریاضی شبکه‌های عصبی MLP و RBF برای محاسبه خروجی‌های شبکه (پیش‌تراکم و عمق شیار شدگی) به ترتیب در روابط (٤ و ٥) آورده شده است.

$$PC(Rutting\ depth) = B_0 + \sum_{k=1}^{n}\left[W_k \cdot f_T\left(B_{Hk} + \sum_{i=1}^{m} W_{ik}P_i\right)\right] \quad (٤)$$

که در آن، B_0 بایاس لایه خروجی، W_k وزن نورون k لایه پنهان و نورون لایه خروجی، B_{Hk} بایاس نورون k در لایه پنهان، W_{ik} وزن بین ورودی i و نورون k لایه پنهان، P_i پارامتر ورودی و f_T تابع فعال‌ساز (تابع فعال‌ساز از نوع سیگموید (tansig)) است.

$$PC(Rutting\ depth) = B_0 + \sum_{k=1}^{n}\left[W_k \cdot f_T\left(B_{Hk} + \sum_{i=1}^{m} W_{ik}P_i\right)\right] \quad (٥)$$

که در آن، B_0 بایاس لایه خروجی، W_k وزن نورون k لایه پنهان و نورون لایه خروجی، B_{Hk} بایاس نورون k در لایه پنهان، W_{ik} وزن بین ورودی i و نورون k لایه پنهان، P_i پارامتر ورودی و f_T تابع فعال‌ساز (تابع فعال‌ساز از نوع گوسی (radbas)) است.

جدول ٤ مقایسه پیش‌تراکم پیش‌بینی شده با شبکه عصبی و پیش‌تراکم آزمایشگاهی

درصد خطای شبکه عصبی RBF	درصد خطای شبکه عصبی MLP	خروجی‌ها			ورودی‌ها				
		PC پیش‌بینی شده با شبکه عصبی RBF	PC پیش‌بینی شده با MLP شبکه عصبی	PC آزمایشگاهی	نوع نمونه	شرایط پیرشدگی	شرایط آزمایش	درصد RAP	چرخه بارگذاری
٦/۱٪	۰/٤۳٪	-٤/۳۱	-٤/٥۷	-٤/٥۹	۱	۲	۲	۰٪	٥٤
-٥/٥٦٪	۰/٦٪	-۷/۰۲	-٦/٦۱	-٦/٦٥	۲	۱	۲	۰٪	۱۳۸
٦/۷٤٪	-۱/۲٪	-۱/٥۲	-۱/٦٥	-۱/٦۳	۲	۱	۱	۲۰٪	٦۲
-۱/۷٦٪	۰/٥٪	-٤/۰٤	-۳/۹٥	-۳/۹۷	۱	۲	۲	۲۰٪	۱۹٦
-۷/۲۹٪	-۲/٦٪	-۲/۰٦	-۱/۹۷	-۱/۹۲	۲	۲	۱	٤۰٪	۳۹٦
-۱/۲۳٪	-۰/۳۱٪	-۳/۲۸	-۳/۲٥	-۳/۲٤	۱	۲	۲	٤۰٪	۱۷٦
۱۰/۲۳٪	-۱/٥۷٪	-۱/۱٤	-۱/۲۹	-۱/۲۷	۱	۲	۱	٥۰٪	٦٤
-۱/۱٤٪	۱/۲۸٪	-۷/۰۸	-٦/۹۱	-۷	۲	۱	۲	٥۰٪	٤۹۸

جدول ٥ مقایسه عمق شیارشدگی پیش‌بینی شده با شبکه عصبی و عمق شیارشدگی آزمایشگاهی

درصد خطای شبکه عصبی RBF	درصد خطای شبکه عصبی MLP	**خروجی‌ها**			**ورودی‌ها**				
		عمق شیارشدگی پیش‌بینی شده با شبکه عصبی RBF	عمق شیارشدگی پیش-بینی شده با شبکه عصبی MLP	عمق شیارشدگی آزمایشگاهی	نوع نمونه	شرایط پیرشدگی	شرایط آزمایش	درصد RAP	چرخه بارگذاری
۱۱/۲٤٪	۱/۹٪	-۱۷/۲	-۱۹/۰۱	-۱۹/۳۸	۱	۱	۲	۰	۱٥٥۰
۹٪	۹٪	-۸/۲۹	-۸/۲۹	-۹/۱۱	۲	۱	۲	۰	٥٦۰
-۱٤/٤۱٪	-۲/۰٦٪	-۱۱/۱۱	-۹/۹۱	-۹/۷۱	۱	۲	۱	۲۰	٥۸۷۰
-۱/۷۳٪	-۰/۷٥٪	-۱۷/٦۲	-۱۷/٤٥	-۱۷/۳۲	۲	۱	۲	۲۰	۲۱۸۰
-۳/۲۲٪	۱/۹۷٪	-٥/۷٦	-٥/٤۷	-٥/٥۸	۱	۲	۱	٤۰	٤۱۳۰
٦/۱٤٪	-۱/۲٤٪	-۱۸/۱۷	-۱۹/٦	-۱۹/۳٦	۲	۲	۱	٤۰	۱۲٦۰۰
۳/۳٤٪	-۰/۳۹٪	-۹/۸٤	-۱۰/۲۲	-۱۰/۱۸	۲	۲	۱	٥۰	۱۸۲۰۰
۱/۷۲٪	٤/۳۹٪	-٦/۲٦	-٦/۰۹	-٦/۳۷	۲	۲	۲	٥۰	۲۰۹۰

با توجه به مقادیر وزن‌ها و بایاس‌های به دست آمده از آموزش شبکه توسط نرم‌افزار متلب و روابط بالا، برای داده‌های جدید، مقادیر پیش‌تراکم و عمق شیارشدگی را با شبکه عصبی پیش‌بینی کرده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند و درصد خطای پیش‌بینی در جدول (٤ و ٥) ارائه شده است.

همان طور که از جداول (٤) و (٥) مشخص است، درصد خطای شبکه عصبی MLP برای پیش‌بینی پیش‌تراکم و عمق شیارشدگی نسبت به شبکه عصبی RBF، کمتر است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله داده‌های به دست آمده از نتایج آزمایشگاه در مطالعه قبل، توسط شبکه عصبی چندلایه (MLP) و شبکه عصبی شعاعی پایه (RBF) تحلیل شد و نتایج این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل این پژوهش به شرح زیر است:

۱. پیش‌بینی پیش‌تراکم توسط شبکه عصبی MLP دارای ضریب همبستگی ۰٫۹۹۹ و توسط شبکه عصبی RBF دارای ضریب همبستگی ۰٫۹۹٥ و پیش‌بینی عمق شیارشدگی توسط شبکه

عصبی MLP دارای ضریب همبستگی ۰٫۹۹۷ و توسط شبکه عصبی RBF دارای ضریب همبستگی ۰٫۹٤۵ بود که شبکه عصبی MLP دقت بیشتری در پیش‌بینی داشت.

۲. معماری بهینه شبکه عصبی MLP به صورت ۱-۱۰-۵ است، که نشان‌دهنده ۵ ورودی، ۱۰ نورون در لایه پنهان و ۱ خروجی می‌باشد.

۳. معماری بهینه شبکه عصبی RBF به صورت ۱-۱۰۰-۵ است، که نشان‌دهنده ۵ ورودی، ۱۰۰ نورون در لایه پنهان و ۱ خروجی می‌باشد.

٤. به منظور اعتبار بیشتر مدل، داده‌های اضافی که هرگز در طول مدل‌سازی استفاده نشده بودند، به کار گرفته شدند که شبکه عصبی MLP برای شبیه‌سازی این داده‌ها در مقایسه با شبکه عصبی RBF عملکرد بهتری داشت و درصد خطای پایینتری ارائه داد.

مراجع

[1] M.Fakhri, S.M.Karimi, M. Qorbani Nik," Estimation of Pavement Roughness Based on Surface Distresses Using Artificial Neural Network (case study: Iran's arterial roads)," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 12, no. 48, pp. 697-713(2021) (In Persian)

[2] M.Fakhri, E. Shahebrahimi, F. Chavoshian nain," Study Rutting and Effect of Self-healing on Fatigue Behavior of Modified Asphalt Mixtures," *Journal of Transportation Research*, vol. 1, no. 67, pp. 143-156(2019) (In Persian)

[3] A.Tarek, A. Amr, H. Mahgoub, Asphalt crack detection using thermography,: university of central florida, center for advanced transportation systems simulation (CATSS) infra mation, 2005.

[4] S.M.Mirabdolazimi, Gh. Shafabakhsh, "Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique," *Construction and Building Materials,* 148, pp. 666-674, 2017.

[5] M.Fakhri, S.A. Hosseini, "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion," *Construction and Building Materials,* 134, pp. 626-640, 2017.

[6] A. Choubdar, A. Farajollahi, A. Ameli," Experimental Evaluation of Rutting Performance of Polymer Modified Binders and Its Relation to Rutting Resistance of Mixture," *Journal of Transportation Research*, vol. 17, no. 64, pp. 91-102(2020) (In Persian)

[7] N. Kamboozia, H. Ziari, H. Behbahani, "Artificial neural networks approach to predicting rut depth of asphalt concrete by using of visco-elastic parameters," Construction and Building Materials, 158, pp. 873-882, 2018.

[8] G.H. Shafabakhsh, O. Jafari Ani, M. Talebsafa, "Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates," Construction and Building Materials, 85, pp. 136-143, 2015.

[9] M. Fakhri, R. Shahni Dezfoulian," Determination of Effective Structural Number based on IRI and Surface Distress Using Regression and Neural Network Model," *Journal of Transportation Research*, vol. 15, no. 57, pp. 207-221(2019) (In Persian)

[10] H. Ziari, A. Amini, A. Goli, & D. Mirzaiyan, "Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks," Construction and Building Materials, 160, pp.415-426, 2018.

[11] G. Sollazzo, T.F. Fwa, G. Bosurgi, "An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements," Construction and Building Materials, 134, pp. 684-693, 2017.

[12] H. Fizza, A. Yasir, I. Muhammad, A. Murtaza, A. Shafeeq, "A data-driven model for phase angle behaviour of asphalt concrete mixtures based on convolutional neural network," Construction and Building Materials, 269, p.121235, 2020.

[13] E. Ozgan, "Artificial neural network based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete," Expert Systems with Applications, 38, pp. 6025-6030, 2011.

[14] R.Hecht-Neilsen, Neurocomputing,: Addison-Wesley, Boston, 1989.

[15] Gupta, M,. Jin, L,. & Homma, N., Static and Dynamic Neural Network,: Hobokon, New Jersey, 2004.

[16] H. Taherkhani, A. Ebrahimimoghadam," Prediction of the Fatigue Life of Asphalt Mixtures using Artificial Neural Networks ," *Journal of Transportation Research*, vol. 4, no. 1, pp. 45-58(2013) (In Persian)

[17] M. Saltan, T. Mesut, K. Mustafa, "Artificial neural networks application for flexible pavements thickness modeling," Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, vol. 26, pp. 243-248. 2002.

[18] K. Suzuki, Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications,: Apr. 2011,
doi: 10.5772/644.

Journal Ferdowsi Civil Engineering , 35, 4, 2022. (17-34)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

The Imapact of Soil Particle Size Distribution on the Abrasion of EPB Machine Cutting Tools

Research Article

Mohammad Darbor[1], Hamid Chakeri[2], Taha Ansari[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.76503.1140

1. Introduction

With the advancement of technology, the use of mechanized tunnel boring machine (TBM) for excavating underground spaces in urban environments have drastically increased for a variety of reasons such as creating little disturbance in urban traffic, high speed, and safety in the excavation operations. One of the most critical problems of mechanized tunnelling is the wear of cutting tools. Soil abrasivity significantly reduces drilling efficiency and increases the operating costs of urban tunnels. The phenomenon of wear in the mechanized excavation of tunnels consists of two types: primary wear and secondary wear. The cutting tools are worn due to direct contact with the soil in the first type, which is known as primary wear or excavation wear. The second type, known as secondary wear, includes the wear of the cutting tools and parts that are indirectly involved with the soil. Factors affecting wear include geological and geotechnical factors, excavation machine characteristics, and excavation parameters. One of the most important geological features affecting the wear of cutting tools is particle size distribution. The conducted studies show the impact of soil particle size on soil abrasivity. There are extensive studies on the abrasivity of rocks. However, limited studies have been performed on the influence of soil particle size distribution on tunnelling machine cutting tools. Despite the wide range of methods and devices for measuring soil abrasivity, so far, no standard and comprehensive method for measuring soil abrasivity have been presented. Considering the impact of some effective parameters on the wear of cutting tools, a new laboratory machine was constructed in this study to determine soil abrasivity. Then, using eight different types of soil granulation, the impact of soil particle size distribution and density on the wear of the cutting tool was studied. Moreover, using the Talbot curve, the wear values of cutting tools in different particle sizes were compared.

2. A new laboratory machine for determining Soil abrasivity

A new laboratory machine to determine soil abrasivity was designed and built to match the laboratory conditions as much as possible with the real conditions and the mechanism of the tunnel boring machine. Among the applications of this machine, we can mention the evaluation and investigation of the abrasivity of soil samples and the wear of cutting tools. Among the advantages and exclusive features of this machine, the following can be mentioned:

- Having a cutterhead similar to the TBM cutterhead with the arrangement of central, middle, and peripheral cutting tools;
- Continuous penetration of the cutterhead and, as a result, the penetration of cutting tools into fresh soil;
- Ability to adjust the rotation speed of the cutterhead;
- The possibility of adjusting the penetration speed of the cutterhead in the soil;
- The possibility of adjusting the pressure behind the cutterhead.

The various components of the new laboratory machine for determining soil abrasivity include the inverter, motor, shaft and cutterhead, excavation chamber, and air compressor (Figure 1).

Figure 1. The new laboratory machine to determine soil abrasivity

3. Materials and methods

The suitable soil for this research was provided from the west of Tabriz city, from the excavation site of Line 5 of Station 2 of Tabriz Metro. The second line of the Tabriz

*Manuscript received: May 1, 2022, Revised, September 4, 2022, Accepted, September 24, 2022.

1. Corresponding author. Assistant Professor in Rock Mechanics Engineering, Mining Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. **Email**: darbor@sut.ac.ir

2. Associate Professor in Rock Mechanics Engineering, Mining Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

3. MSc in Rock Mechanics Engineering, Mining Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

metro is about 22.4 kilometers long, and it is currently the longest line of the rail network in Tabriz. This line includes 20 stations, which starts from Qaramalek in Tabriz and ends in Basij Square. In the development plan of this line, passing through Khavaran area and connecting to Tabriz-Mianeh railway station is considered. The soil sample provided from the desired location was granulated according to the ASTM D 422-87 standard. In order to investigate the impact of soil granulation parameters on the amount of wear of cutting tools, tests were carried out in eight different soil granulation. The graphs of changes in the average percentage of wear and the weighted average of wear on the cutting tools of the cutterhead according to the changes of each parameter were plotted. In these tests, the soil moisture content is 5%, the wet soil density is 1.7 grams per cubic centimeter, the rotation speed of the cutterhead is 60 revolutions per minute, and the penetration speed of the cutterhead in the soil is 2.5 mm. in a minute and the test time is 40 minutes.

4. Results and discussion

Examining the graphs of the impacts of fine grain on the amount of wear of cutting tools shows that in the absence of fine grain, the amount of wear is close to zero (Figure 2). With a small increase in the percentage of fine grains in the soil composition, the amount of wear increases with a large slope, so that we reach the maximum wear of cutting tools at a fine grain amount of 10%. After this point, by increasing the amount of fine grain, the amount of wear decreases with a small slope. The reason for this type of behavior can be stated as follows: in order to keep the coarse-grained particles of a type of soil together, a minimal amount of fine particles is necessary so that these particles are not able to move easily in front of cutting tools. In other words, the role of fine grain in the amount of wear is indirect. By observing the results related to the impact of coarse grains on the amount of average wear, it can be concluded that with the increase of coarse grains from 70% to 90% in the soil composition, the amount of abrasion increased with a low slope, but from the 90% coarse grain, a sharp decrease in the amount of abrasions is observed (Figure 3).

To further investigate the obtained results, the graphs of eight types of soil granulation were compared with Talbot's granulation curve at n=0.35 (soil granulation with maximum density or packing). The results show that from grain size 1 to 4, in the upper part of the Talbot curve, as the curve of grain size approaches the maximum density curve, the amount of average wear increases with a low slope. By using the granulation curve of the fifth soil, it can be seen that the percentage of fine grains is approximately 10%, a critical point for the composition of any soil. That is, by reducing the amount of fine grains from this point onwards, the structure of the soil becomes shaky and loose, and as a result, the wear greatly reduces. Moreover, it is important that with the increase of the amount of fine grain more than 10%, the amount of wear decreases with a very small slope. The comparison of the amount of wear on cutting tools with Talbot's granulation curve shows that the maximum wear occurs in the granulation according to Talbot's curve.

To investigate the impact of soil density on the wear of cutting tools, fourth soil was selected and experiments with densities of 1.6, 1.7, and 1.8 grams per cubic centimeter were designed and performed.

The results obtained from the experiments showed that the amount of wear of cutting tools increases with the increase of soil density. By increasing the amount of soil compaction and as a result of increasing the density of the soil, the relative porosity of the soil reduces and the cutting tools installed on the cutterhead collide with more particles of soil during one round of rotation and practically increases the average wear of the cutting tools.

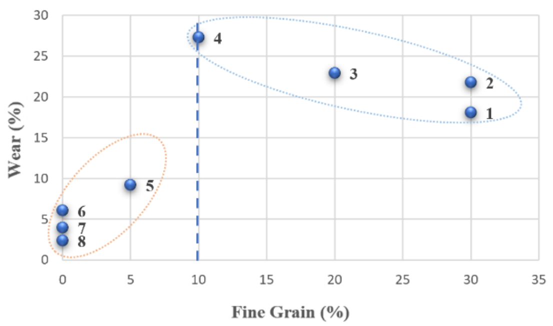


Figure 2. The impact of fine grain on the average wear percentage of cutting tools

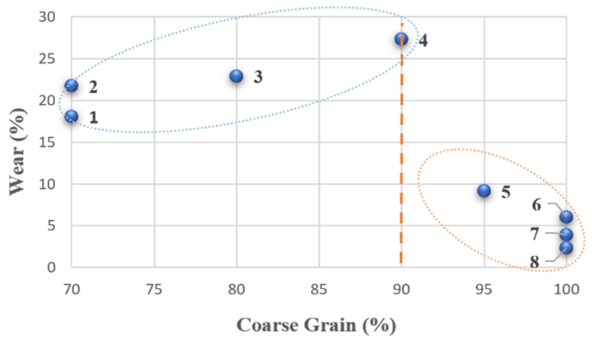


Figure 3. The impact of fine grain on the average wear percentage of cutting tools

5. Conclusion

The main conclusions drawn from this study are as follows:

1. In the absence of fine grain, the amount of wear is negligible and close to zero. With a slight increase in the percentage of fine grains in the soil composition, the amount of wear increases with a steep slope, so that in the amount of fine grains of 10%, it reaches the maximum wear of cutting tools with a value of 27.3%. After this point, with the increase in the amount of fine grain, the amount of abrasion decreases with a small slope;
2. With the increase of coarse grains from 70% to 90% in the soil composition, the amount of wear with a low slope increased from 18.06% to 27.3%, but from 90% coarse grains, observed a sharp decrease in the amount of wear;
3. The highest amount of wear on cutting tools occurs in soils with a grain size corresponding to the grain size obtained from the Talbot curve. As far as the grain size curve of the desired soil deviates from the Talbot curve, the wear decreases.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک بر روی سایش ابزار برشی ماشین‌های EPB *

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.76503.1140

محمد داربر (۱)   حمید چاکری (۲)   طاها انصاری (۳)

چکیده *یکی از مهمترین مشکلات حفاری مکانیزه، سایش و خوردگی ابزار و قطعات حفاری می‌باشد. ساینگی خاک، باعث کاهش قابل توجه راندمان حفاری و افزایش هزینه‌های اجرایی تونل‌های شهری می‌شود. مطالعات گسترده‌ای در مورد سایش و خوردگی بر روی سنگ‌ها وجود دارد. با این حال، مطالعات محدودی روی ذرات خاک و تأثیر آنها بر ابزار برشی ماشین حفاری انجام شده است. با وجود طیف گسترده‌ای از روش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری سایش خاک، تاکنون روش استاندارد و جامعی برای اندازه‌گیری سایش خاک ارائه نشده است. در این پژوهش، به منظور تعیین سایش خاک، دستگاه آزمایشگاهی جدیدی ساخته شد و تأثیر توزیع اندازه ذرات و چگالی خاک بر روی سایش ابزار برشی در ۸ دانه‌بندی مختلف خاک بررسی شد. همچنین، با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی (نمودار تالبوت)، مقادیر سایش ابزارهای برشی در دانه‌بندی‌های مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد، بیشترین مقدار سایش ابزارهای برشی در خاک‌های با دانه‌بندی منطبق بر دانه‌بندی به دست آمده از معادله تالبوت اتفاق می‌افتد. به هر میزانی که نمودار دانه‌بندی خاک از نمودار تالبوت فاصله می‌گیرد، سایش‌ها کاهش می‌یابند. همچنین، حداکثر سایش ابزارهای برشی در مقدار ریزدانه ۱۰ درصد با درصد سایش میانگین ۲۷/۳ درصد، اتفاق می‌افتد. با کاهش ریزدانه به مقادیر پائین‌تر از ۱۰ درصد، ساختار خاک به‌هم‌خورده و در نتیجه درصد سایش میانگین ابزارهای برشی از ۲۷/۳ درصد در خاک با ریزدانه ۱۰ درصد به ۲/۳۷ درصد در خاک بدون ریزدانه کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با افزایش چگالی خاک از ۱/۶ به ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد سایش میانگین ابزارهای برشی از ۸/۱ درصد به ۳۱/٤ درصد افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی حفاری مکانیزه، ابزار برشی، ساینگی، دانه‌بندی خاک، چگالی.

The Influence of Soil Particle Size Distribution on the Abrasion of EPB Machine Cutting Tools

Mohammad Darbor   Hamid Chakeri   Taha Ansari

Abstract *One of the most critical problems of mechanized tunnelling is the abrasion of cutting tools. Soil abrasivity significantly reduces drilling efficiency and increases the operating costs of urban tunnels. There are extensive studies on abrasivity of rocks. However, limited studies have been performed on the influence of soil particle size distribution on tunnelling machine cutting tools. Despite the wide range of methods and devices for measuring soil abrasivity, so far, no standard and comprehensive method for measuring soil abrasivity have been presented. In this study, considering the effect of some effective parameters on the abrasion of cutting tools, a new laboratory machine to determine soil abrasivity was constructed. Then, using 8 different types of soil granulation, the effect of soil particle size distribution and density on cutting tool abrasion was studied. Also, using the Talbot curve, the abrasion values of cutting tools in different particle sizes were compared. The results showed that the highest values of cutting tools abrasion occur in soils with particle sizes according to the Talbot equation. As the soil granulation curve moves away from the Talbot curve, abrasivity decreases. Also, the maximum abrasion of cutting tools occurs in the amount of fine aggregate of 10% with an average abrasion percentage of 27.3%. By reducing the fine aggregate to values lower than 10%, the soil structure is disturbed and as a result, the average abrasion percentage of cutting tools decreases from 27.3% in soil with 10% fine aggregate to 2.37% in soil without fine aggregate. Also, by increasing soil density from 1.6 to 1.8, the average abrasion percentage of cutting tools increases from 8.1% to 31.4%.*

Keywords Mechanized excavation, Cutting tools, Soil abrasivity, Particle size distribution, Density.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۲/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۷/۲ می‌باشد

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

(۳) فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

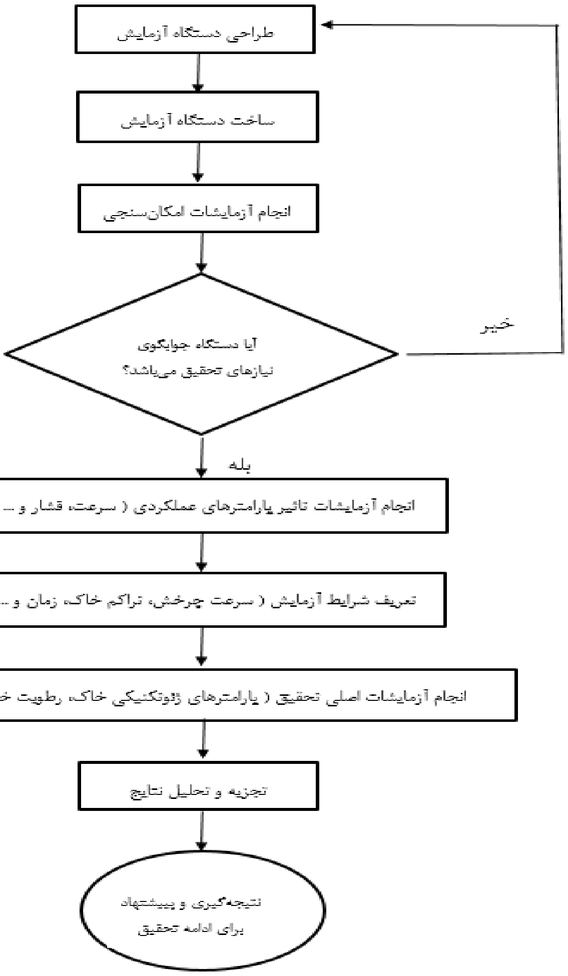
Email: darbor@sut.ac.ir

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از دستگاه حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل (TBM) برای حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری بنا به دلایلی مانند ایجاد اختلال کم در ترافیک شهری، سرعت بالا، سهولت و ایمنی بیشتر در عملیات اجرایی حفاری، افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است [1]. امروزه به کارگیری ماشین‌های حفاری تونل از نوع سپر تعادلی زمین به یک روش انحصاری تبدیل شده است [2]. عملکرد مؤثر دستگاه حفاری مکانیزه با توجه به محدودیت‌های اقتصادی در تونل‌سازی مکانیزه، اساساً توسط خاصیت سایندگی خاک و سایش قسمت‌های مختلف TBM تعیین می‌شود [3]. عوامل مؤثر بر ساینگی شامل عوامل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، خصوصیات ماشین حفاری و پارامترهای حفاری هستند [4-6]. یکی از مهمترین ویژگی‌های زمین‌شناسی مؤثر بر سایش ابزار برش، دانه‌بندی خاک است. مطالعات انجام شده، تأثیر اندازه ذرات خاک را در قابلیت ساینگی خاک نشان می‌دهد. تورو و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر اندازه ذرات خاک را در میزان ساینگی بررسی کردند. آنها ضریب سایش LCPC را در نمونه‌های مختلف خاک اندازه‌گیری کرده و نشان دادند که بین قطر ذرات خاک و سایبدگی رابطه مستقیم وجود دارد[7] . دراکر (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج آزمایش LCPC، ساینگی شن‌های آبرفتی دانوب را مطالعه کرد. تحقیقات در مورد اندازه ذرات مختلف خاک نشان داد که یک رابطه خطی مستقیم بین اندازه ذرات خاک و ساینگی وجود دارد [8]. برای بررسی تأثیر اندازه ذرات در مطالعات سایشی خاک، می‌توان از پارامترهای دانه‌بندی استفاده کرد. تورو و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقات خود از D_{50} استفاده کردند، اندازه‌ای که ۵۰ درصد ذرات کوچکتر از آن هستند [4]. هاشم نژاد و همکاران (۲۰۱۲) از اندازه مؤثر (ES) برای مطالعه نمونه‌های ساینده استفاده کردند [9]. برزگری و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش‌های سایش را روی مجموعه‌ای از خاک‌های سیلیسی با گروه‌های دامنه‌ای با قطر متفاوت انجام دادند. اندازه ذرات خاک مورد استفاده در این تحقیق بین ۰/۱ تا ٤ میلی‌متر می‌باشد. آنها نشان دادند، با افزایش اندازه ذرات خاک، میزان سایش افزایش می‌یابد. با این وجود، روند صعودی با بزرگتر شدن اندازه ذرات از ٤ میلی‌متر متوقف شد [3]. قهرمان و همکاران (۲۰۱٦) ارتباط بین ضریب سایشی LCPC و پارامترهای بافت خاک را بررسی کردند. آنها با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر، متوسط قطر ذرات خاک را تعیین و از آن در مطالعات خود در مورد ساینگی نمونه‌های خاک استفاده کردند [10]. با استفاده از دستگاه آزمایش RUB، کوپفرلی و همکاران (۲۰۱٦)، تأثیر اندازه ذرات خاک را بر میزان ساینگی خاک مطالعه کردند. این مطالعات، شامل آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف شن و ماسه کوارتزی با اندازه ذرات ۰/۰٦–۱ میلی‌متر ، ۰/۰٦–۲ میلی‌متر و ۰/۰٦–٤ میلی‌متر بود. با افزایش دامنه اندازه ذرات نمونه‌های آزمایش شده، سایش‌های ثبت شده در آزمایش‌ها افزایش یافت [11].

جاکوبسن و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از دستگاه سایش LCPC، تأثیر توزیع دانه‌بندی خاک را بر روی سایش در خاک غیرچسبنده مطالعه کردند. آنها از ترکیب دو نوع دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه سیلیسی، با درصدهای مختلف، برای توزیع دانه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش خود استفاده کردند. در این پژوهش، با افزایش اندازه مؤثر (ES)، مقادیر سایش، افزایش یافت [12]. لی و همکاران (۲۰۲۲)، تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی سایش ابزارهای برشی بررسی کردند. آنها نشان دادند، با افزایش نسبت تزریق فوم (FIR)، مقدار سایش و نیز مقدار انرژی مورد نیاز برای حفاری کاهش می‌یابد [13]. چن و همکاران (۲۰۲۲)، به وسیله یک نمونه شبیه‌ساز آزمایشگاهی از دستگاه حفاری مکانیزه، عوامل مؤثر بر کاهش سایش را بررسی کردند. آنها نشان دادند با افزایش نسبت تزریق فوم (FIR)، سرعت حفاری افزایش می‌یابد [14].

مطالعات ذکر شده، بیشتر بر روی تأثیر اندازه ذرات، مخصوصاً درشت‌دانه‌ها در غیاب ذرات سیلت و رس متمرکز شده‌اند و عملاً بخش وسیعی از ذرات خاک را در نظر نگرفته و تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک طبیعی را بررسی نکرده‌اند. همچنین بیشتر مطالعات انجام شده به گونه‌ای است که ابزار برشی همواره با خاک دست‌خورده در تماس است. در این پژوهش، برای حل این مشکلات، دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک با قابلیت استفاده در خاک‌هایی با حداکثر اندازه ذرات ۲۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. برای بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات و چگالی خاک بر روی سایش ابزار برشی، ۸ نوع دانه‌بندی خاک، انتخاب شده و در مجموع، ۲٤ آزمایش مختلف انجام شده است. همچنین، با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی (نمودار تالبوت)، مقادیر سایش ابزارهای برشی در دانه‌بندی‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. شکل (۱) روند نمای مراحل مختلف این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ مراحل تحقیق

جدول ۱ پارامترهای مؤثر بر سایش خاک در حفاری مکانیزه تونل [17]

پارامترهای مؤثر بر سایش خاک	
پارامترهای حفاری	سرعت چرخش کله‌حفار، میزان نفوذ، گشتاور کله‌حفار، فشار اطاقک حفاری، نیروی فشاری، نوع افزودنی‌ها، شرایط اصلاح خاک و...
مشخصات فنی دستگاه حفاری	نوع دستگاه حفاری، چیدمان ابزار برشی، قطر دستگاه، میزان بازشدگی کله‌حفار، تعداد ابزار برشی، جنس و سختی ابزار و...
ویژگی‌های زمین‌شناسی	دانه‌بندی خاک، بافت خاک، کانی‌شناسی، دانسیته خاک، شکل دانه‌ها، جنس خاک، تراکم، درصد رطوبت، زاویه‌داری و...

تأثیر سایندگی خاک بر حفاری مکانیزه

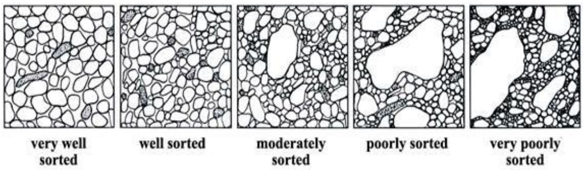
پدیده سایش در حفاری مکانیزه تونل‌ها از دو نوع سایش اولیه یا سایش حفاری و سایش ثانویه تشکیل می‌شود. در نوع اول، که به عنوان سایش اولیه یا سایش حفاری شناخته می‌شود، ابزارهای برش به دلیل درگیری مستقیم با خاک، ساییده می‌شوند. از بخش‌هایی از دستگاه حفاری که مورد سایش اولیه قرار می‌گیرند، می‌توان به دیسک‌ها، باکت‌ها و اسکرپرهای دستگاه حفاری اشاره نمود. برای این نوع سایش، عامل تعیین کننده میزان سایش، نیروی تماسی بین ابزارهای برش و دانه‌های خاک موجود در جبهه‌کار تونل است. نوع دوم که به سایش ثانویه معروف است، شامل سایش نگهدارنده‌های ابزارهای برشی و قطعاتی که به صورت غیرمستقیم با زمین درگیر هستند، می‌شود [15,16]. در جدول (۱) تقسیم‌بندی عوامل مؤثر بر سایش خاک در حفاری مکانیزه، بیان شده است.

در هر توده خاک، اندازه متنوعی از ذرات خاک موجود است. برای طبقه‌بندی مشخصات خاک، باید توزیع دانه‌بندی خاک معلوم باشد. منحنی دانه‌بندی خاک‌های درشت‌دانه را می‌توان با استفاده از آزمایش دانه‌بندی خشک با سری الک‌ها انجام داد. پارامترهای مهم منحنی دانه‌بندی خاک عبارتند از [18]:

- اندازه مؤثر (D_{10}): این پارامتر گویای قطر متناظری از نمودار دانه‌بندی خاک می‌باشد که ۱۰ درصد ذرات خاک مورد نظر از آن قطر کوچکترند.
- ضریب یکنواختی (C_u): نسبت D_{60} به D_{10} را ضریب یکنواختی گویند.
- ضریب دانه‌بندی یا انحنا (C_c): این فاکتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (1)$$

D_{30} و D_{60} قطرهای مربوط به ذراتی هستند که به ترتیب ۳۰ و ۶۰ درصد ذرات از آنها ریزترند.



شکل ۲ انواع جورشدگی در خاک

- جورشدگی: این پارامتر دانه‌بندی خاک، نشان‌دهنده میزان یکنواختی ذرات خاک از نظر شکل و اندازه می‌باشد (شکل ۲). جورشدگی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \quad (2)$$

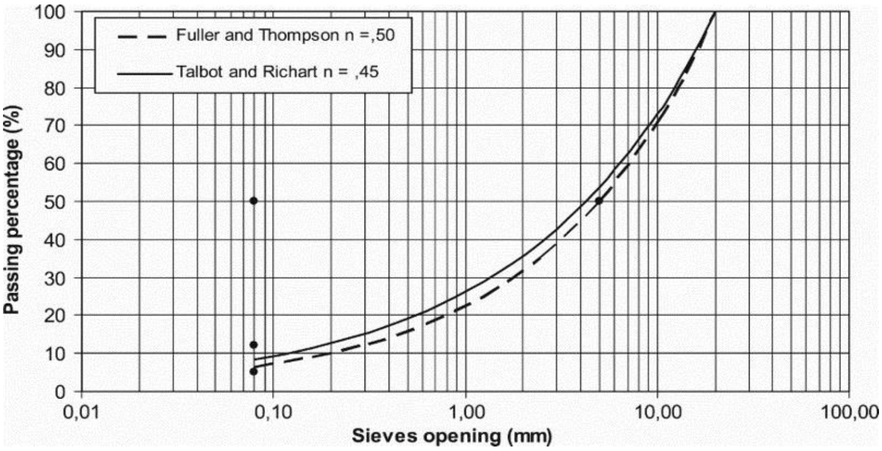
در این رابطه، S_0: جورشدگی، D_{75}: قطر متناظر با ۷۵ درصد عبوری ذرات و D_{25}: قطر متناظر با ۲۵ درصد عبوری ذرات خاک می‌باشد.

- اندازه مؤثر (ES): اندازه مؤثر از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$Eff\ size = 0.1\left(\frac{d_{min}+D_{10}}{2}\right) + 0.2\left(\frac{D_{10}+D_{30}}{2}\right) + 0.3\left(\frac{D_{30}+D_{60}}{2}\right) + 0.4\left(\frac{D_{60}+d_{max}}{2}\right) \quad (3)$$

که d_{min} و d_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر قطر ذرات ساینده هستند. یکای همه پارامترها بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

- منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی: منحنی حداکثر چگالی دانه‌بندی خاک برای اولین بار در بتن‌سازی به منظور به حداقل رساندن حفرات و فضاهای خالی در داخل ساختار خاک و صرفه‌جویی در مصرف سیمان مورد توجه قرار گرفت. فولر و تامپسون (۱۹۰۷)، معادله (٤) را برای تعیین حداکثر چگالی ارائه کردند [19]. بعدها توسط تالبوت و ریچارت (۱۹۲۳) نشان داده شد که معادله فولر و تامپسون، حداکثر چگالی را به دست نمی‌دهد. از این رو، تالبوت و ریچارت به جای توان ۰/۵ در معادله فولر و تامپسون، از یک فرم عمومی n استفاده کرده و معادله (۵) را ارائه کردند [20]. حداکثر چگالی در معادله تالبوت و ریچارت در $n = 0.45$، یک منحنی دانه‌بندی با حداقل ریزدانه را به دست می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳ دانه‌بندی خاک دارای حداکثر چگالی [21]

$$P_d = \left(\frac{d}{D_{MAX}}\right)^{0.5} \times 100 \quad (٤)$$

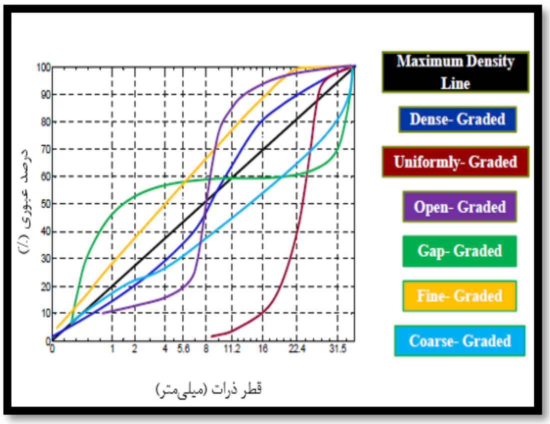
$$P_d = \left(\frac{d}{D_{MAX}}\right)^{n} \times 100 \quad (٥)$$

در روابط بالا، d قطرالک موردنظر، D_{MAX}: حداکثر قطر ذرات نمونه خاک، P_d: درصد عبوری از الک d و n ضریب تالبوت است.

در جدول (۲) نحوه دانه‌بندی خاک با فرمول تالبوت با $n =$ 0.45 تشریح شده است. همچنین در شکل (٤) انواع دانه‌بندی خاک، طبق معادله تالبوت بیان شده است.

جدول ۲ دانه‌بندی خاک با معادله تالبوت برای رسیدن به حداکثر چگالی

شماره الک (میلیمتر)	درصد عبوری (٪)
۱۹	$p = (19/19)^{0.45} \times 100 = 100$
۱۲/۵	$p = (12.5/19)^{0.45} \times 100 = 83.3$
۹/۵	$p = (9.5/19)^{0.45} \times 100 = 73.2$
۲	$p = (2/19)^{0.45} \times 100 = 36.3$
۰/۳	$p = (0.3/19)^{0.45} \times 100 = 15.4$
۰/۰۷۵	$p = (0.075/19)^{0.45} \times 100 = 8.2$



شکل ٤ انواع دانه‌بندی خاک‌ها

آزمون‌های ارزیابی سایندگی در خاک

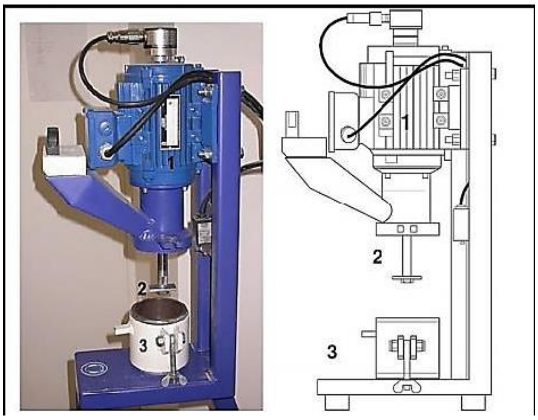
گستردگی عوامل مؤثر بر سایندگی، نیاز به انجام آزمایش‌های مختلف برای اندازه‌گیری دقیق میزان سایندگی را نشان می‌دهد. آزمون‌های محتوای کوارتز معادل، لس آنجلس، سایش دوری، میل بال نوردیک، NTNU (SAT)، LCPC، PSA و SGAT از جمله روش‌های ارزیابی سایندگی در خاک هستند.

آزمایش LCPC

آزمایش LCPC در دهه ۱۹۸۰ توسط مرکزی به همین نام در فرانسه ارائه شد. روش انجام این آزمایش در استاندارد فرانسوی AFNOR P18-579 (1990) آمده است [22]. دستگاه LCPC (شکل ۵)، یک موتور با توان ۷۵۰ وات دارد که بر روی شفت آن یک پروانه فولادی سوار است. جنس پروانه یا همان ابزار برش از فولاد آلیاژی با سختی ۶۰-۷۵ راکول بوده و ابعاد آن ۵×۲۵×۵۰ میلی‌متر می‌باشد. این پروانه در داخل یک مخزن استوانه‌ای که حاوی نمونه آزمایشی است، قرار می‌گیرد [10]. در این آزمایش، از ۵۰۰ گرم نمونه خشک شده در هوا با ابعاد ٤ الی ٦/۳ میلی‌متر استفاده می شود. داخل ظرف استوانه‌ای حاوی نمونه، پروانه فولادی به مدت پنج دقیقه با سرعت ٤۵۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. برای به دست آوردن میزان سایندگی نمونه، جرم تیغه، قبل و بعد از آزمون، اندازه‌گیری می‌شود. ضریب سایشی (LAC) از رابطه (٦) به دست می‌آید [7]:

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M} \quad (٦)$$

در رابطه (٦) m_0: جرم ابتدایی پروانه، m: جرم ثانویه پروانه بعد انجام آزمایش و M: جرم نمونه می‌باشد. ضریب LAC اغلب بر حسب گرم بر تن محاسبه می‌شود.



شکل ۵ دستگاه آزمون سایندگی LCPC، ۱) موتور الکتریکی، ۲) پروانه فولادی، ۳) مخزن استوانه‌ای [7]

رده‌بندی قابلیت سایندگی ابزار با نمونه خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC در جدول (۳) تشریح شده است [23]. مزیت این آزمایش، ارزان بودن و سریع بودن آن است در حالی که دارای محدودیت‌هایی می‌باشد از جمله عدم امکان بررسی تأثیر تراست دستگاه، بازه دانه‌بندی بسیار محدود، سرعت بسیار زیاد تیغه در این آزمایش که اثر ضربه را نسبت به واقعیت، بزرگ‌نمایی می‌کند.

جدول ۳ رده‌بندی سایندگی خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC [۲۳]

خاک	سنگ نمونه یا ترکیب خاک	پتانسیل سایش ابزار	توصیف سایندگی	مقدار LAC (gr/ton)
رس سیلتی و سیلت رس دار، ماسه کربناتی	چوب، زغال	خیلی کم	غیرساینده	۰ – ۵۰
	سیلتستون، گلسنگ، مارن	کم	خیلی کم	۵۰ –۱۰۰
شن غنی از کربنات	اسلیت، ماسه‌سنگ ریزدانه با میان لایه‌های رس، ولومیت، مرمر	متوسط	کم	۱۰۰ – ۲۵۰
ماسه غنی از کوارتز، شن غنی از کریستال و کوارتز، خاک‌های دانه‌ریز دارای کوارتز	سنگ آهک ماسه‌دار و ماسه‌سنگ، فیلیت و شیست (کم کوارتز)	بالا	متوسط	۲۵۰ – ۵۰۰
	ماسه‌سنگ کوارتزی، آندزیت، بازالت، میکا شیست، آمفیبولیت سست	خیلی بالا	بالا	۵۰۰ – ۱۲۵۰
دارای کوارتز یا شن کریستالی، سنگ ریزه	کوارتز رگه‌ای، کوارتزیت، گرانیت، دیوریت، سینیت، گنیس، اکلوژیت، آمفیبولیت	بی‌نهایت بالا	خیلی بالا	۱۲۵۰ – ۲۰۰۰

دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک به منظور شباهت هر چه بیشتر شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی و مکانیزم ماشین حفاری تونل، طراحی و ساخته شده است. از موارد کاربرد این دستگاه می‌توان به ارزیابی و بررسی میزان سایندگی نمونه‌های خاکی و سایش ابزارهای برش، اشاره نمود. از مزایای و ویژگی‌های انحصاری این دستگاه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دارای صفحه حفاری شبیه کله‌حفار TBM با آرایش ابزار برش‌های مرکزی، میانی و محیطی.
- نفوذ مداوم کله‌حفار و در نتیجه نفوذ ابزارهای برش به داخل خاک تازه و دست نخورده.
- قابلیت تنظیم سرعت چرخش صفحه حفار.
- امکان تنظیم سرعت نفوذ کله حفار در خاک.
- امکان تنظیم فشار پشت صفحه حفار توسط ورودی هوای فشرده.

اجزای مختلف دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک، شامل اینورتور، موتور، شفت و کلّه‌حفار، محفظه حفاری و کمپرسور هوا است (شکل ٦). در ادامه بخش‌های مختلف دستگاه تشریح می‌شود.

شکل ٦ نمای کلی دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

شکل ۷ دستگاه تنظیم سرعت چرخش کله‌حفار (اینورتر)

۱- اینورتر. به منظور تنظیم سرعت چرخش کله‌حفار درون مخزن، از یک دستگاه تنظیم سرعت چرخش کله‌حفار استفاده شده است. این دستگاه قابلیت تنظیم سرعت کله‌حفار از ۱۰ دور در دقیقه تا ۵۰۰ دور دقیقه را دارد (شکل ۷).

۲- کمپر سور هوا. برای تأمین هوای فشرده و بالا بردن فشار داخل محفظه حفاری دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک، از یک کمپرسور هوا، ساخت شرکت استرانگ و به حجم ۲۴ لیتر استفاده شده است (شکل ۸).

۳- موتور. دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک، شامل یک موتور، ساخت شرکت موتوژن با توان ۱/۵ کیلو وات بر روی پایه دریل ستونی ساخت ماشین‌سازی اردبیل، به منظور تأمین نیروی لازم جهت چرخش و نفوذ کله‌حفار به داخل نمونه خاک در درون محفظه فولادی می‌باشد (شکل ۹).

شکل ۸ کمپرسور هوای دستگاه جدید آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

شکل ۹ موتور دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

۴- شفت و کلّه‌حفار. جهت انتقال قدرت از سیستم تولید قدرت (موتور) به کلّه‌حفار از یک شفت به قطر ۱/۵ سانتی‌متر و طول ۲۷ سانتی‌متر، از جنس فولاد استفاده شده است. این شفت از سه قسمت دنباله گوه‌ای شکل جهت جایگیری در داخل دریل، بخش میانی با مقطع دایره‌ای ساده جهت لغزیدن داخل فلنجک و قسمت پیچی انتهایی جهت قرار گرفتن در کله‌حفار، تشکیل شده است (شکل ۱۰).

جهت حفاری داخل نمونه خاکی و همچنین تأمین فشار موردنیاز جهت متراکم نگه داشتن خاک، از یک کله‌حفار از جنس استیل با سختی بالا استفاده شده است. کله‌حفار دارای مقطع دایره‌ای به شعاع ٦ سانتی‌متر و به ضخامت ۱/۳ سانتی‌متر می‌با شد. کله‌حفار دارای سه ردیف (سه پروانه) سه سوراخه برای نصب ابزار برش (پین) است. نزدیک‌ترین سوراخ‌ها از مرکز کله‌حفار برای نصب ابزار برشی مرکزی، سوراخ‌های میانی برای نصب ابزار برشی میانی و سوراخ‌های کناری برای نصب ابزارهای برش محیطی استفاده می‌گردد. فاصله سوراخ‌ها از هم ۱/۵ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین، کله‌حفار دارای ٤٥ درصد بازشدگی برای هدایت خاک حفاری شده به پشت کله‌حفار است (شکل ۱۱).

شکل۱۰ شفت دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

شکل ۱۱ کله‌حفار دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک
سمت راست: نمای جلو همراه با سوراخ‌های محل نصب پین،
سمت چپ: نمای عقب

٥- محفظه حفاری. محفظه حفاری دستگاه از جنس فولاد به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده است. برای تحمل فشارهای بالا، ضخامت محفظه، زیاد انتخاب شده است. محفظه دارای ابعادی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و به شعاع ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱۲).

درپوش محفظه در قسمت بالای محفظه، توسط پیچ‌ها به بدنه محفظه متصل می‌شود. همچنین یک شیار بر روی درپوش در محل اتصال به بدنه طراحی شده است تا با جایگیری درزگیر در آن شیار، محفظه ایزوله گشته و از نشت هوای پرفشار تزریقی

به بیرون جلوگیری گردد. در مرکز درپوش، سوراخی، جهت عبور شفت از محل اتصال به دریل تا محل اتصال به کله‌حفار درون محفظه، طراحی شده است. در محل سوراخ یک فلنجک فولادی قرار داده شده است که داخل آن یک بوش از جنس برنجی تعبیه شده است. این فلنجک، هم به عنوان تکیه‌گاه برای شفت بوده و هم اجازه حرکت بالا و پایین را به شفت می‌دهد. بر روی درپوش، یک شیر ورودی هوای فشرده جهت تزریق هوای پرفشار توسط کمپرسور قرار گرفته است (شکل ۱۳).

ابزارهای برشی استفاده شده بر روی کله‌حفار در این پژوهش، ابتدا مفتول‌های ۳ متری بوده که برش داده شده و به قطعات با طول ۲ سانتی‌متری تبدیل شده و در نهایت با دستگاه رزوه ساز به پیچ تبدیل گشته و بر روی سوراخ‌های کله حفار بسته شدند (شکل ۱۴).

شکل ۱۲ محفظه حفاری دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

شکل ۱۳ نمای درپوش محفظه دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

شکل ۱۴ ابزارهای برشی مورد استفاده در دستگاه آزمایشگاهی سنجش سایش خاک

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

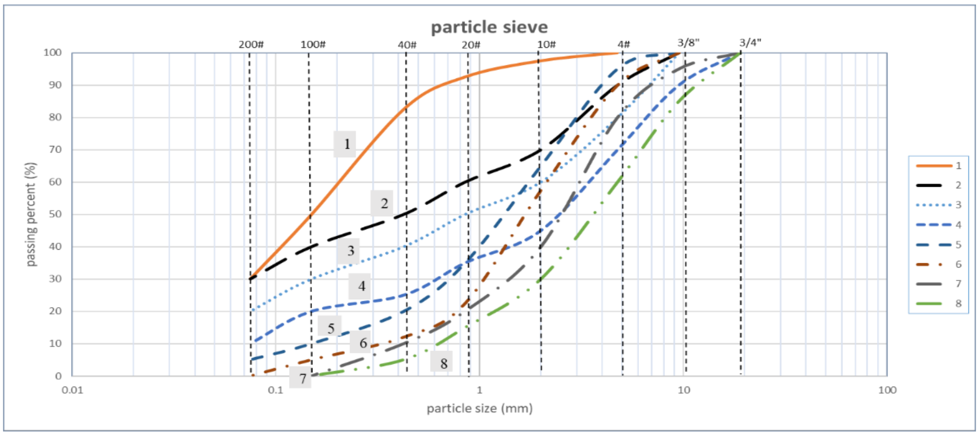
خاک موردنیاز جهت استفاده در آزمایش‌ها از غرب شهر تبریز، از محل گودبرداری ایستگاه پنج خط دوم متروی تبریز تأمین شده است. خط دوم متروی تبریز به طول حدود ۲۲/۴ کیلومتر، در حال حاضر طولانی‌ترین مسیر از شبکه ریلی کلان‌شهر تبریز است. این خط، شامل ۲۰ ایستگاه است که از محدوده زمین‌های قراملک تبریز شروع شده و نهایتاً در میدان بسیج خاتمه می‌یابد. در طرح توسعهٔ این خط، گذر از منطقه خاوران و اتصال به ایستگاه راه‌آهن تبریز- میانه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۵).

شکل ۱۵ نقشه مسیر خط ۲ متروی تبریز

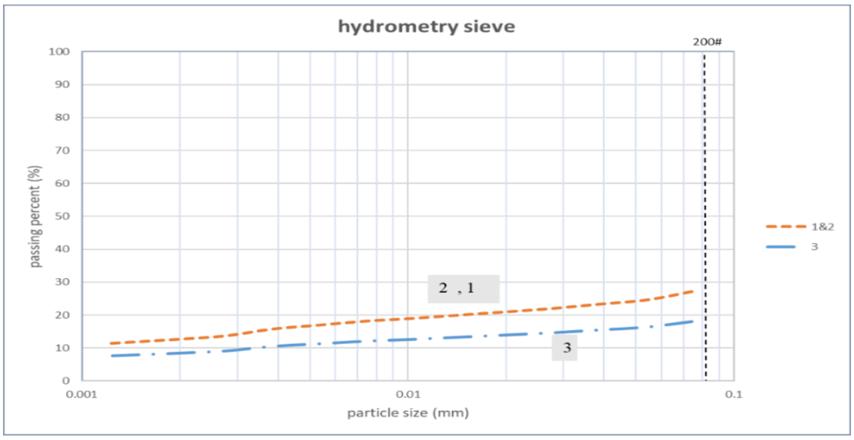
با توجه به مطالعات اکتشافی و زمین‌شناسی انجام شده (تا عمق ۳۰ متری) در این ناحیه، رسوبات از نوع آبرفتی ریزدانه رسی و سیلتی می‌باشد. در میان این رسوبات آبرفتی ریزدانه، لایه‌های ماسه‌ای هم وجود دارد، ولی اغلب مسیر تونل از داخل رسوبات آبرفتی ریزدانه می‌گذرد. پژوهش‌های انجام شده بر روی میزان سایندگی نمونه سنگ‌های مسیر تونل متروی تبریز، نشان می‌دهد که مقدار اندیس سایش سرشار (CAI) برای این سنگ‌ها در حدود ۲/۳ الی ۴/۷ می‌باشد. بر اساس رده‌بندی انجام شده توسط پلینینگر و همکاران، سنگ‌های مسیر تونل، اغلب در گروه خیلی ساینده قرار دارند، همچنین مقدار کانی‌های ساینده (کوارتز) در این سنگ‌ها بین ۵ تا ۲۰ درصد می‌باشد.

نمونه خاکی فراهم شده از محل مورد نظر، طبق استاندارد ASTM D 422-87 [24]، دانه‌بندی شد (شکل ١٦). دانه‌بندی بخش درشت‌دانه خاک به روش خشک با استفاده از سری الک-های استاندارد و دستگاه شیکر و دانه‌بندی بخش ریزدانه خاک با استفاده از روش هیدرومتری انجام شد. برای نشان دادن تأثیر نوع دانه‌بندی خاک بر مقدار سایش ابزارهای برش، ۸ نوع دانه‌بندی خاک انتخاب شد که در شکل (۱۷) نمودار بخش درشت دانه خاک‌ها و در شکل (۱۸) نمودار بخش ریزدانه خاک‌ها برای خاک‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است.

شکل ١٦ دانه‌بندی نمونه تهیه شده از محل مورد نظر



شکل ١٧ نمودار دانه‌بندی بخش درشت‌دانه نمونه‌های انتخاب شده برای انجام آزمایش سایش



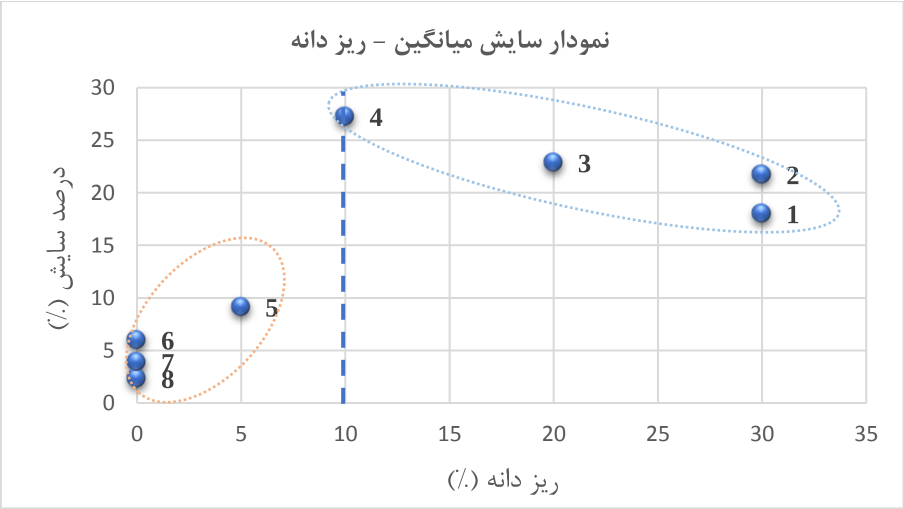
شکل ١٨ نمودار دانه‌بندی بخش ریزدانه نمونه‌های انتخاب شده برای انجام آزمایش سایش

انتخاب ۸ نوع دانه‌بندی خاص، با درصدهای مختلفی از ذرات ریز و درشت، برای بررسی تأثیر انواع خاک‌ها بر مقدار سایش ابزار برش می‌باشد. در خاک نوع ۱، ذرات ریزدانه ۳۰ درصد بوده و هدف از انتخاب این دانه‌بندی، به‌دست آوردن مقدار سایش ابزار در حضور حداکثری ریزدانه می‌با شد. اما به طور مثال در خاک نوع ۸ که درشت‌دانه‌ترین نوع خاک در این تحقیق است، ذرات ریزدانه حضور ندارند و هدف، بررسی سایش در خاک‌های صرفاً درشت‌دانه بدون حضور ریزدانه است. برای بررسی تأثیر هر کدام از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر روی سایش ابزار بر شی، مقادیر D_{10}، CU، CC، مقدار ریزدانه و درشت‌دانه، جورشدگی و ES تعیین شدند (جدول ٤).

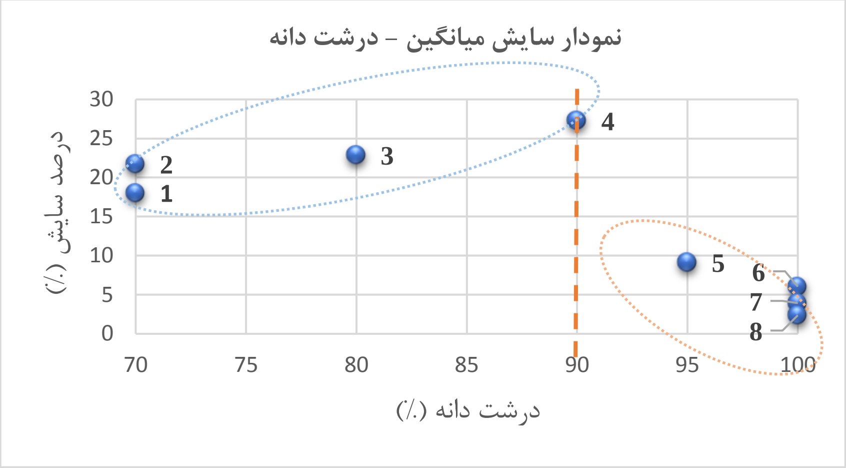
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای دانه‌بندی خاک بر روی میزان سایش ابزارهای برشی، آزمایش‌های سایش در ۸ دانه‌بندی مختلف خاک انجام شد و نمودارهای تغییرات میانگین درصدی سایش و همچنین میانگین وزنی سایش اتفاق افتاده روی ابزارهای برشی کله‌حفار بر حسب تغییرات هر کدام از پارامترها ترسیم شدند. در این آزمایش‌ها، مقدار رطوبت خاک‌ها، ۵ درصد، چگالی خاک مرطوب ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، سرعت چرخش کله‌حفار ٦۰ دور در دقیقه، سرعت نفوذ کله‌حفار در خاک ۲/۵ میلی‌متر در دقیقه و زمان آزمایش ٤۰ دقیقه می‌باشد.

جدول ٤ مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی انواع دانه‌بندی‌های بررسی شده

خاک	شن (٪)	ماسه (٪)	سیلت و رس (٪)	D_{10} (mm)	ES (mm)	Cc	Cu	جورشدگی	USCS
۱	۰	۷۰	۳۰	۰/۰۰۱۲	۰/٦۹۱	۲۲/٦٥	۱۷۲/٥	۲/٤۱	SM
۲	۱۰	٦۰	۳۰	۰/۰۰۱۲	۱/٦۷٦	٥/٥۱	۷۰۸/۳	٦/٦	SM
۳	۲۰	٦۰	۲۰	۰/۰۰۳۸	۲/۱۸	۲/۹٦	٥۲٦/۳	٦/۲٤	SM
٤	۳۰	٦۰	۱۰	۰/۰۷٥	۳/۹٤	۱/٤۳۳	٤٤/۸	۳/٦۲	SW-SM
٥	٥	۹۰	٥	۰/۱٥	۲/٤۷٥	۱/۷۳	۱۱/٥۳	۲/۰۳	SW
٦	۱۰	۹۰	۰	۰/۳۱٦	۲/۹۳٤	۱/٥٤	٦/۷٦	۱/۸۸	SW
۷	۲۰	۸۰	۰	۰/٤۳	٥/۲۳٥	۱/۲۷٦	۷/۱٦	۱/٦۳	SW
۸	٤۰	٦۰	۰	۰/٦	٦/۰٤	۱/٤۰۳	۷/۹۲	۲/۰۳	SW



شکل ۱۹ تأثیر ریزدانه بر درصد سایش میانگین ابزارهای برشی



شکل ۲۰ تأثیر درشت‌دانه بر درصد سایش میانگین ابزارهای برشی

تأثیر مقدار ریزدانه و درشت‌دانه دانه‌بندی خاک بر سایش ابزار برش

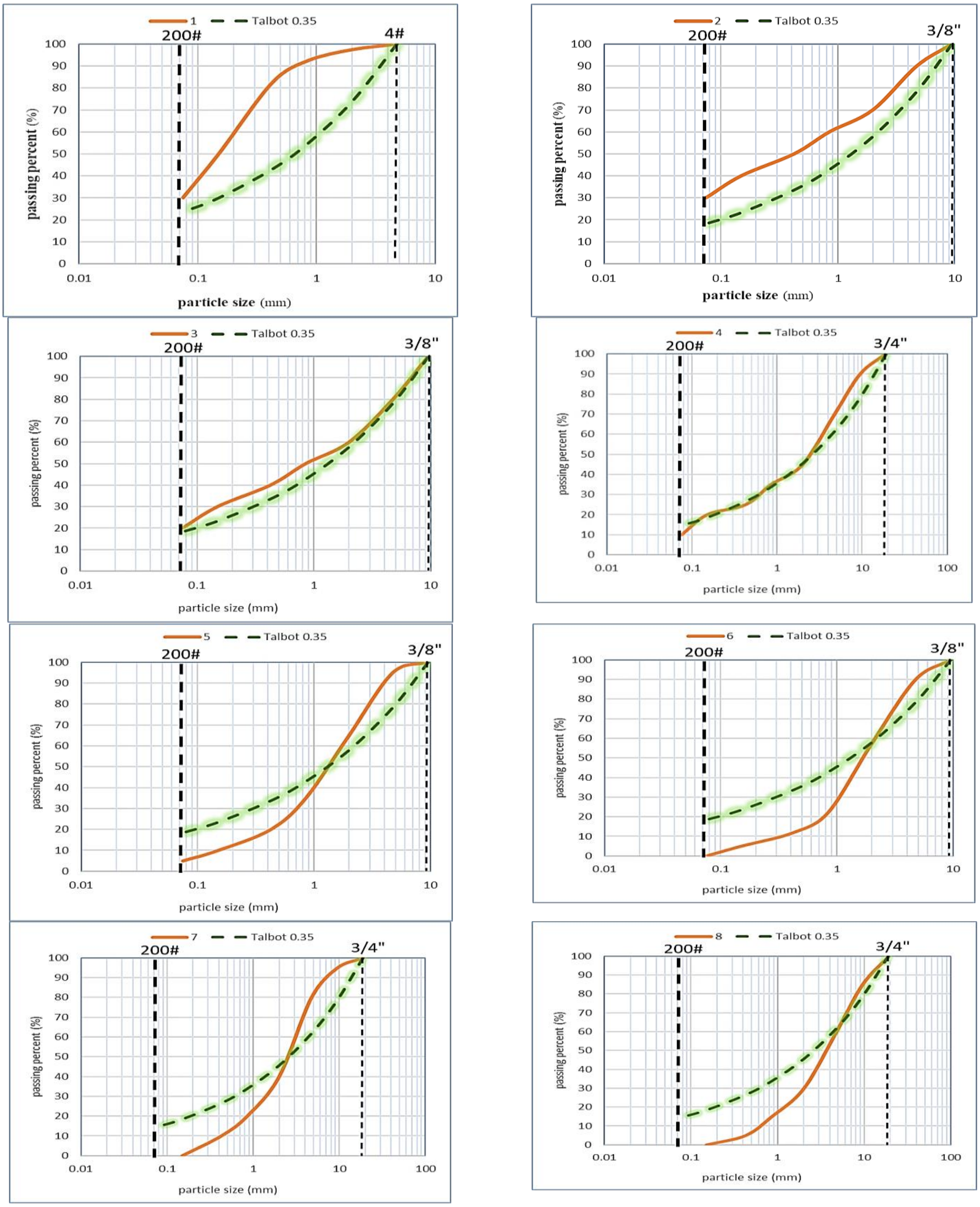
بررسی نمودارهای تأثیر ریزدانه بر میزان سایش ابزار برشی نشان می‌دهد که در نبود ریزدانه، مقدار سایش‌ها خیلی ناچیز و نزدیک صفر می‌باشد (شکل ۱۹). با افزایش اندک درصد ریزدانه در ترکیب خاک‌ها، مقدار سایش‌ها با شیب زیادی افزایش می‌یابد، طوری که در مقدار ریزدانه ۱۰ درصد به حداکثر سایش ابزارهای برشی می‌رسیم. بعد از این نقطه، با افزایش مقدار ریزدانه، مقدار سایش‌ها با شیب کم کاهش پیدا می‌کند. دلیل این نوع رفتار را این‌طور می‌توان بیان کرد که برای منسجم نگه داشتن ذرات درشت دانه یک نوع خاک در کنار هم، یک مقدار ریزدانه حداقلی لازم است تا این ذرات به راحتی در مقابل برخورد با ابزارهای برشی، قابلیت حرکت نداشته باشند. به عبارت دیگر این‌طور می‌توان بیان کرد که نقش ریزدانه در میزان سایش به صورت غیرمستقیم است.

با مشاهده نتایج مربوط به تأثیر دانه‌درشت‌ها بر میزان سایش میانگین می‌توان به این مهم دست یافت که با افزایش دانه‌درشت‌ها از ۷۰ درصد به ۹۰ درصد در ترکیب خاک، میزان سایش‌ها با شیب کم افزایش یافته است اما از درشت‌دانه ۹۰ درصد، کاهش شدید در میزان سایش‌ها مشاهده می‌گردد (شکل ۲۰). دلیل این رفتار را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش درشت‌دانه‌ها در خاک، از ۷۰ درصد به ۹۰ درصد، از میزان ذرات ریزدانه با درجه ساینده‌گی کم، کاسته شده و بر میزان ذرات درشت‌دانه با درجه ساینده‌گی زیاد، افزوده می‌شود، در نتیجه سایش‌ها در حد کم افزایش می‌یابد. ولی از مقدار درشت‌دانه ۹۰ درصد به بعد، با افزایش درشت‌دانه‌ها، مقدار ریزدانه‌های لازم برای استحکام بخشیدن و یکپارچه ساختن ساختار خاک، کاسته می‌شود. در نتیجه ذرات درشت‌دانه با اعمال اندک نیرو توسط ابزارهای برشی، جابه‌جا شده و از ساختار خاک جدا می‌شوند و در نهایت بایستی شاهد کاهش چشمگیر سایش‌ها بود.

مقایسه مقادیر سایش ابزارهای برشی با استفاده از نمودار تالبوت

برای بررسی بیشتر نتایج به دست آمده، نمودارهای ۸ نوع دانه‌بندی خاک با نمودار دانه‌بندی تالبوت در $n = 0.35$ (دانه-بندی خاک با حداکثر چگالی یا پکینگ)، مقایسه شد (شکل ۲۱). نتایج حاصل نشان می‌دهد، از دانه‌بندی ۱ تا ٤، در قسمت بالای نمودار تالبوت، با نزدیک شدن نمودار دانه‌بندی خاک به نمودار حداکثر چگالی، مقدار سایش میانگین با شیب کم، افزایش می-یابد. علت این موضوع آن است که با نزدیک شدن به چگال‌ترین حالت دانه‌بندی خاک، تمامی فضاهای خالی بین ذرات درشت‌تر، توسط ذرات ریزتر، رفته رفته به‌طور کامل پرشده و پوشش داده می‌شود و در نتیجه ذرات در هم گیر کرده و ذرات درشت ساینده در هنگام برخورد با ابزار برش، حداکثر مقاومت را در برابر حرکت و جدا شدن از ساختار اصلی خاک، از خود نشان می‌دهند و باعث افزایش سایش‌ها می‌شوند. لازم به ذکر است که در طی این روند به تدریج از مقدار ریزدانه کاسته شده و بر میزان درشت‌دانه افزوده می‌شود. این روند تا میزان ریزدانه ۱۰ درصد در ترکیب خاک ادامه دارد. از دانه‌بندی ٤ به بعد، نمودارهای دانه‌بندی به سمت پایین نمودار حداکثر چگالی حرکت کرده و در واقع رفته رفته ذرات ریزدانه‌ای که در میان ذرات درشت‌تر قرار گرفته و فضای بین آنها را به طور پیوسته پر می‌کردند، حذف

شده و جای خود را به ذرات درشت‌دانه می‌دهند که هم قطرشان افزایش یافته و هم مقدارشان زیاد شده است. در نتیجه، فضاهای بین ذرات، خالی مانده و این فضاهای خالی رفته رفته افزایش یافته و در نهایت خاکی با ساختار شل به دست خواهد آمد. در این شرایط با کوچک‌ترین اعمال نیرو از طرف ابزار برشی به دانه‌درشت‌ها یا ذرات ساینده، ساختار خاک از هم پاشیده و ذرات به راحتی از هم جدا می‌شوند، به طوری که سایش ابزارهای برشی به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱ نمودار دانه‌بندی خاک‌های ۱ تا ۸ در مقایسه با نمودار تالبوت

با ا ستفاده از نمودار دانه‌بندی خاک ۵ و نمودار شکل (۱۹) می‌توان به این نکته پی برد که در صد ریزدانه تقریباً ۱۰ در صد، یک نقطه بحرانی برای ترکیب هر خاک می‌با شد. یعنی با کاهش مقدار ریزدانه از این نقطه به بعد، ساختار خاک، متزلزل و شل شده و در نتیجه سایش‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند. همچنین توجه به این نکته نیز مهم است که با افزایش مقدار ریزدانه از ۱۰ درصد به بالا، مقدار سایش‌ها، با شیب خیلی کم کاهش می‌یابد.

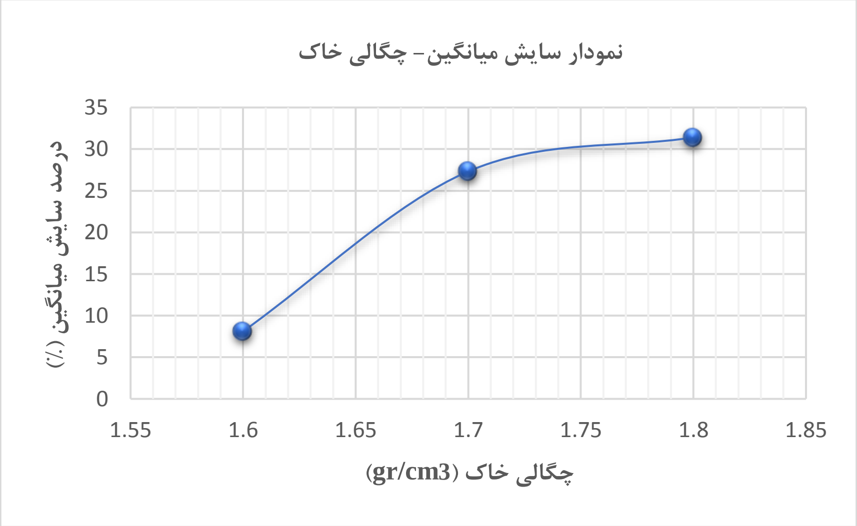
مقایسه میزان سایش ابزارهای برشی با نمودار دانه‌بندی تالبوت نشان می‌دهد که حداکثر سایش‌ها در حالت دانه‌بندی منطبق بر نمودار تالبوت اتفاق می‌افتد. همچنین در نمودار دانه‌بندی‌هایی که موازی با این دانه‌بندی و در سمت بالای نمودار قرار دارند به ترتیب از نزدیک به دور، سایش‌ها با شیب کم کاهش می‌یابند. اما اگر نمودار دانه‌بندی، یا به‌طور کامل یا بخ شی، در زیر نمودار تالبوت قرار گیرد، در این صورت مقدار سایش‌ها به شدت و با شیب زیاد کاهش می‌یابد. این روند در نمودار خاک‌های ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود.

تأثیر چگالی خاک بر مقدار سایش ابزارهای برشی

برای بررسی تأثیر چگالی خاک بر سایش ابزارهای برش، خاک نوع ٤، انتخاب شد و آزمایش‌هایی با چگالی ۱/٦، ۱/۷و ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، طراحی و انجام شد. شرایط این سری آزمایش‌ها شامل سرعت متوسط چرخش کله‌حفار ٦۰ دور بر دقیقه، سرعت متوسط نفوذ کله‌حفار ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه، زمان انجام آزمایش ٤۰ دقیقه و رطوبت خاک ۵ درصد می‌باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با افزایش چگالی خاک، میزان سایش ابزارهای برشی افزایش می‌یابد (جدول ۵ و شکل ۲۲).

جدول ۵ تأثیر چگالی خاک بر مقدار سایش ابزارهای برشی

چگالی خاک ($\frac{gr}{cm^3}$)	نوع ابزار	وزن اولیه (gr)	وزن ثانویه (gr)	وزن اتلافی (gr)	سایش (٪)
۱/٦	مرکزی	۱/۳۲۰	۱/۳۱۸	۰/۰۰۲	۰/۱۵
	میانی	۱/٤۳٤	۱/٤۲۹	۰/۰۰۵	۰/۳۵
	محیطی	۱/۳۵	۱/۲۹۲	۰/۰۵	٤/۳
۱/۷	مرکزی	۱/۳۵۱	۱/۳۱۱	۰/۰٤	۲/۹٦
	میانی	۱/۳۹۹	۱/۲۳	۰/۱٦۹	۱۲
	محیطی	۱/٤۲	۰/٤٦۵	۰/۹۵۵	٦۷
۱/۸	مرکزی	۱/۳۱۸	۱/۲٦۳	۰/۰۵۵	٤/۲
	میانی	۱/٤۲۹	۱/۲	۰/۲۲۹	۱٦
	محیطی	۱/۱۳۸	۰/۲۹٦	۱/۰٤۲	۷٤



شکل ۲۲ تأثیر چگالی خاک بر درصد سایش میانگین ابزارهای برشی

با افزایش میزان تراکم خاک و در نتیجه افزایش چگالی خاک، تخلخل نسبی خاک، کاهش یافته و ابزار برشی نصب شده بر روی کله‌حفار در طی یک دور چرخش با ذرات بیشتری از خاک برخورد نموده و در عمل باعث افزایش میانگین سایش در ابزارهای برشی می‌گردد. همچنین، با افزایش تراکم خاک، فضای بین ذرات خاک کاهش یافته و قابلیت تحرک ذرات محدود می-شود و در نتیجه موجب افزایش درصد سایش ابزارهای برشی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

با وجود طیف گسترده‌ای از روش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری سایش خاک، تاکنون روش استاندارد و جامعی برای اندازه‌گیری سایش خاک ارائه نشده است. بنابراین، به منظور بررسی تأثیر برخی از محدودیت‌ها و پارامترهای مؤثر، در این پژوهش، دستگاهی برای انجام آزمایش سایش خاک و بررسی تأثیر پارامترهای دانه‌بندی خاک بر ابزار برش ساخته شد. در این راستا، تأثیر مقدار ریزدانه و درشت دانه دانه‌بندی خاک بر سایش ابزار برش بررسی شد. همچنین، مقادیر سایش ابزارهای برشی در دانه‌بندی‌های مختلف خاک، با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک با حداکثر چگالی (نمودار تالبوت) با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد:

۱. در نبود ریزدانه، مقدار سایش‌ها ناچیز و نزدیک صفر می‌باشد. با افزایش اندک درصد ریزدانه در ترکیب خاک‌ها، مقدار سایش با شیب شدیدی افزایش می‌یابد، طوری که در مقدار ریزدانه ۱۰ درصد به حداکثر سایش ابزارهای برشی با مقدار ۲۷/۳ درصد می‌رسد. بعد از این نقطه با افزایش مقدار ریزدانه، مقدار سایش‌ها با شیب کم کاهش پیدا می‌کند.

۲. با افزایش دانه‌درشت‌ها از ۷۰ درصد به ۹۰ درصد در ترکیب خاک، میزان سایش‌ها با شیب کم از ۱۸/۰۶ درصد تا ۲۷/۳ درصد افزایش یافته است اما از درشت‌دانه ۹۰ درصد، کاهش شدید در میزان سایش‌ها مشاهده می‌گردد.

۳. بیشترین مقادیر سایش ابزارهای برشی در خاک‌های با دانه-بندی منطبق بر دانه‌بندی به دست آمده از معادله تالبوت اتفاق می‌افتد. به هر میزان که نمودار دانه‌بندی خاک موردنظر از نمودار تالبوت فاصله می‌گیرد، سایش‌ها کاهش می‌یابند. خاک‌هایی که نمودار دانه‌بندی آنها نسبت به نمودار تالبوت دارای انحراف بوده و در قسمت بالای آن قرار دارند، سایش آنها با شیب کمتری، کاهش می‌یابد. ولی خاک‌هایی که نمودار دانه‌بندی آنها نسبت به نمودار تالبوت دارای انحراف بوده و در قسمت پایین آن قرار دارند، سایش آنها با شیب بیشتری، کاهش می‌یابد.

٤. با افزایش چگالی خاک از ۱/٦ تا ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد سایش میانگین ابزار برشی از ۸/۱ درصد به ۳۱/٤ درصد افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که با افزایش چگالی خاک، فضای بین ذرات در ساختار خاک کاهش می‌یابد و در هر بار چرخش، کله‌حفار به تعداد ذرات خاک بیشتری برخورد کرده و موجب افزایش میزان سایش می‌شود.

مراجع

[1] A. H. Rezaie Farie, and A. A. Ehterami, “Study of mechanized tunnel boring machines performance in urban areas,” *New Approaches in Civil Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 14-30, 2018.

[2] G. Barzegari, and A. Uromeihy, “Study of soil abrasivity impact on TBM tunnelling efficiency at the Tabriz metro L1,” *Journal of Mining Engineering*, vol. 10, no. 29, pp. 67-79, 2016, (In Persian).

[3] G. Barzegari, A. Uromeihy, and J. Zhao, “Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 48, pp. 43-57, 2015.

[4] K. Thuro, J. Singer, H. Käsling, and M. Bauer, “Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device,” Felsbau, vol. 24, no. 6, pp. 37-45, 2006.

[5] K. Thuro, and R. Plinninger, “Hard Rock Tunnel Boring, Cutting, Drilling and Blasting: Rock Parameters For Excavatability,” In 10th ISRM Congress, (2003).

[6] R. J. Plinninger, “Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein,” 2002.

[7] K. Thuro, J. Singer, H. Kasling, and M. Bauer, “Determining Abrasivity With The LCPC Test,” In 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, (2007).

[8] P. Drucker, “Validity of the LCPC abrasivity coefficient through the example of a recent Danube gravel/Aussagekraft des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten am Beispiel eines rezenten Donauschotters,” *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 4, no. 6, pp. 681-691, 2011.

[9] H. Hashemnejad, M. Ghafoori, G. R. Lashkaripour, and S. T. Azali, “Effect of geological parameters on soil abrasivity using LCPC machine for predicting LAC,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 12, pp. 71-76, 2012.

[10] S. Kahraman, M. Fener, H. Käsling, and K. Thuro, “The influences of textural parameters of grains on the LCPC abrasivity of coarse-grained igneous rocks,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 58, pp. 216-223, 2016.

[11] J. Küpferle, A. Röttger, W. Theisen, and M. Alber, “The RUB tunneling device- A newly developed test method to analyze and determine the wear of excavation tools in soils,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 59, pp. 1-6, 2016.

[12] P. D. Jakobsen, M. T. Hamzaban, and N. Rish Sefid Mohammadi, “The effect of the particle size distribution curve on the abrasivity of non-cohesive soils in LCPC test,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 105, 2020.

[13] H. Lee, D. Kim, D. Shin, J. Oh, and H. Choi, “Effect of foam conditioning on performance of EPB shield tunnelling through laboratory excavation test,” *Transportation Geotechnics*, vol. 32, 2022.

[14] Z. Chen, A. Bezuijen, Y. Fang, K. Wang, and R. Deng, “Experimental study and field validation on soil clogging of EPB shields in completely decomposed granite,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 120, 2022.

[15] J. Küpferle, et al., “Influence of the slurry-stabilized tunnel face on shield TBM tool wear regarding the soil mechanical changes–Experimental evidence of changes in the tribological system,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 74, pp. 206-216, 2018.

[16] J. Düllmann, *Ingenieurgeologische untersuchungen zur optimierung von Leistungs-und verschleißprognosen bei hydroschildvortrieben im lockergestein*. Ruhr-Universität Bochum, 2014.

[17] G. Barzegari, and A. Uromeihy, “Evaluation of soil abrasiveness in mechanized tunneling with special attitude to the Tabriz metro line1,” *Engineering Geology*, vol. 5, no. 1, pp. 41-58, 2012, (In Persian).

[18] B. M. Das, and K. Sobhan, Eds., *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 2017.

[19] W. B. Fuller, and S. E., Thompson, “The laws of proportioning concrete,” *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 59, no. 2, pp. 67-143, 1907.

[20] A. N. Talbot, H. A. Brown, and F. E. Richart, “The strength of concrete: its relation to the cement aggregates and water,” University of Illinois, no. 137-138, 1923.

[21] B. Martineau, “Formulation of a general gradation curve and its transformation to equivalent sigmoid form to represent grain size distribution,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, no. 1, pp. 199-207, 2017.

[22] AFNOR P18-579, *Aggregates. Abrasiveness and grindability test /Essai d’ abrasivite’ et de broyabilite*. Association Francaise de Normalisation, 1990.

[23] E. A. Gharahbagh, J. Rostami, and A. Palomino, “New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 604-613, 2011.

[24] ASTM D422-63, *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International, West Conshohocken: PA, 2007.

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Backward Solution (In-Time) of the Pollution Transport Equation in River Using Group Preserving Scheme

Research Article

Amir Mohammad Saadat[1], Mehdi Mazaheri[2], Jamal Mohammad Vali Samani[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77645.1165

1. Introduction

The inverse method is an effective method for detecting the intensity and source of pollutants. The identification of contaminant sources has become increasingly important in recent decades due to the importance of protecting water resources. This study aimed to reconstruct the concentration function of contaminants. Using the inverse solution method, problems are solved in reverse time steps and a general equation is obtained that can solve ordinary differential equations. The return response of this equation prevents the data from diverging. Three examples are presented in this study to demonstrate the accuracy of forward and backward group preserving schemes. No study has been conducted so far regarding the method for identifying the intensity function of a contaminant source in surface water by using a backward group preserving scheme (BGPS). Based on the research done to date, the inverse solution of the pollutant transport equation in a river with variable coefficients has been considered. Our research involves solving the advection-dispersion equation in one dimension and identifying the intensity function of the contaminant source in the river using a group-preserving scheme.

2. Materials and methods

This study addresses the direct and inverse problems of the transport equation in the river through the use of the group preserving scheme (GPS), which is based on the Lee group. Through this method, the advection-dispersion equation was solved directly and inversely. By knowing the initial condition or boundary condition downstream, the direct procedure can be calculated. The inverse model works backward from the terminal condition, calculating the river's concentration in the initial stage. Due to the lack of actual data, in this study, the direct solution of the pollution transport equation is used to obtain the terminal condition. The one-dimensional advection-dispersion equation is as follows:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = -\frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(AD\frac{\partial C}{\partial x}\right) - AkC + AS \qquad (1)$$

where C is the pollutant concentration, A is the flow sectional area, Q is the discharge, D is the longitudinal dispersion coefficient, t is the time, x is the longitudinal space coordinate, k is the first order decay coefficient, and S is the source term.

In Figure 1, a null cone shows the solution domain in Minkowski space. The dynamical system is clearly constrained by its form. It can be said that this figure shows the solution range of river concentrations in Minkowski space.

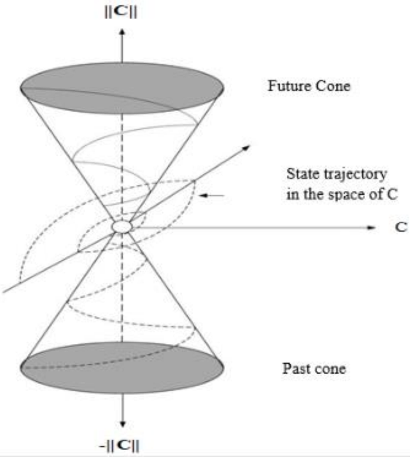


Figure 1. Cone condition and Minkowski space

3. Results and discussion

In order to solve the pollution transfer equation directly and inversely, two equations are obtained using the method of lines and GPS.

*Manuscript received: July 11, 2022, Revised, September 7, 2022, Accepted, November 15, 2022.

[1]. MSc Student, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[2]. Corresponding author. Associate Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. **Email**: m.mazaheri@modares.ac.ir.

[3] Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

A forward and backward group preserving scheme was evaluated through three examples. These three examples demonstrate the accuracy of this method. To solve the pollution transfer equation with variable coefficients, the flow parameters must be calculated first. These parameters are obtained by solving the flow equations and using existing models. Based on real-world examples, flow parameters, depth, speed, flow area, and other parameters have been calculated using flow calculation models in different parts of the river. Dispersion coefficients can also be determined in different ways. The empirical formulas were applied in this study.

In the first example, the goal was to evaluate the direct method. In this way, the finite difference method was used to verify the GPS validity after running the model with boundary conditions, demonstrating its high compatibility. A variety of statistical indicators were used to evaluate the model. The very low MAE, RMSE, and MRE values, along with an R^2 value close to 1, indicate high accuracy and the full ratio between this method and fully implicit finite difference methods. Table 1 shows the results.

Table 1. Statistical indexes of the first example

index	value
MAE(kg/m^3)	0.05
R^2(%)	99.997
RMSE(kg/m^3)	0.02
MRE(%)	0.23

An investigation of the application of the BGPS using spatial profile is presented in the second example. As part of the solution algorithm, the spatial profile is used as the input to the direct model. Direct model results are used as inputs to inverse models. When reconstructing the pollutant intensity function, the inverse model is evaluated. The input data of the inverse model (spatial profile) were subjected to 5% to 15% of errors completely randomly so that the impacts of these errors can be observed. In this example, the MAE, RMSE, and MRE statistical indices have small values that demonstrate the superior accuracy of inverse methods. The high value of R^2 indicates that the two methods match well, and even these values show acceptable results when errors are included. Despite errors, the pollutant pattern is well reconstructed, and very acceptable results are obtained. Table 2 shows the related results.

Table 2. Statistical indexes of the second example

error/ index	error 0%	error 5%	error 10%	error 15%
MAE(kg/m^3)	0.19	0.38	0.59	0.77
R^2(%)	99.62	97.01	95.89	94.04
RMSE(kg/m^3)	0.08	0.17	0.25	0.39
MRE(%)	3.54	6.39	8.75	12.56

As an example of the third model, the inputs to the direct model are time series. The results from the direct model are used as inputs to the inverse model. The purpose of evaluating the inverse model is to reconstruct the pollutant intensity function. A random error of 5 to 15 percent was applied to the input data in this example. The MAE, RMSE, and MRE statistical indicators in this example have small values, demonstrating the high accuracy of the inverse method. The high R^2 value shows good compatibility between the two methods. The increase in MAE, RMSE, and MRE as well as the decrease in R^2 demonstrate that the accuracy of inverse model has decreased due to increase in error applied to the initial condition. Table 3 shows the results.

Table 3. Statistical indexes of the third example

error/ index	error 0%	error 5%	error 10%	error 15%
MAE(kg/m^3)	0.26	0.56	0.73	0.91
R^2(%)	99.22	95.14	94.81	92.09
RMSE(kg/m^3)	0.11	0.24	0.31	0.45
MRE(%)	4.6	8.2	10.2	14.3

4. Conclusion

These examples demonstrate the high accuracy of the BGPS plan in forming the pollution intensity function and reconstructing the spatial profile. The model is also capable of showing the spatial profile of the concentration at different times. This is very useful for observing the evolution and spatial changes of the concentration distribution over time. Unlike other methods, this method does not have problems such as selecting and optimizing stability terms due to its numerical nature, which increases its speed and reduces errors. Moreover, this method has the advantage that there is no need to prepare data at a small number of intervals along the river. This is considered an extremely valuable benefit due to its complexity. The fast speed and accuracy of this model, as well as the simplicity of calculations, enable it to save time. As a limitation of this method, it is not possible to reconstruct time series data.

مهندسی عمران فردوسی،۳۵، ٤، ۱٤۰۱. (۳۵ -٥۲)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

حل معکوس (در زمان) معادله انتقال آلودگی در رودخانه با استفاده از طرح حافظ گروه*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77645.1165

امیر محمد سعادت(۱) مهدی مظاهری(۲) جمال محمدولی سامانی(۳)

چکیده امروزه بسیاری از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در اثر ورود پساب‌های ناشی از مواد مختلف در معرض آلودگی قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه اکثر روش‌ها جهت بازیابی تابع شدت آلودگی برای آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است، ارائه روشی جهت بازیابی تابع شدت آلاینده در رودخانه‌ها با شرایط جریان پیچیده‌تر می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش هدف محاسبه تابع شدت منبع آلاینده بوده که بر اساس تحقیقات صورت گرفته تاکنون این مسئله با استفاده از راه‌حل عددی طرح حافظ گروه مورد مطالعه قرار نگرفته است. طرح حافظ گروه روشی دقیق برای حل مسائل بدخیم است که در این نوشتار با استفاده از این روش، معادله یک‌بعدی جابه‌جایی-پراکندگی با ضرایب متغیر حل شده است. اساس روش حل معکوس ارائه شده به این صورت است که با حل سیستم های دینامیکی در گام‌های زمان‌های منفی، یک معادله کلی حاصل می‌شود که قادر به حل معادلات دیفرانسیل معمولی خواهد بود. پاسخ‌های برگشتی این معادله را به همگرایی لازم می‌رساند و از واگرا شدن داده‌ها جلوگیری می‌نماید. در این پژوهش سه مثال جهت نشان دادن دقت طرح مستقیم و معکوس حافظ گروه ارائه شده است. ابتدا با استفاده از حل مستقیم مقدار غلظت آلاینده در رودخانه با ضرایب متغیر محاسبه شده است و به‌منظور صحت‌سنجی حل مستقیم از حل عددی تمام ضمنی تفاضل محدود استفاده شده است. مقایسه نتایج این دو روش با شاخص‌های آماری، انطباق این دو مدل در روش مستقیم را نشان می‌دهد. در گام بعد با دو مثال مختلف با استفاده از حل طرح معکوس حافظ گروه به شبیه‌سازی تابع شدت آلاینده در بالادست رودخانه پرداخته می‌شود و پس از شبیه‌سازی و صحت‌سنجی مدل معکوس با حل مستقیم، ارزیابی این روش با استفاده از شاخص‌های آماری انجام می‌شود که نتایج دقت خوب این روش را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی حل عددی، روش معکوس، طرح معکوس حافظ گروه، معادله جابه‌جایی- پراکندگی، روش عددی خطوط.

Backward Solution (in-time) of the Pollution Transport Equation in River Using Group Preserving Scheme

Amir Mohammad Saadat Mehdi Mazaheri Jamal Mohammad Vali Samani

Abstract *Today, most of the surface water and groundwater resources are exposed to contamination by different materials sewage. because most of the methods have been used to restore the pollution intensity function for groundwater, representing a method to restore pollution intensity function in rivers with more complex flow conditions is considerable. this research aim is to calculate the intensity function of the contamination source, by the numerical solution of group preserving scheme, which has not been observed in other researches done so far. Group preserving scheme is an accurate method to solve ill-posed problems. By implementing this method the one-dimensional advection-dispersion equation with variable coefficients has been solved. The principle of the introduced backward solution method is that by solving the dynamic systems in negative time steps, a general equation will be obtained, which can solve ordinary differential equations. The responses of this equation will lead to convergence of the equation and prevent the divergence of the data. three examples have been presented to show the accuracy of the forward and backward group preserving scheme, Firstly, using direct solutions of the river, the intensity of pollution concentration in the river is calculated, and the implicit finite difference method is applied to verify the accuracy of the direct solutions. In the direct method, the results of the two models were compared with statistical indexes in order to demonstrate the conformity of the two models. In the next step, by solving the backward group preserving scheme in two different examples, the concentration of pollutants upstream is simulated. Following the simulation and verification of the inverse model by direct solution, statistical indexes are used to evaluate the effectiveness of this method.*

Keywords Numerical Solution, Reverse Method, Backward Group Preserving Scheme, Advection-dispersion Equation, Numerical Method of Lines.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/٤/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۸/۲٤ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(۳) استاد، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Email: m.mazaheri@modares.ac.ir

مقدمه

امروزه آلودگی آب‌های سطحی یکی از بزرگترین معضلات زندگی انسان و از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی است که برخلاف اهمیت آن در معرض انواع آلودگی‌های شیمیایی و بیولوژیک قرار دارد. باوجود قوانین و مقررات برای جلوگیری از تخلیه غیرمجاز پساب‌های ناشی از صنایع و کشاورزی، بازهم جلوگیری از این اتفاق امکان‌پذیر نیست، ازاین‌رو شناخت مکان و زمان تخلیه آلودگی در کمترین زمان و کمترین هزینه موردتوجه محققان این بخش قرار گرفته است، روش‌های مسئله معکوس (Inverse problem) راه‌حل بسیاری از مشکلات در شناسایی شدت و منبع آلاینده می‌باشد. با توجه به اهمیت حفاظت از منابع آب در دهه‌های اخیر، شناسایی منابع آلاینده موردتوجه بسیاری از پژوهش‌گران قرار گرفته است.

می‌توان گفت مهمترین پارامتر انتقال آلودگی در رودخانه، انتقال آلودگی از یک مکان به مکان دیگر است که توسط جریان آب رخ می‌دهد، این فرایند انتقال جابه‌جایی (Advection) می‌باشد [1]. از دیگر فرایند انتقال در رودخانه فرایند پراکندگی (Dispersion) می‌باشد که توسط فیک (Fick) معرفی شده است [1]. در بحث انتقال آلودگی در رودخانه عموماً فرایند جابه‌جایی مطرح است اما فرایند پراکندگی نیز اثرگذار می‌باشد [2]. بر اساس قانون اول فیک، معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال و انتشار آلاینده در رودخانه همان معادله جابه‌جایی-پراکندگی-واکنش (Advection-Dispersion-Reaction) است که از نوع معادلات دیفرانسیل سهموی غیر همگن، خطی و مرتبه دوم می‌باشد و با حل معکوس این معادله در گام‌های زمانی منفی می‌توان توزیع شدت منبع آلاینده را با توجه به معلوم بودن مکان و زمان توزیع غلظت آلودگی محاسبه نمود.

به‌طورکلی حل معکوس معادله انتقال آلودگی در رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی توسط سه روش کلی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (Simulation optimization method)، احتمالاتی و زمین‌آماری (Geostatistical approach) و ریاضی(Mathematical method) مورد بررسی قرار گرفته است [3].

در روش اول از ترکیب یک الگوریتم بهینه‌سازی با یک روش عددی جهت حل معکوس معادله انتقال آلودگی استفاده می‌شود که به طبع نیاز به کامپیوترهایی با پردازنده قوی می‌باشد که نتیجه آن افزایش هزینه و زمان محاسبات می‌باشد و از مزیت‌های این روش می‌توان به‌تناسب این روش با محیط‌هایی با مقیاس بزرگ اشاره کرد. در همین راستا در سال ۲۰۱۵ ناردو و همکاران [4] با استفاده از روش تنظیم حداقل مربعات (Least squares approach) و همچنین استفاده از اطلاعات دریافت شده از حسگرهای زیستی، به شبیه‌سازی زمان و منبع آلاینده در محیط یک‌بعدی پرداختند. در سال ۲۰۱۷ نیز ژانگ و ژین[5] با ترکیب روش‌های الگوریتم ژنتیک پایه و حل تحلیلی معادله انتقال و انتشار تابع شدت زمانی آلاینده را بازسازی کردند. مهیتاکومار و سعید در سال ۲۰۰۵ و داتا و سینگ در سال ۲۰۰۶ [7] با استفاده از این روش به شبیه‌سازی معادله انتقال و انتشار پرداختند [6].

در روش دوم از کاربرد روش‌های احتمالاتی و زمین‌آماری در شبیه‌سازی مکان و زمان غلظت آلاینده استفاده می‌شود. از مزیت‌های این روش می‌توان به کاهش حجم محاسبات و از معایب آن می‌توان به محدودیت در شناسایی تعداد منابع آلاینده اشاره کرد. در همین راستا در حل معکوس معادله انتقال آلودگی در رودخانه با استفاده از روش احتمال برگشتی (Backward probability method) تحقیقاتی توسط پژوهشگرانی انجام شد. در سال ۲۰۱۶ قانع و همکاران[8] با استفاده از این روش محل و زمان انتشار منبع آلاینده را محاسبه کردند و نشان دادند که این روش دقت محاسباتی مناسبی دارد. همچنین این پژوهشگران در پژوهشی دیگر دقت خوب این روش در شناسایی زمان انتشار و محل منبع آلاینده در رودخانه را نشان دادند. در پژوهشی دیگر چنگ و جیا [9] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش احتمال برگشتی در پهنه‌های آب‌های سطحی و با شرایط جریان غیریکنواخت و ماندگار و در حالت دوبعدی موفق به تشخیص مکان و زمان رهاسازی ماده آلاینده در رودخانه شدند و با صحت‌سنجی این روش با داده‌های واقعی دقت خوب این روش را نشان دادند. نیوپار و ویلسون [10] در سال ۲۰۰۵ با روش احتمالات برگشتی، کاپولا و همکاران[11] در سال ۲۰۱۵ با روشی مبتنی بر روش‌های زمین‌آماری و در سال ۲۰۱۸ وانگ و همکاران [12] با استفاده از روش احتمال برگشتی و مدل رگرسیون خطی (Linear regression method) در همین راستا تحقیقاتی انجام دادند.

در روش سوم با استفاده از چارچوب‌های ریاضی شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. روش‌های ریاضی به دلیل کاهش زمان محاسبات، کاهش تعداد دفعات اجرا مدل و حذف کامل تکرارها مزیت بیشتری نسبت به روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی دارد و از معایب

این روش می‌توان به پیچیدگی حل مسئله نسبت به سایر روش‌ها اشاره کرد. در حل معادله انتقال و انتشار با استفاده از روش ریاضی می‌توان به حل معکوس معادله انتقال آلودگی در رودخانه با ضرایب متغیر با استفاده از روش شبه معکوس‌پذیری اشاره کرد. لوشابی در پژوهشی به حل معکوس معادله یک‌بعدی انتقال آلودگی با ضرایب متغیر پرداخته است که با استفاده از حل شبه معکوس‌پذیری معادله جابه‌جایی-پراکندگی و یک مدل عددی، داده‌های سری زمانی غلظت آلاینده تخلیه‌شده در رودخانه محاسبه و بازسازی شده است [13]. در سال ۲۰۲۰ پرمنون[14] نیز در پژوهشی به حل معادله انتقال آلودگی با استخراج راه‌حل تحلیلی توسط روش شبه معکوس‌پذیری پرداخت که با افزودن ترم پایداری شبیه‌سازی معادله جابه‌جایی-پراکندگی را انجام داد. نتایج نشان داد که این روش در الگوهای ساده بسیار دقیق عمل می‌کند و در الگوهای پیچیده میزان خطا افزایش می‌یابد. با استفاده از این روش پژوهش‌هایی توسط اسکاگاس و کابالا [15] در سال ۱۹۹۵ و ژانگ و وانگ [16] در سال ۲۰۱۱ به شبیه‌سازی معادله انتقال آلاینده پرداختند. از روش‌های عددی و تحلیلی مختلف دیگری همچون روش تنظیم تیخنوف، روش تابع گرین، تبدیل لاپلاس و غیره جهت حل معکوس معادله انتقال آلودگی در رودخانه با شرایط مختلف استفاده شده است که در همین راستا نیوپار و همکاران در سال ۲۰۰۰ با استفاده از روش تیخونوف (Tikhonov regularization method) ، مظاهری و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از معادله انتگرالی حاصل از اعمال روش تابع گرین به شبیه‌سازی مکان و زمان آلاینده در رودخانه پرداختند [3,17].

با توجه به اینکه در این پژوهش برای حل معکوس معادله انتقال آلودگی از طرح معکوس حافظ گروه (Backward Group Preserving Scheme) استفاده شده است، در اینجا به‌صورت مختصر به تحقیقات مختلف که توسط طرح حافظ گروه (Group Preserving Scheme) صورت گرفته پرداخته می‌شود.

لئو[18] در سال ۲۰۰٤ با استفاده از طرح حافظ گروه به حل معکوس معادله انتقال حرارت پرداخت. در این جل با استفاده از شرایط مرزی دیریکله (Dirichlet) در یک دامنه فضایی مشخص، ابتدا با استفاده از روش نیمه گسسته‌سازی به جداسازی معادله انتقال حرارت پرداخت و پس از تبدیل معادله دیفرانسیل جزئی به معادله دیفرانسیل معمولی، با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه و با حل سیستم‌های دینامیکی به یک معادله کلی دست‌یافت که با استفاده از آن به حل معادله دیفرانسیل به‌دست‌آمده در حالت یک‌بعدی و دوبعدی پرداخت و نتایج روش طرح معکوس حافظ گروه را برای شرایط مختلف سنجید و رنج پایداری را برای این معادله تعیین کرد. در سال ۲۰۱۰ لیو و چانگ[19] با فرض ثابت بودن ضریب پراکندگی در نواحی متناظر و با استفاده از روش عددی خطوط و طرح معکوس حافظ گروه، به‌منظور شناسایی ویژگی‌های منبع آلودگی شامل محل منبع آلاینده، بازیابی تاریخچه انتشار و توزیع فضایی غلظت آلاینده در فضای یک-بعدی به حل معکوس معادله انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی پرداختند. همچنین دو روش طرح معکوس حافظ گروه وMJBBE (Marching-Jury Backward Beam Equation) را باهم مقایسه کردند که نشان دادند طرح معکوس حافظ گروه در حل عددی معادله انتقال آلودگی و گرما نتایج بسیار دقیقتری به دست می‌دهد. در پژوهشی دیگر که در سال ۲۰۱٤ چانگ و کو[20] انجام دادند با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه به حل معادله غیرخطی کلاین-گوردون پرداختند. در این پژوهش آنها معادله بد وضع و دوبعدی کلاین-گوردون را، پس از جداسازی با شرایط مرزی معین و تبدیل آن به معادله دیفرانسیل معمولی با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه حل کردند و سپس پایداری این روش را موردبررسی قراردادند و نتایج بسیار مطلوبی از روش طرح حافظ گروه به دست آوردند. در سال ۲۰۱۱ عباس بندی و هاشمی[21] معادله لاپلاسی را که از معادلات دیفرانسیل جزئی بدخیم است با استفاده از روش نیمه گسسته‌سازی به معادله دیفرانسیل معمولی تبدیل کردند و سپس با استفاده از طرح حافظ گروه به بررسی و حل معادله پرداختند. نتایج کار موفق بودن ترکیب روش خطوط و طرح حافظ گروه برای به دست آوردن جواب معادله لاپلاس بدخیم را نشان داد. در پژوهشی دیگر گاوو و همکاران [22] در سال ۲۰۱۹ قدرت طرح حافظ گروه در شبیه‌سازی مدل کلاین-گوردون که از مسائل بد وضع می‌باشد را نشان دادند. آنها به کمک روش عددی خطوط و تبدیل معادله دیفرانسیل جزئی به معادله دیفرانسیل معمولی و شبیه‌سازی آن با استفاده از طرح حافظ گروه کارآمد بودن این روش در حل معادله کلاین-گوردون در حالت یک‌بعدی و دوبعدی را نشان دادند.

چانگ و لیو[23] در سال ۲۰۱۴ با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه در محیط ناهمگن، به حل معکوس معادله چندبعدی و غیرخطی موج (backward wave problems) که جزو معادلات دیفرانسیل بدخیم است پرداختند. آنها پس از اعمال شرایط مرزی و جداسازی به روش نیمه گسسته‌سازی و تبدیل معادله موج به معادله دیفرانسیل معمولی، با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه به حل آن پرداختند. در ادامه با حل مثال‌هایی پایداری و نتایج این روش بر روی معادلات چندبعدی و بدخیم را بررسی کردند. بر این اساس با مثال‌های عددی نشان دادند که طرح معکوس حافظ گروه برای سیستم‌های غیرخطی چندبعدی و حتی برای آن دسته از معادلات که به‌شدت بدخیم هستند قابل استفاده است و همچنین نشان دادن که طرح معکوس حافظ گروه می‌تواند نتایج صحیح و دقیقی را تولید کند و پیاده‌سازی این روش در شرایط زمانی معین به‌خوبی قابل‌اجرا است. در سال ۲۰۱۶ شن [24] با استفاده از طرح حافظ گروه به حل معکوس معادله غیرخطی و ناهمگن انتقال حرارت پرداخت که جزو معادلات دیفرانسیل بدخیم می‌باشد. شن برای تبدیل این معادله به معادلات دیفرانسیل معمولی از جداسازی به روش نیمه گسسته‌سازی استفاده کرد و با استفاده از طرح حافظ گروه به حل آن پرداخت و همچنین با مثال‌هایی تحت شرایط مختلف پایداری و جواب‌ها را بررسی کرد و نتیجه گرفت که طرح حافظ گروه بسیار دقیق، پایدار، مؤثر و حساس به داده‌های نهایی هستند و همچنین سرعت‌های همگرایی سریعی دارند. روش‌هایی نیز برای تخمین ضریب پراکندگی طولی ارائه شده است که در همین راستا می‌توان به پژوهشی که نوری و همکاران[25] در سال ۲۰۱۷ انجام دادند اشاره کرد. در این پژوهش با استفاده از مدل محاسبه دانه‌ای که بر مبنای روش عددی می‌باشد، به تخمین ضریب پراکندگی طولی در رودخانه پرداختند. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۹ رمضانی و همکاران[26] نیز با استفاده از راه حلی بر مبنای تفاضل محدود روشی برای محاسبه ضریب پراکندگی ارائه کردند.

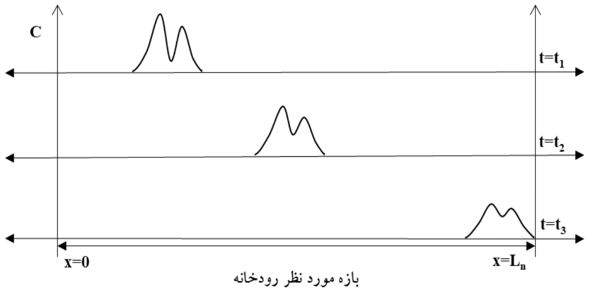
با توجه به پژوهش‌هایی که تاکنون انجام گرفته، حل معکوس معادله انتقال آلودگی در رودخانه با ضرایب متغیر به‌صورت محدود صورت گرفته است و طبق بررسی‌های صورت گرفته هیچ مطالعه‌ای در خصوص روش شناسایی تابع شدت منبع آلاینده در آب‌های سطحی با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه انجام نشده است. پس در این تحقیق سعی بر آن شده تا با اعمال طرح معکوس حافظ گروه برای حل معادله جابه‌جایی-پراکندگی در حالت یک‌بعدی و ضرایب متغیر، در رودخانه برای شناسایی تابع شدت منبع آلاینده از مزایای این روش استفاده کافی شود. از مزیت‌های این روش می‌توان به عدم استفاده از ترم پایداری در حل معکوس معادله انتقال آلودگی اشاره کرد و مشکلاتی همچون انتخاب و بهینه‌سازی ترم پایداری را ندارد. مزیت دیگر این روش، برخلاف سایر روش‌های عددی، عدم نیاز به تقسیم‌بندی رودخانه به بازه‌های زیاد می‌باشد که با توجه به‌وقتگیر بودن و هزینه زیاد داده‌برداری این نکته اهمیت زیادی دارد. در واقع همگرا شدن با تعداد بازه‌های کم یا گام زمانی یکی از محاسن این روش است که در این پژوهش نیز این امر اتخاذ شده است. سرعت و دقت بالای این مدل از دیگر مزیت‌های مهم است که می‌توان به آن اشاره کرد.

مبانی تئوری و روش‌ها

در این پژوهش به کمک طرح حافظ گروه که روشی بر پایه گروه‌های لی می‌باشد به حل مستقیم و معکوس معادله انتقال آلودگی در رودخانه پرداخته می‌شود. در این بخش ابتدا طرح حافظ گروه که جهت حل مستقیم معادله انتقال آلودگی کاربرد دارد معرفی گردیده و در ادامه به معرفی طرح معکوس حافظ گروه که برای حل معکوس این معادله کاربرد دارد پرداخته می‌شود. در انتها معادله جابه‌جایی-پراکندگی به‌صورت مستقیم و معکوس با استفاده از این روش حل‌شده است. در این پژوهش جهت حل مسئله ابتدا با روش عددی مستقیم معادله انتقال آلودگی در یک بعد حل می‌شود و سپس نتایج به‌دست‌آمده ورودی مرحله دوم محاسبات (حل معکوس معادله انتقال آلودگی) را تأمین می‌کند و نتایج نهایی (تابع شدت آلاینده) محاسبه می‌شود.

با توجه به شکل (۱) مدل‌سازی انتقال و انتشار آلاینده در رودخانه با فرض تقسیم رودخانه به n بازه انجام می‌گیرد، طول هر قسمت رودخانه $L_1, L_2, ...L_{n-1}, L_n$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود غلظت از بالادست به سمت پایین‌دست (غلظت از مکان x=0 به x=L) حرکت می‌کند و ترتیب زمانی در حل مستقیم از t_1 به t_3 و در حل معکوس از t_3 به t_1 می‌باشد. در روش مستقیم با داشتن الگوی غلظت رودخانه

در بالادست (سری زمانی) و یا الگوی غلظت در زمان ابتدایی و در تمام مکان‌ها (پروفیل مکانی) غلظت رودخانه در پایین‌دست محاسبه می‌شود. در این روش مدل به‌صورت برگشتی عمل می-کند یعنی با داشتن الگوی غلظت در زمان انتهایی (پروفیل مکانی در زمان T)، غلظت در زمان ابتدایی محاسبه می‌شود. جهت استخراج پروفیل مکانی در زمان انتهایی نیاز به داده‌برداری در طول رودخانه می‌باشد که در این پژوهش به دلیل عدم دستیابی به داده‌های واقعی، از حل مستقیم معادله انتقال آلودگی استفاده می‌شود.



شکل ۱ نیمرخ مکانی غلظت آلاینده در رودخانه در بازه ۰ تا Ln

در روش مستقیم با داشتن سری زمانی (الگو غلظت در مکان اولیه و در تمام زمان‌ها) و یا پروفیل مکانی (الگوی غلظت در زمان ابتدایی و در تمام مکان‌ها) می‌توان غلظت رودخانه در پایین‌دست را محاسبه کرد. دقت محاسبات این دو روش بستگی به شرایط مختلفی دارد که نوع الگو یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر دقت می‌باشد.

معادله جابه‌جایی-پراکندگی در تحقیق حاضر به‌صورت یک‌بعدی به‌صورت زیر بررسی می‌گردد [2]:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t}=-\frac{\partial(QC)}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}(AD\frac{\partial C}{\partial x})-AkC+AS \qquad (۱)$$

در معادله (۱)، A سطح مقطع رودخانه، D ضریب پراکندگی در جهت طولی، k ضریب زوال ماده آلاینده و S ترم منبع می‌باشد. از آنجا که معادله فوق از دسته معادلات دیفرانسیل جزئی بدخیم می‌باشد برای تبدیل آن به دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی از روش عددی خطوط استفاده می‌شود که پس از گسسته‌سازی معادله فوق به روش تفاضل مرکزی (Central Difference) معادله زیر حاصل می‌شود که با پارامتر f_j نمایش داده شده است.

$$\begin{aligned} f_j=\frac{d\left[A_iC_i(t)\right]}{dt} &= -\frac{Q_{i+1}(t)C_{i+1}(t)-Q_{i-1}(t)C_{i-1}(t)}{2\Delta x} \\ &+\frac{1}{\Delta x}\left[\left(AD\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i+1}-\left(AD\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i-1}\right] \\ &-A_ik_iC_i+A_iS_i \end{aligned} \qquad (۲)$$

گفتنی است که در این مسئله از ضریب زوال واکنش و ترم منبع صرف‌نظر شده است. شرایط مرزی و انتهایی برای حل عددی معکوس معادله جابه‌جایی-پراکندگی در رودخانه به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} &C(0,t)=0 && 0\le t\le T \\ &\left.\frac{\partial c}{\partial x}\right|_{x=L}=0 && 0\le t\le T \\ &C(x,t)=C_T(x) && 0\le x\le L \end{aligned} \qquad (۳)$$

که $C_T(x)$ شرط انتهایی یا توزیع مکانی توده مشاهده شده در زمان T است و L طول رودخانه می‌باشد.

در تحقیق موردنظر ضریب پراکندگی به‌صورت متغیر مدنظر است. در این تحقیق از مدل‌های محاسبات جریان که در آنها از معادلات سنت ونانت استفاده شده است برای محاسبه، سرعت، عمق، مساحت جریان و غیره با ضرایب متغیر استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب پراکندگی طولی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از روابط تجربی ارائه‌شده توسط محققان مختلف و انجام آزمایش میدانی توسط ماده ردیاب و روابط مختلف دیگر اشاره نمود.

پس از به دست آوردن پارامترهای جریان، به حل مستقیم معادله جابه‌جایی-پراکندگی به‌وسیله روش عددی خطوط (The numerical method of lines) و طرح حافظ گروه پرداخته می-شود. روش عددی خطوط مفهوم ساده‌ای دارد که در واقع دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی را به غیر از یک متغیر مستقل گسسته-سازی می‌کند. روند نیمه گسسته‌سازی دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی را نتیجه می‌دهد که به‌صورت عددی می‌توان آنها را حل کرد. پس از جداسازی معادله (۱) که با روش نیمه گسسته‌سازی انجام می‌شود، حاصل گسسته‌سازی دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی می‌شود که می‌توان با به‌کارگیری

طرح حافظ گروه به حل این معادله پرداخت. طرح حافظ گروه از فضای افزوده به نام فضای مینکوفسکی (Minkowski) استفاده می‌کند. تفاوت اساسی مابین طرح حافظ گروه و روش‌های عددی دیگر این است که در روش‌های قبلی از فضای اقلیدسی R^n استفاده می‌شود در حالی که در طرح حافظ گروه از فضای مینکوفسکی M^{n+1} استفاده می‌شود. در واقع بعد دستگاه در فضای مینکوفسکی یک مرتبه افزایش پیدا می‌کند. یکی از مزایای استفاده از فضای مینکوفسکی در طرح حافظ گروه، اجتناب از جواب‌های جعلی (Spurious) و نقاط ثابت غیرواقعی (Ghost fixed points) است.

طرح گروه حافظ در واقع گروه تقارنی دستگاه مورد بحث را حفظ می‌کند. برای دستگاه معادلات دیفرانسیل n بعدی به‌صورت

$$\dot{C} = f(C,t), \qquad C \in \mathbb{R}^n, \qquad t \in \mathbb{R}^+ \tag{۴}$$

که در این معادله C بردار n بعدی است، t یک متغیر زمانی است f تابعی با مقدار بردار از C و، t که میدان برداری نامیده می‌شود. برای سیستم‌های معادلات دیفرانسیل غیرخطی، معادلات را در دستگاه‌های دینامیکی تقویت‌شده جای داده می‌شود. می‌توان معادله بالا را به یک دستگاه دینامیکی افزوده $n+1$ بعدی تبدیل کرد[27].

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} C \\ \|C\| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & \dfrac{f(C,t)}{\|C\|} \\ \dfrac{f^T(C,t)}{\|C\|} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ \|C\| \end{bmatrix} \tag{۵}$$

به‌وضوح اولین معادله در (۵) همان معادله (۴) اما دومین معادله ساختار را برای متغیر های افزوده $X := (C^T, \|C\|)^T$ برقرار می‌کند که در شرط مخروط مینکوفسکی

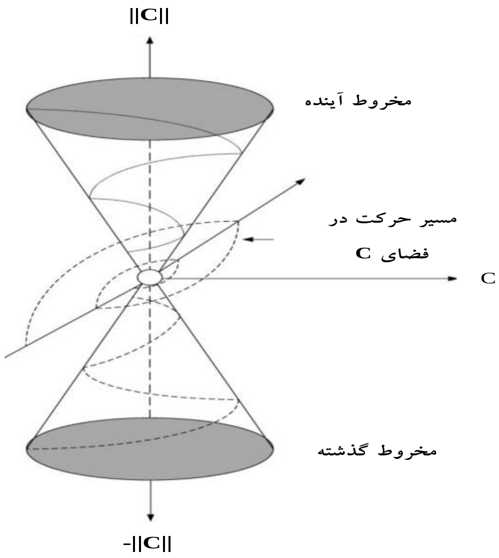
$$X^T g X = 0 \tag{۶}$$

صدق می‌کند که g یک متر مینکوفسکی (metric Minkowski) است و به صورت زیر نشان داده می‌شود [27].

$$g = \begin{bmatrix} I_n & 0_{n\times 1} \\ 0_{1\times n} & -1 \end{bmatrix} \tag{۷}$$

در معادلات فوق I_n تابع همانی از مرتبه n و T نمایانگر ترانهاده است.

معادله (٦) دامنه جواب در فضای مینکوفسکی را تعیین می‌کند که نتیجه آن مخروط پوچ (Null cone) شکل (۲) می‌شود [27]. با در نظر گرفتن زمان مثبت در حل مستقیم و زمان منفی در حل معکوس مخروط به دو قسمت مثبت و منفی که اصطلاحاً به آنها مخروط آینده (Future cone) و مخروط گذشته (Past cone) گفته می‌شود تبدیل می‌شود. شکل (۲) شرط مخروط را نشان می‌دهد که تاکنون شرط مخروط بدیهی‌ترین محدودیتی است که بر روی دستگاه دینامیکی اعمال شده است در واقع می‌توان گفت این شکل محدوده جواب غلظت رودخانه در فضای مینکوفسکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شرط مخروط و فضای مینکوفسکی افزوده [19]

با تعریف ماتریس A به صورت زیر

$$A := \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & \dfrac{f(C,t)}{\|C\|} \\ \dfrac{f^T(C,t)}{\|C\|} & 0 \end{bmatrix} \tag{۸}$$

و ثابت در نظر گرفتن آن، مقدار آن در گام j ام محاسبه می‌شود. با نوشتن نگاشت نمایی برای ماتریس $A(j)$ در فاصله $t_j \le t \le t + t_j$ هنگامی که $t = t_j$ است رابطه زیر حاصل می‌شود [27]:

$$\exp\left[\Delta t\, A(j)\right]=\begin{bmatrix} I_n+\dfrac{(a_j-1)}{\|f_j\|^2}f_j f_j^T & \dfrac{b_j f_j}{\|f_j\|} \\ \dfrac{b_j f_j^T}{\|f_j\|} & a_j \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

که با استفاده از رابطه $f_j=f(C_j,t_j)$ و جایگذاری $\exp[\Delta t\, A(j)]$ به‌جای $G(j)$ در رابطه $C_{j+1}=G(j)C_j$ که یکی از فواید طرح حافظ گروه است، معادله زیر حاصل می‌شود[27]:

$$C_{j+1}=C_j+\frac{(a_j-1)\, f_j . C_j + b_j \,\|C_j\| . \|f_j\|}{\|f_j\|^2} f_j \qquad (۱۰)$$

در معادله فوق C_j غلظت رودخانه در زمان t و C_{j+1} غلظت در زمان $t+1$ می‌باشد. a_j ، b_j نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند و f_j با استفاده از روش عددی خطوط محاسبه می‌شود که نتیجه آن در معادله (۲) نمایش داده شده است[27].

$$a_j := \cosh\left(\frac{\Delta t\, \|f_j\|}{\|C_j\|}\right) \qquad (۱۱)$$

$$b_j := \sinh\left(\frac{\Delta t\, \|f_j\|}{\|C_j\|}\right) \qquad (۱۲)$$

برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی به‌صورت معکوس با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه، معادله (٤) با گام‌های زمانی منفی به صورت معکوس در زمان حل می شود. پس برای دستگاه معادلات دیفرانسیل n بعدی به صورت معکوس معادله (٤) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{C}= f(C,t), \qquad C\in \mathbb{R}^n, \qquad t\in \mathbb{R}^- \qquad (۱۳)$$

با یک مقدار نهایی C مشخص در $t=0$، هدف بازیابی مقادیر گذشته C در زمان گذشته $t<0$ می‌باشد. همانند روش مستقیم، معادلات در سیستم‌های دینامیکی تقویت‌شده جای‌داده می‌شود. می‌توان معادله بالا را به یک دستگاه دینامیکی افزوده $n+1$ بعدی تبدیل کرد [27].

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} C \\ -\|C\| \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0_{n\times n} & -\dfrac{f(C,t)}{\|C\|} \\ -\dfrac{f^T(C,t)}{\|C\|} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C \\ -\|C\| \end{bmatrix} \qquad (۱٤)$$

مانند روش مستقیم ادامه مسیر با گام زمانی منفی برای روش معکوس نوشته می‌شود که همان نتیجه قبل را می‌دهد بنابراین مانند روش مستقیم با این کار می‌توان دستگاه دینامیکی اصلی n بعدی در R^n را به دستگاه دینامیکی $n+1$ بعدی در M^{n+1} متناظر کرد که درنهایت با بسط دادن ماتریس $A(j)$ و نوشتن نگاشت نمایی برای آن، معادله زیر حاصل می‌شود که به کمک آن می‌توان به حل معادلات دیفرانسیل معمولی به صورت معکوس پرداخت.

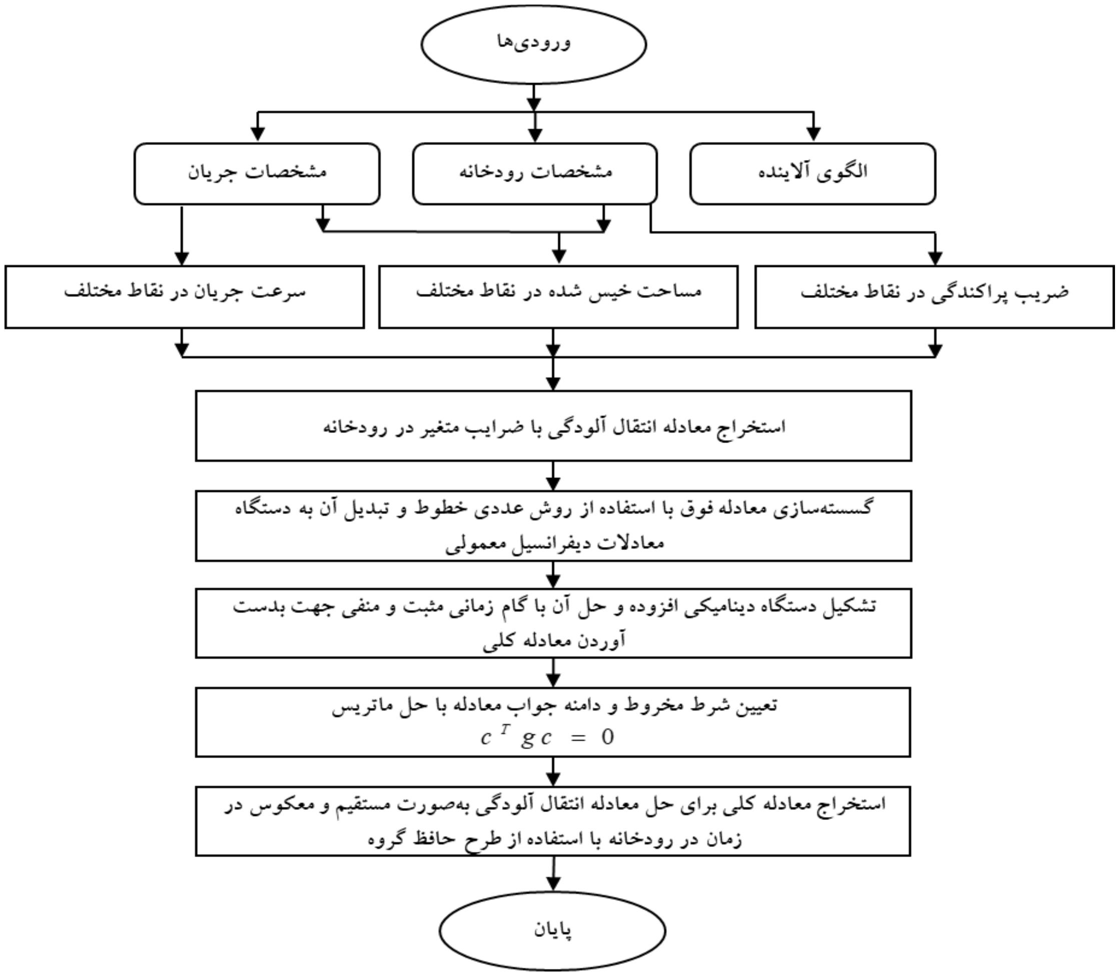
$$C_{j-1}=C_j+\frac{(a_j-1)\, f_j . C_j - b_j \,\|C_j\| . \|f_j\|}{\|f_j\|^2} f_j \qquad (۱۵)$$

در معادله فوق C_j غلظت رودخانه در زمان t و C_{j-1} غلظت در زمان $t-1$ می‌باشد. سایر پارامترها در این معادله مانند روش مستقیم است.

الگوریتم کلی حل معادله انتقال آلودگی به‌صورت مستقیم و معکوس به‌صورت زیر می‌باشد.

نتایج و بحث

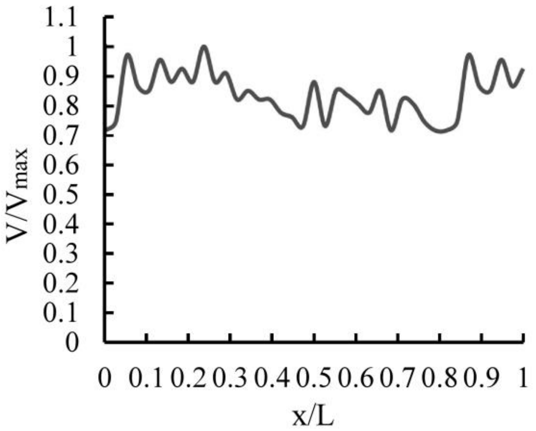
سه مثال جهت ارزیابی روش مستقیم و معکوس حافظ گروه طراحی شده است. این سه مثال به‌خوبی دقت این روش را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در این پژوهش معادله انتقال آلودگی با ضرایب متغیر حل شده است، ابتدا باید پارامترهای جریان محاسبه شود که این پارامترها با حل معادلات جریان و با استفاده از مدل‌های موجود به دست آمده است. مشخصات رودخانه با توجه به مثال‌های واقعی در نظر گرفته شده است و با استفاده از مدل‌های محاسبات جریان پارامترهای دبی، عمق، سرعت، مساحت جریان و دیگر پارامترها در نقاط مختلف رودخانه به دست آمده است. روش‌های مختلفی نیز جهت تعیین ضریب پراکندگی وجود دارد که در این پژوهش از روابط تجربی موجود استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات و سایر پارامترهای هر مثال و شکل (٤)، (۵) و (٦) سرعت، ضریب پراکندگی و مساحت جریان نسبت به طول رودخانه را نشان می‌دهد.



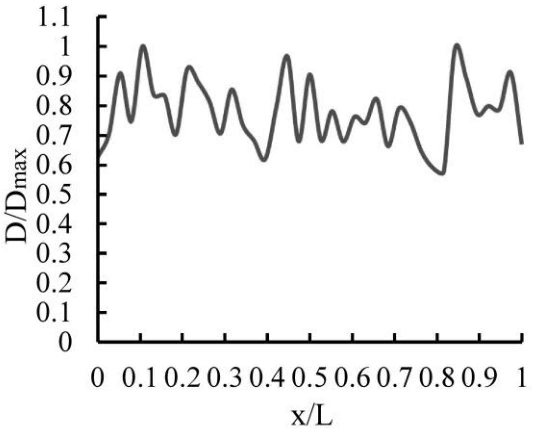
شکل ۳ فرایند مدل‌سازی عددی انتقال آلاینده در رودخانه با ضرایب متغیر

جدول ۱ مشخصات و پارامترهای هر مثال

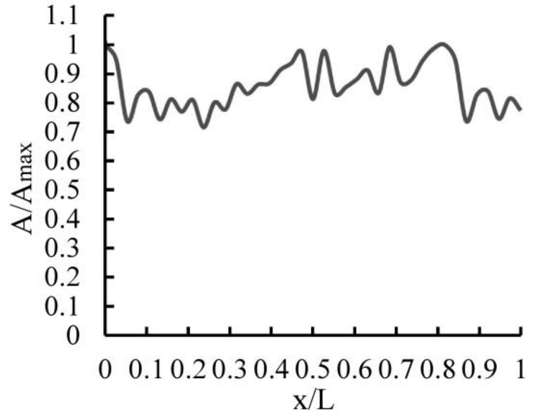
پارامتر/ مثال	طول L(km)	دبی $Q(m^3/s)$	الگو آلاینده	ضرایب	هدف
مثال اول	۲۰	۱۵	مثلث دو قله (نامنظم)	متغیر	حل مستقیم/ بازسازی شدت آلاینده و پروفیل مکانی در پایین‌دست
مثال دوم	۲۰	۱۵	نمایی دو قله (نامنظم)	متغیر	حل معکوس/ بازسازی شدت آلاینده و پروفیل مکانی در بالادست
مثال سوم	۲۰	۱۵	مثلث دو قله (نامنظم)	متغیر	حل معکوس/ بازسازی شدت آلاینده و پروفیل مکانی در بالادست



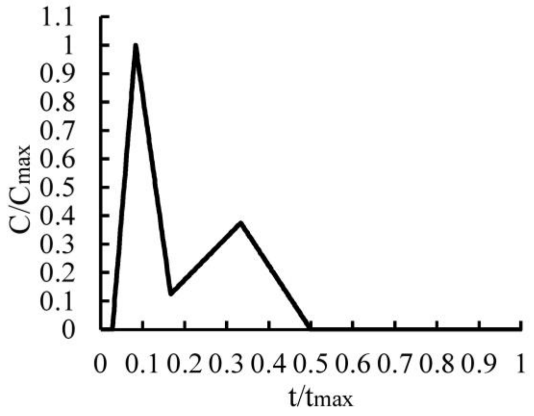
شکل ٤ تغییرات سرعت در راستای طولی رودخانه



شکل ۵ تغییرات ضریب پراکندگی در راستای طولی رودخانه



شکل ٦ تغییرات مساحت جریان در راستای طولی رودخانه



شکل ۷ منحنی سری زمانی غلظت آلاینده در مرز ورودی

ابتدا با حل مستقیم طرح حافظ گروه با استفاده از سری زمانی به‌منظور شبیه‌سازی روش مستقیم و نشان دادن دقت عمل این روش از شرایط مرزی غلظت ورودی به رودخانه مطابق شکل (۷) و شرط مرزی غلظت خروجی $\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=L}=0$ در نظر گرفته شده است و پس از شبیه‌سازی برای ارزیابی این روش از حل عددی تمام ضمنی (Fully implicit) تفاضل محدود (Finite difference) استفاده شده است.

جهت حل معکوس معادله انتقال آلودگی نیاز به پروفیل طولی یا مکانی است که برای به دست آوردن این پروفیل باید غلظت آلاینده در بازه‌های مشخص در یک زمان خاص از رودخانه به دست آید که در این پژوهش به دلیل عدم دستیابی به داده‌های واقعی، با استفاده از حل مستقیم پروفیل مکانی در زمان انتهایی به دست می‌آید. در واقع خروجی مدل مستقیم به‌عنوان ورودی مدل معکوس در نظر گرفته می‌شود و به‌منظور صحت-سنجی مدل معکوس، پس از شبیه‌سازی مدل معکوس و بازسازی پروفیل مکانی در زمان‌های مختلف، نتایج حاصل از مدل معکوس با مدل مستقیم مقایسه می‌شود. با توجه به اینکه برداشت هرگونه داده‌ای بدون خطا امکان‌پذیر نیست برای محاسبات و اندازه‌گیری شدت آلاینده در این مثال‌ها میزان خطاهای مختلفی در نظر گرفته شده است. این خطاها به نتایج حاصل از روش مستقیم که ورودی روش معکوس است اعمال شده تا پاسخ‌های به‌دست‌آمده نزدیک به واقعیت باشند. به همین منظور خطای ۵ تا ۱۵ درصد به پروفیل مکانی غلظت آلاینده در زمان انتهایی اعمال شده است. در انتها برای مقایسه این دو حل از شاخص‌های خطای آماری نظیر ضریب همبستگی (R^2) جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) میانگین خطای مطلق (MAE) و درصد خطای نسبی (MRE) استفاده شده است.

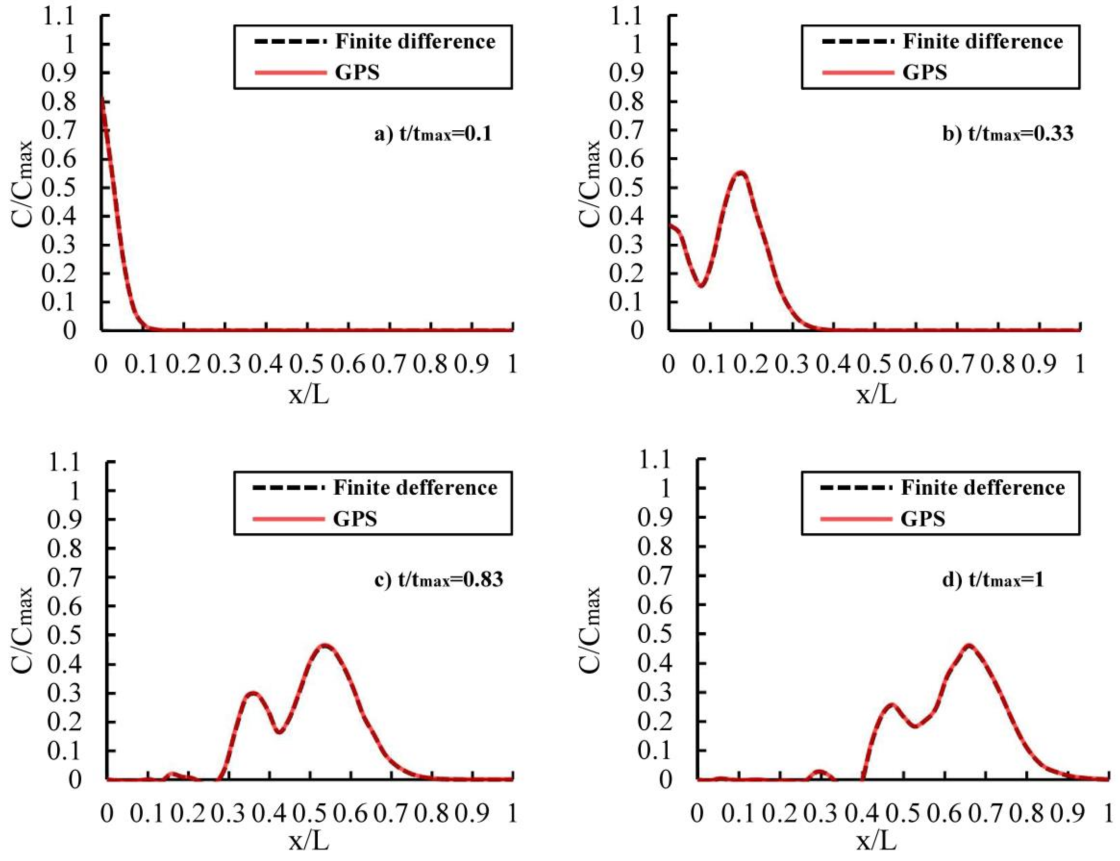
مثال اول: کاربرد طرح مستقیم حافظ گروه در رودخانه با استفاده از سری زمانی. این مثال به‌منظور ارزیابی طرح مستقیم حافظ گروه طراحی شده است. در این مثال رودخانه پس از

تقسیم به ۳۹ بازه ٤۰۰ متری و اعمال غلظت ورودی در مرز رودخانه، غلظت در بازه‌های مختلف محاسبه شده است. در این مثال مدل در چهار زمان بی‌بعد شده (۰,۱۰)، (۰,۳۳)، (۰,۸۳) و (۱) شبیه‌سازی شده و نتایج در شکل (۸) نمایش داده شده است. همچنین نتایج ارزیابی با حل عددی تمام ضمنی تفاضل محدود با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول (۲) آورده شده است.

با توجه به شکل (۸) دقت طرح مستقیم حافظ گروه در حل معادله انتقال آلودگی با ضرایب متغیر در رودخانه بسیار خوب بوده و همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود این حل انطباق نسبتاً کاملی با حل تمام ضمنی تفاضل محدود دارد. قله‌ها به‌خوبی بازسازی شده‌اند و باگذشت زمان نیز خللی در بازسازی قله‌ها در پایین‌دست رودخانه ایجاد نشده است و انطباق این دو روش در تمام زمان‌های شبیه‌سازی حفظ شده است. همان طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود شاخص آماری نیز دقت بالای این روش را نشان می‌دهد. مقادیر بسیار کم MAE، RMSE و MRE و همچنین میل کردن مقدار R^2 به ۱ نشان‌دهنده دقت بالای طرح مستقیم حافظ گروه و تطابق نسبت کامل این روش با روش تمام ضمنی تفاضل محدود می‌باشد

جدول ۲ شاخص‌های آماری مثال اول

شاخص آماری	مقدار
MAE(kg/m^3)	0.05
R^2(%)	99.997
RMSE(kg/m^3)	0.02
MRE(%)	0.23

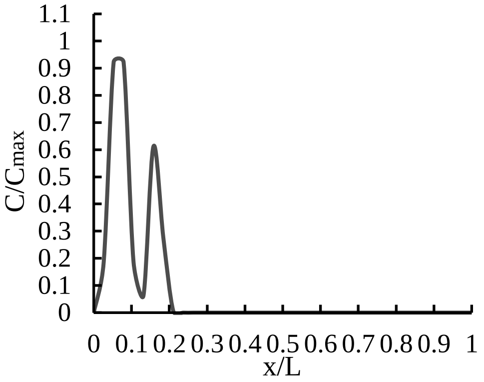


شکل ۸ مقایسه طرح مستقیم حافظ گروه با روش تمام ضمنی تفاضل محدود

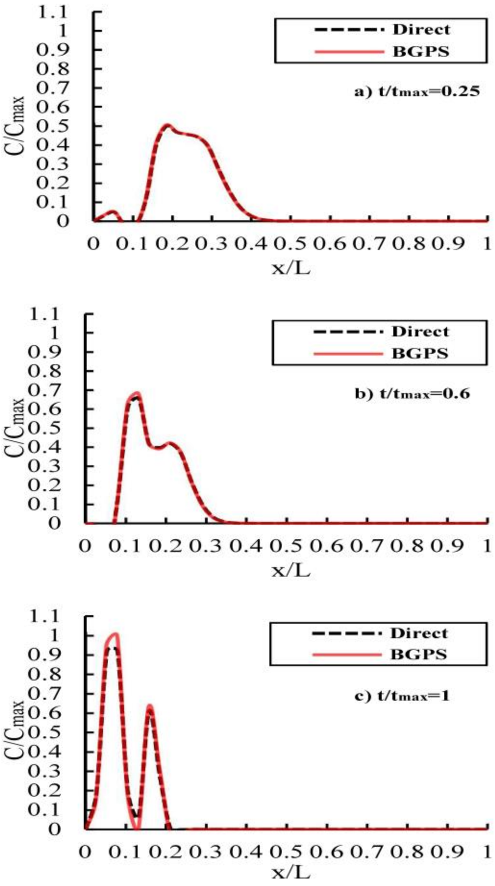
مثال دوم: کاربرد طرح معکوس حافظ گروه در رودخانه با استفاده از پروفیل مکانی. با توجه به اینکه ثبت داده‌ها همیشه دارای خطا است، بنابراین بر روی داده‌های ورودی مدل معکوس (پروفیل مکانی) ۵ تا ۱۵ درصد خطا به‌صورت کاملاً تصادفی اعمال شده است تا بتوان اثر این خطاها را در پاسخ مشاهده کرد. در این مثال پروفیل مکانی ورودی مدل معکوس با استفاده از شرایط ابتدایی (Initial conditions) در شکل (۹) به‌دست آمده است و شرایط مرزی ورودی $C(0,t)=0$ و شرایط مرزی در انتها $\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=L}=0$ در نظر گرفته شده است. در این مثال دوم نتایج در سه زمان بی‌بعد شده (۰,۲۵)، (۰,۶) و (۱) آورده شده است. نتایج بدون در نظر گرفتن خطا در شکل (۱۰) و پس از اعمال درصد خطا ۱۵٪ بر روی ورودی مدل در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مدل با استفاده از شاخص‌های آماری با حل مستقیم ارزیابی شده که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ شاخص‌های آماری در حالت‌های مختلف مثال دوم

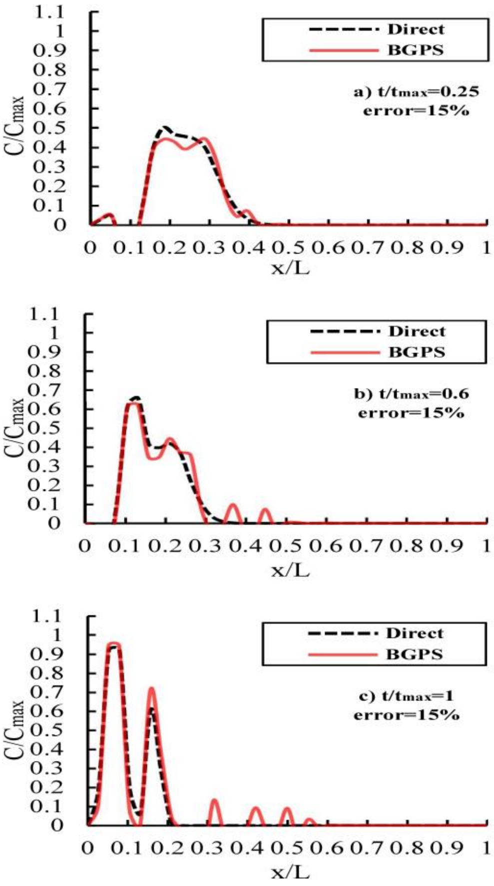
خطا/ شاخص	error 0%	error 5%	error 10%	error 15%
MAE(kg/m^3)	0.19	0.38	0.59	0.77
R^2(%)	99.62	97.01	95.89	94.04
RMSE(kg/m^3)	0.08	0.17	0.25	0.39
MRE(%)	3.54	6.39	8.75	12.56



شکل ۹ پروفیل مکانی (شرایط ابتدایی) مدل مستقیم



شکل ۱۰ مقایسه طرح معکوس حافظ گروه با روش مستقیم بدون اعمال خطا



شکل ۱۱ مقایسه طرح معکوس حافظ گروه با روش مستقیم با اعمال خطا ۱۵٪

در این مثال چون مدل مستقیم با استفاده از شرط ابتدایی اجرا شده است مدل معکوس محدودیت زمانی در اجرا مدل ندارد و بازسازی مدل بازگشتی به‌طور کامل صورت گرفته است. همان طور که از شکل‌های (۱۰ و ۱۱) پیداست هر چه زمان بیشتری از شبیه‌سازی می‌گذرد دقت محاسبات کمتر می‌شود با این حال همان طور که مشاهده می‌شود قله‌ها با دقت بسیار خوبی بازسازی شده‌اند. دقت مدل می‌تواند به عواملی همچون تعداد گام‌های مکانی و زمانی، زمان شبیه‌سازی، از بین رفتن اثر الگوی ماده آلاینده در رودخانه بستگی دارد که به دلیل تعداد کم گام‌های زمانی و از بین رفتن اثر دو قله غلظت با گذشت زمان نتیجه بسیار خوبی حاصل شده است. یکی از نقاط قوت این مدل عدم نیاز به تقسیم‌بندی رودخانه به تعداد بازه‌های زیاد می‌باشد که به دلیل مشکل بودن برداشت داده در طول رودخانه این یک مزیت مهم محسوب می‌شود. همان طور که از مقایسه شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود با افزایش خطای اعمال‌شده بر داده‌های ورودی مدل معکوس میزان دقت بازیابی الگوی آلاینده کم می‌شود. مقایسه ستون‌های جدول (۳) نیز نشان می‌دهد با افزایش خطا مقادیر MAE، RMSE و MRE افزایش پیدا می‌کند و از میزان R^2 نیز کم می‌شود که این تغییرات نشان‌دهنده کاهش دقت محاسبات با افزایش خطا می‌باشد. همچنین با اعمال خطا، نوسانات غلظت در پایین‌دست رودخانه در زمان‌های انتهایی شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که با افزایش خطا این نوسانات بیشتر می‌شود. برای نشان دادن دقت روش، نتایج مقایسه با شاخص‌های آماری در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود شاخص آماری MAE، RMSE و MRE مقادیر کمی دارند که دقت خوب روش معکوس را نشان می‌دهد همچنین مقدار بالای R^2 نشان‌دهنده تطابق خوب این دو روش می‌باشد و حتی این مقادیر هنگام اعمال خطا نیز نتایج خوبی را نشان می‌دهد که بیانگر این است که در صورت به وجود آمدن خطا، الگوی آلاینده به‌خوبی بازسازی می‌شود و نتایج بسیار قابل قبولی به دست می‌آید.

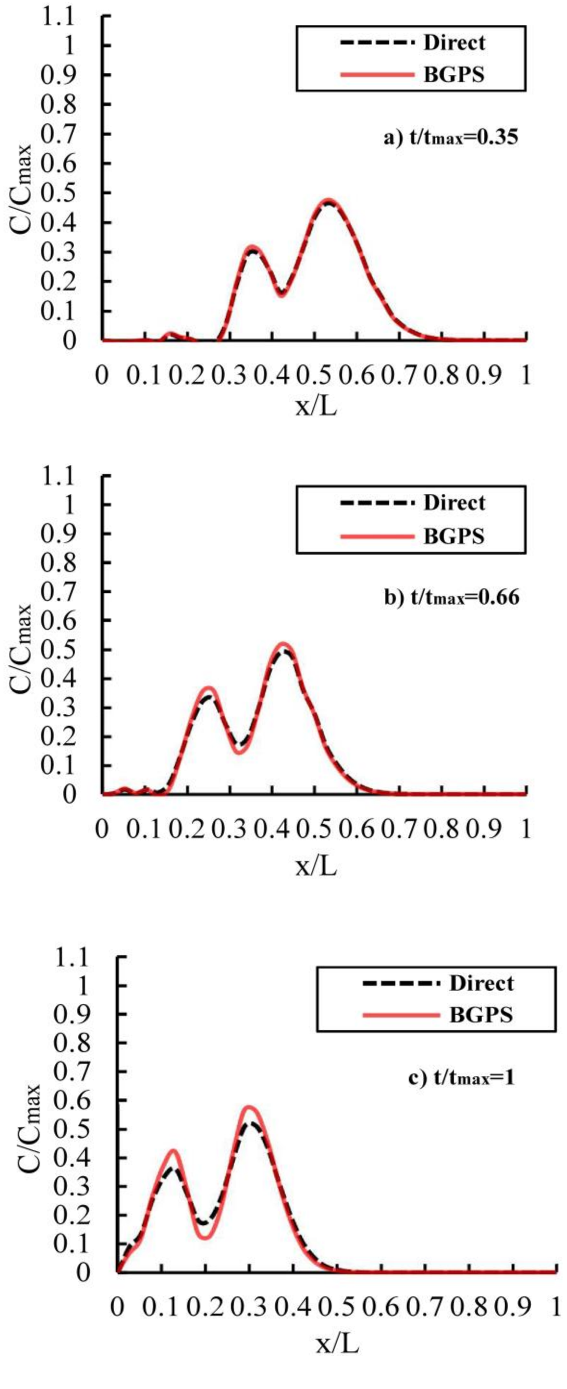
مثال سوم: کاربرد طرح معکوس حافظ گروه در رودخانه با استفاده از سری زمانی. با توجه به الگوی سری زمانی غلظت آلاینده (غلظت در مکان ابتدایی رودخانه و در تمام زمان‌ها) شکل (٦) و شبیه‌سازی مدل مستقیم، پروفیل مکانی در زمان انتهایی که در واقع ورودی مدل معکوس است به دست می‌آید. در این مثال نتایج در سه زمان بی‌بعد شده (۰,۳۵)، (۰,٦٦) و (۱) آورده شده است. در این مثال رودخانه مورد نظر پس از تقسیم به ۳۹ بازه ٤۰۰ متری و اعمال پارامترهای جریان و ضرایب متغیر، شبیه‌سازی عددی مدل انجام گرفته است و پس از آن نتایج مدل که با درصد خطاهای مختلف به‌دست‌آمده در شکل (۱۲) و (۱۳) و سپس مدل با استفاده از شاخص‌های آماری با حل مستقیم ارزیابی شده که نتایج در جدول (٤) ارائه شده است.

جدول ٤ شاخص‌های آماری در حالت‌های مختلف مثال سوم

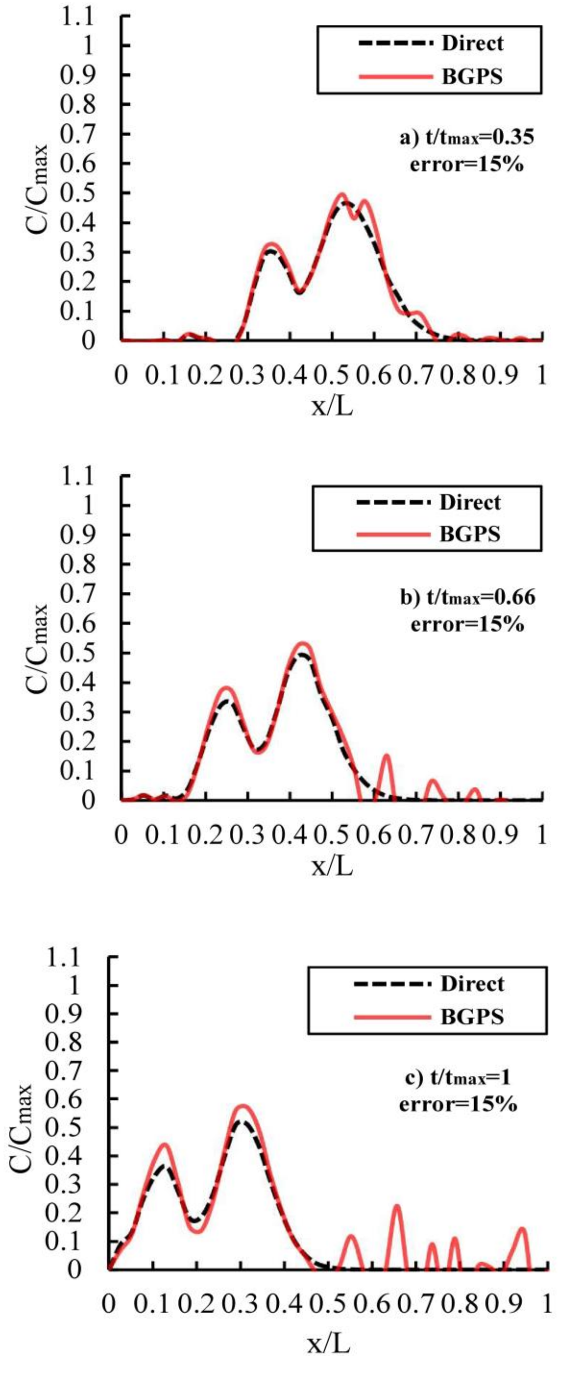
خطا/ شاخص	error 0%	error 5%	error 10%	error 15%
MAE(kg/m^3)	0.26	0.56	0.73	0.91
R^2(%)	99.22	95.14	94.81	92.09
RMSE(kg/m^3)	0.11	0.24	0.31	0.45
MRE(%)	4.6	8.2	10.2	14.3

علی رغم اینکه زمان مدل مستقیم بیشتر از مدل معکوس است، مدل معکوس تنها توانایی شبیه‌سازی نیمی از زمان بوده است یعنی آن قسمت از رودخانه که غلظت از مرز ورودی وارد رودخانه نمی‌شود بازسازی برگشتی صورت می‌گیرد که در واقع مهم‌ترین محدودیت این مدل هست. همان طور که از شکل (۱۲ و ۱۳) پیداست روند بازگشتی به‌خوبی صورت گرفته است و قله‌ها با دقت خوبی بازسازی شده‌اند. همان طور که از شکل‌های (۱۲ و ۱۳) پیداست هر چه زمان بیشتری از شبیه‌سازی می‌گذرد دقت محاسبات کمتر می‌شود که این کاهش دقت هنگام تشکیل قله‌ها در زمان انتهایی نیز معلوم است. با توجه به شکل (۱۲ و۱۳) کاملاً مشهود است که هرچه درصد خطا اعمال‌شده بر روی پروفیل مکانی بیشتر شود بازسازی مدل برگشتی با دقت کمتری همراه خواهد شد. کاهش مقدار MAE، RMSE و MRE و افزایش مقدار R^2 به‌خوبی این امر را نشان می‌دهد. گفتنی است این مقادیر هنگام اعمال خطا نیز نتایج خوبی را نشان می‌دهد که بیانگر این است که در صورت به وجود آمدن خطا، الگوی آلاینده به‌خوبی بازسازی می‌شود و نتایج بسیار خوبی به دست می‌آید. همچون مثال قبل با اعمال خطا، نوسانات غلظت در پایین‌دست رودخانه در زمان‌های انتهایی شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که با افزایش خطا این نوسانات بیشتر می‌شود. برای نشان دادن دقت

روش، نتایج مقایسه با شاخص‌های آماری در جدول (٤) آورده شده است. همان‌طور که در جدول (٤) مشاهده می‌شود شاخص آماری MAE، RMSE و MRE مقادیر کمی دارند که دقت خوب روش معکوس را نشان می‌دهد همچنین مقدار بالای R^2 نشان‌دهنده تطابق خوب این دو روش می‌باشد. افزایش MAE، RMSE و MRE و کاهش R^2 براثر افزایش خطا، کاهش دقت مدل براثر افزایش خطا اعمال‌شده بر شرط ابتدایی مدل معکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ مقایسه طرح معکوس حافظ گروه با روش مستقیم با اعمال خطا ۱۵٪



شکل ۱۲ مقایسه طرح معکوس حافظ گروه با روش مستقیم بدون اعمال خطا

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور به دست آمدن شدت آلاینده، از حل عددی معادله انتقال آلودگی با ضرایب متغیر در رودخانه استفاده شد. سه مثال جهت ارزیابی این روش طراحی گردید که در مثال اول با استفاده از شرط اولیه (مثلث دو قله) دقت مدل مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج به دست آمده نشان داد روش مستقیم تطابق بسیار زیادی با روش تمام ضمنی تفاضل محدود دارد. در مثال دوم به ازای شرط اولیه و با استفاده از روش مستقیم، پروفیل مکانی به دست آمد که به‌عنوان ورودی مدل معکوس استفاده شد. در این مثال نیز شبیه‌سازی با اعمال درصد خطاهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بر روی پروفیل مکانی صورت گرفت و نتایج حاصل نشان داد که قله‌ها به‌طور تقریباً کاملی تشکیل شدند که با توجه به از بین رفتن اثر دو قله، نشان از قدرت و توانایی مدل معکوس در تشکیل الگوی آلاینده می‌دهد. از خروجی مثال اول به‌عنوان ورودی مثال سوم استفاده شد که در این مثال با استفاده از طرح معکوس حافظ گروه بازسازی مدل برگشتی انجام گرفت. شبیه‌سازی صورت گرفته با اعمال درصد خطاهای ۵، ۱۰ و ۱۵ بر روی ورودی مدل معکوس انجام شد که در تمام حالات قله‌ها با دقت بسیار خوبی تشکیل شدند و نتایج شاخص‌های آماری دقت این روش را نشان داد. با توجه به این سه مثال دقت خوب طرح حافظ گروه در تشکیل تابع شدت آلاینده در رودخانه و بازسازی پروفیل مکانی قابل مشاهده است. این مدل همچنین امکان نشان دادن پروفیل مکانی غلظت در زمان‌های مختلف که کمک شایانی در مشاهده تحولات و تغییرات مکانی توزیع غلظت می‌کند را دارا است. این روش مشکلاتی همچون انتخاب و بهینه‌سازی ترم پایداری که به دلیل عددی بودن این روش است را ندارد که همین دلیل باعث بالا بردن سرعت و کم کردن خطای احتمالی می‌شود. علاوه بر موارد فوق یکی از مزیت‌های دیگر این روش، عدم نیاز به تهیه داده در تعداد بازه‌های کم در طول رودخانه می‌باشد که به دلیل دشوار بودن این کار یک مزیت مهم محسوب می‌شود. در نهایت به دلیل سرعت و دقت زیاد این مدل و ساده بودن محاسبات باعث صرفه‌جویی در زمان می‌شود. از محدودیت‌های این روش نیز می‌توان به عدم توانایی در بازسازی سری زمانی اشاره کرد.

مراجع

[1] J. S. Gulliver, *Introduction to chemical transport in the environment*. Cambridge University Press, 2007.

[2] S. C. Chapra, *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill Publisher. New York, 1997.

[3] M. Mazaheri, J. Mohammad Vali Samani, and H. M. V. Samani, “Mathematical Model for Pollution Source Identification in Rivers,” *Environ. Forensics*, Vol. 16, pp. 310-321, 2015.

[4] Nardo, A.D, Santonastaso, G.F., Battaglia, `R. and Musmarra, D, “Smart identification system of surface water contamination by an innovative biosensor network,” in *Conference: CEMEPE - 5th international conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics*, (2015).

[5] S. Zhang and X. Xin, “Pollutant source identification model for water pollution incidents in small straight rivers based on genetic algorithm,” *Appl. Water Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 1955–1963, 2017.

[6] M. G. (Kumar) and S. Mohamed, “Hybrid Genetic Algorithm—Local Search Methods for Solving Groundwater Source Identification Inverse Problems,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 131, no. 1, pp. 45–57, Jan. 2005.

[7] S. R. Mohan and D. Bithin, “Identification of Groundwater Pollution Sources Using GA-based Linked Simulation Optimization Model,” *J. Hydrol. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 101–109, Mar. 2006.

[8] A. Ghane, M. Mazaheri, and J. Mohammad Vali Samani, “Location and release time identification of pollution point source in river networks based on the Backward Probability Method,” *J. Environ. Manage.*, vol. 180, pp. 164–171, 2016.

[9] W. P. Cheng and Y. Jia, “Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location

probability density function method," *Adv. Water Resour.*, vol. 33, no. 4, pp. 397–410, Apr. 2010.

[10] R. M. Neupauer and J. L. Wilson, "Backward probability model using multiple observations of contamination to identify groundwater contamination sources at the Massachusetts Military Reservation," *Water Resour. Res.*, vol. 41, no. 2, pp. 1–14, Feb. 2005.

[11] F. Cupola, M. G. Tanda, and A. Zanini, "Laboratory sandbox validation of pollutant source location methods," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 29, no. 1, pp. 169–182, 2015.

[12] J. Wang, J. Zhao, X. Lei, and H. Wang, "New approach for point pollution source identification in rivers based on the backward probability method.," *Environ. Pollut.*, vol. 241, pp. 759–774, Oct. 2018.

[13] M. Loushabi, M. Mazaheri, and J. Mohammd Vali Samani, "Inverse Solution of the advection-dispersion equation in rivers for pollution source identification", *Sharif J. Mech. Eng.*, vol. 35.3, no. 1, pp. 103–113, 2019. (In Persian)

[14] E. Permanoon and M. Mazaheri, "Identify the source of pollution with an Inverse-time analytical solution to the pollution transport equation," *Hydrophysics*, vol. 6, no. 2, pp. 25–39, 2021. (In Persian)

[15] T. H. Skaggs and Z. J. Kabala, "Recovering the History of a Groundwater Contaminant Plume: Method of Quasi-Reversibility," *Water Resour. Res.*, vol. 31, pp. 2669-2673, 1995.

[16] T. Zhang, H. Li, and S. Wang, "Identification of particulate contaminant source locations in enclosed spaces with inverse CFD modelling," in *12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011*, vol. 1, pp. 667–672, (2011).

[17] R. M. Neupauer, B. Borchers, and J. L. Wilson, "Comparison of inverse methods for reconstructing the release history of a groundwater contamination source," *Water Resour. Res.*, vol. 36, no. 9, pp. 2469–2475, 2000.

[18] C. S. Liu, "Group preserving scheme for backward heat conduction problems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 12–13, pp. 2567–2576, 2004.

[19] C. S. Liu, C. W. Chang, and J. R. Chang, "The backward group preserving scheme for 1D backward in time advection-dispersion equation," *Numer. Methods Partial Differ. Equ.*, vol. 26, no. 1, pp. 61–80, 2010.

[20] C. W. Chang and C. C. Kuo, "A Lie-group approach for solving backward two-dimensional nonlinear Klein-Gordon equation," *Procedia Eng.*, vol. 79, no. 1st ICM, pp. 590–598, 2014.

[21] S. Abbasbandy and M. S. Hashemi, "Group preserving scheme for the Cauchy problem of the Laplace equation," *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 35, no. 8, pp. 1003–1009, 2011.

[22] W. Gao, M. Partohaghighi, H. M. Baskonus, and S. Ghavi, "Regarding the group preserving scheme and method of line to the numerical simulations of Klein–Gordon model," *Results Phys.*, vol. 15, p. 102555, 2019.

[23] C. W. Chang and C. S. Liu, "The backward group preserving scheme for multi-dimensional nonhomogeneous and nonlinear backward wave problems," *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 15–16, pp. 4027–4048, 2014.

[24] Y. Chen, "International Journal of Heat and Mass Transfer High order implicit and explicit Lie-group schemes for solving backward heat conduction problems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 101, pp. 1016–1029, 2016.

[25] R. Noori, B. Ghiasi, H. Sheikhian, and J. F. Adamowski, "Estimation of the Dispersion Coefficient in Natural Rivers Using a Granular Computing Model," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 143, no. 5, pp. 1–12, 2017.

[26] M. Ramezani, R. Noori, F. Hooshyaripor, Z. Deng, and A. Sarang, "Numerical modelling-based comparison of

longitudinal dispersion coefficient formulas for solute transport in rivers,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 64, no. 7, pp. 808–819, 2019.

[27] C. S. Liu, “Cone of non-linear dynamical system and group preserving schemes,” *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 36, no. 7, pp. 1047–1068, 2001.

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Investigating the Impacts of the Mass and the Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings

Research Article

Nahmat Khodaie[1], Hamed Teimouri[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.70265.1039

1. Introduction

Previous studies on the effect of TMD to control the vibrations of structures have generally been carried out for specific parameters and installation positions of TMD system. In this study, the impacts of mass and installation height of TMD in controlling the crosswind and along-wind vibrations of tall buildings were studied. The tall building is modeled as a vertical cantilever beam with masses concentrated at the nodes, and the response of the structure is obtained in the frequency domain. The optimal values of TMD were extracted for different mass ratios and its height position. The top-floor acceleration of the structure is considered as the objective function, and the impact of various TMD parameters, including its mass ratio and height position, on the efficiency of the system was evaluated and discussed.

2. Analytical model and wind characteristics

The structural behavior of the building was modeled as a multi-degree-of-freedom vertical beam with masses concentrated at the nodes. The equation of motion of the multi-degree-of-freedom system under dynamic loads is as follows:

$$\mathbf{M\ddot{X}}+\mathbf{C\dot{X}}+\mathbf{KX}=\mathbf{F} \qquad (1)$$

where, M, C and K are the mass, damping, and stiffness matrices respectively, X is the vector of nodal displacements, and F is the vector of external forces. The stiffness matrix of the structure was calculated by assembling the stiffness effect of the beam elements. To reduce the volume of calculations, the rotational degrees of freedom are compacted in translational displacements. The mass matrix was determined by calculating the mass of the structure at the nodes. The inherent damping matrix of the structure was determined using the proportional method and with the following formula:

$$\mathbf{C}_s=\phi^{-T}A\phi^{-1}$$
$$A=\mathrm{diag}[2\mu_1\zeta_1\omega_1 \quad \dots \quad 2\mu_j\zeta_j\omega_j \quad \dots \quad 2\mu_n\zeta_n\omega_n] \qquad (2)$$

where, φ is the matrix of mode shapes, and μ, ξ and ω are the modal mass, damping and frequencies, respectively. *A* is the diagonal matrix whose main diagonal members are the modal damping.

The analytical model of the building equipped with a TMD, for the case that TMD is installed at the upper level of the structure, is shown in Figure 1. The TMD stiffness and damping ratio parameters are tuned in a way to optimally reduce the vibrations of the main structure. The response of the structure was obtained using the random vibration theory and frequency domain analysis. The transfer matrix of the structure is determined based on structural dynamic characteristics and the power spectral density (PSD) matrices of the crosswind and along-wind forces are computed using the common functions available in previous studies.

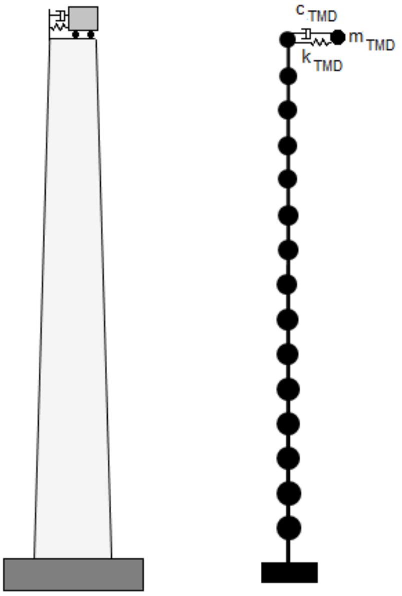


Figure 1. The schematic configuration of the tall building equipped with a TMD system installed at the top and its analytical model

*Manuscript received: May 6, 2022, Revised, June 13, 2022, Accepted, December 15, 2022.

1. Corresponding author. Assistant Professor, Islamic Azad University, Khormouj Branch, Khormouj, Iran.
Email: Nahmat.Khodaie@iau.ac.ir
2. MSc Student, Islamic Azad University, Khormouj Branch, Khormouj, Iran.

3. Tall building characteristics and results

To see the impacts of TMD parameters in controlling the wind-induce vibrations, an example of a tall building with a height of 400 meters and square cross-section with plan dimensions of 50 and 40 meters in the lower and upper levels, respectively, is presented. The root-mean-square (RMS) along-wind and crosswind acceleration of the uncontrolled structure was 9.39 and 18.66 cm/s2, respectively, which were beyond the occupant comfort limit.

Figure 2 shows the reduction percentage of the crosswind acceleration and displacement responses of the upper level of the structure against the TMD mass. The reduction in acceleration is greater than that of displacement. For instance, for a 600-ton TMD, the reduction of the crosswind acceleration and displacement are 48% and 34%, respectively. Moreover, the control performance of the TMD system increases with the increase of the TMD mass. However, the slope of the curves decreases with the increase of the TMD mass. This shows that obtaining a greater response reduction requires very massive TMDs.

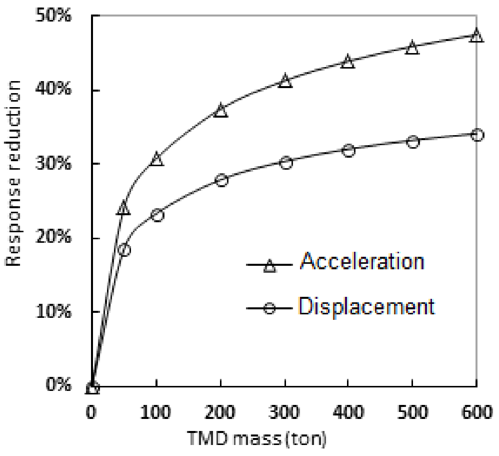


Figure 2. The variation of the crosswind acceleration and displacement control of the structure versus the TMD mass

Figure 3 shows the variation of the percentage reduction of the crosswind acceleration of the top-floor of the structure for different values of the height of the TMD installation location and the damper masses of 100, 300, and 500 tons. According to this figure, the reduction of the acceleration increases with the increase of the height of the TMD installation location. The incremental ratio of the system control is higher for lighter TMDs. For example, for 100, 300 and 500 ton TMDs, the reduction of the top-floor crosswind acceleration, when the TMDs are installed at the 320 meter level, are 24.23%, 33.72%, and 38.56%, respectively, and when the TMDs are installed on the top-floor are 30.68%, 41.28%, and 45.81%.

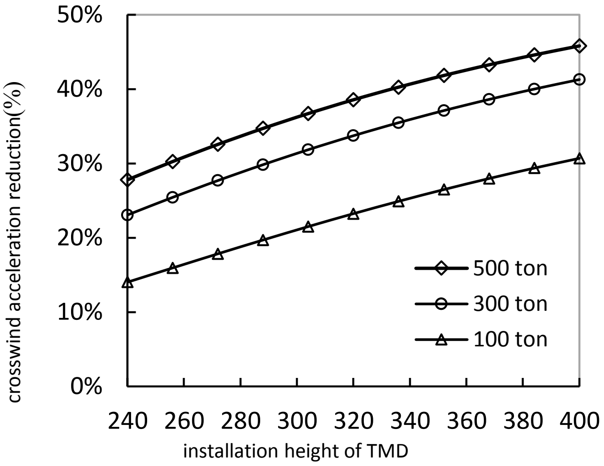


Figure 3. Variations in the reduction of lateral acceleration of the upper level for changing the height of the installation and different values of the TMD mass

4. Conclusion

For the tall building and assumed wind engineering specifications, the crosswind response of the structure is more than the along-wind vibrations. The crosswind acceleration of the top-floor of the uncontrolled structure is about 99% more than the along-wind acceleration.

2. For the 600 ton TMD system installed at the top floor, the crosswind displacement and acceleration of the top-floor were reduced by 34% and 48%, respectively, compared to the uncontrolled state.

The results of investigating the impacts of the height position of TMD showed that the reduction of the structural response increases with the increase in the height of the TMD installation location, and the incremental amount of control is greater for lighter TMDs. For example, for 100, 300, and 500 ton TMDs, the reduction of the top-floor crosswind acceleration when the TMDs are installed at the 320 meter level are 24.23%, 33.72% and 38.56%, respectively, and when the TMDs are installed on the top-floor are 30.68%, 41.28%, and 45.81%.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

بررسی تأثیر جرم و موقعیت ارتفاعی میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات ناشی از باد ساختمان‌های بلند*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.70265.1039

نهمت خدایی[۱]   حامد تیموری[۲]

چکیده *میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD از تجهیزات مهم برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها می‌باشد. مطالعات پیشین در زمینه تأثیر TMD برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها در مقابل باد، عمدتاً برای ویژگی‌های ثابتی از میراگر انجام شده است. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای جرم و ارتفاع محل نصب TMD در کنترل ارتعاشات طولی و عرضی ناشی از باد ساختمان‌های بلند مطالعه شد. برای این منظور، ساختمان بلندی با پلان مربع و ارتفاع ۴۰۰ متر به صورت تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها مدل‌سازی شد. ارتعاشات سازه در برابر باد به ازای محدوده وسیعی از پارامترهای مورد مطالعه، با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس و تئوری ارتعاشات تصادفی محاسبه شد. مطابق نتایج، با افزایش جرم میراگر، ارتعاشات سازه و TMD کاهش می‌یابد. برای مثال، کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی سازه برای میراگر جرمی ۱۰۰ و ۶۰۰ تنی واقع در تراز فوقانی، به ترتیب ۳۱ و ۴۸ درصد به دست آمد. با افزایش ارتفاع محل نصب TMD، تأثیر کنترلی آن افزایش و جابه‌جایی TMD تا حد کمی کاهش می‌یابد. به‌طور نمونه، برای میراگر جرمی ۳۰۰ تنی نصب شده در ارتفاع‌های ۳۲۰ و ۴۰۰ متری، کاهش شتاب عرضی سازه به ترتیب ۳۳/۷۲ و ۴۱/۲۸ درصد و انحراف معیار جابه‌جایی TMD به‌ترتیب ۵۸/۶۸ و ۵۴/۹۲ سانتی‌متر تعیین شد.*

واژه‌های کلیدی میراگر جرمی تنظیم شونده، ساختمان بلند، ارتعاشات ناشی از باد، پاسخ طولی باد، پاسخ عرضی باد.

Investigation of the Effect of the Mass and Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings

Nahmat Khodaie   Hamed Teimouri

Abstract *Tuned mass damper(TMD) is an efficient tool to control wind-induced vibrations of tall buildings. Previous studies on the effect of TMD are generally limited to specific conditions. In the present study, the effect of the mass and installation height of TMD on the wind-induced vibration control of tall buildings are investigated. An example of tall building with the height 400 m and square variable cross section is presented. The analytical model of the building is assumed as a multi-degrees-of-freedom vertical cantilever beam with the masses lumped at the nodes. The wind-induced responses of the structure are computed using the frequency domain analysis and the random vibration method for a wide range of studied parameters. The resultsindicated that the vibrations of the structure and TMD system decreases with increasing the mass of theTMD. For instance, the 100 and 600-ton TMD installed at top-floor reduced the top-floor crosswind acceleration by 31 and 48 percent, respectively. By increasing the installation height, the control effectiveness of the system increases, while the vibration of the TMD does not change considerably.For a 300-ton TMD installed at 320 and 400 m heights, the crosswind acceleration reduced by 33.72 and 41.28 percent and the RMS displacement of the TMD at these heights were 58.68 and 54.92 cm, respectively.*

Keywords Tuned mass damper, Tall building, Wind-induced vibrations, Cross wind, Along-wind.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۲/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۸/۲۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه آموزشی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خورموج.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آموزشی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خورموج.

Email: Nahmat.khodaie@iau.ac.ir

مقدمه و تاریخچه تحقیقات

کمبود زمین و ارزش بالای آن در شهرهای بزرگ، موجب افزایش تقاضا برای احداث ساختمان‌های مرتفع شده است. افزایش ارتفاع سازه‌ها، موجب لاغرتر شدن و افزایش دوره تناوب آنها و در نتیجه حساستر شدن ساختمان‌های مذکور نسبت به نیروی باد شده است. تأمین معیارهای جابه‌جایی و شتاب مجاز از معیارهای مهم در طراحی ساختمان‌های بلند محسوب می‌شود. حرکات ناشی از باد می‌تواند موجب ناآرامی و عصبی شدن ساکنان آن ساختمان‌ها شود که از علائم آن نگرانی، خشم، ترس یا سردرد می‌باشد. از اهداف مهم در کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند، به کاهش نیروهای داخلی ناشی از بارهای جانبی و اقتصادیتر شدن طرح، تأمین معیارهای بهره‌برداری، ارتقای ایمنی سازه، افزایش میرایی ساختمان و امکان احداث ساختمان‌های فوق بلند می‌توان اشاره نمود. شاخص دریفت به صورت نسبت برایند جابه‌جایی ماکزیمم در تراز فوقانی سازه به ارتفاع آن تعریف می‌شود. برای حفظ عملکرد پوشش و نمای ساختمان، این شاخص تحت نیروهای جانبی بدون ضریب به 1/400 تا 1/600 محدود می‌شود. شتاب ماکزیمم مجاز برای تأمین شرایط ایمنی معمولاً کمتر از ۲۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته می‌شود [1].

با توجه به اهمیت کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند در برابر نیروی جانبی باد، زمینه‌های متعددی برای کنترل ارتعاشات پیشنهاد شده است. در این بخش، برخی از مطالعات پیشین با محوریت استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده ارائه می‌شود. کریم و همکاران (۱۹۹۹) طی یک مطالعه مروری، تقسیم‌بندی جامعی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها ارائه نمودند که از آن جمله می‌توان به بهبود خواص آیرودینامیکی، کاهش نسبت جرمی هوا به سازه، افزودن تجهیزات میراگر غیرفعال مانند میراگرهای ویسکوالاستیکی، اصطکاکی، میراگر جرمی یا ستون مایع تنظیم شونده و روش‌های کنترل فعال اشاره نمود [2]. امین و آهوجا (۲۰۱۰) مطالعه مروری در زمینه اصلاحات آیرودینامیکی ساختمان انجام دادند و اصلاحات آیرودینامیکی ساختمان را به دو گروه اصلاحات جزئی و اساسی تقسیم نمودند. بریدگی و انحنای گوشه‌های ساختمان، نمونه‌هایی از اصلاحات جزئی هستند و عقب‌نشینی یا تغییر مقطع ساختمان در ارتفاع و بازشدگی در بالای ساختمان از اصلاحات اساسی به شمار می‌روند [3]. شارما و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه مشابهی در زمینه اصلاحات آیرودینامیکی ساختمان‌های بلند انجام دادند. استفاده از فرم‌های پیچشی ساختمان در ارتفاع، از روش‌های توسعه یافته جدید برای کاهش نیروهای باد از موارد معرفی شده در مطالعه مذکور می‌باشد [4].

استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده از راهکارهای کاربردی و مهم برای کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند است. قربانی تنها و رحیمیان (۲۰۰۹) کنترل ارتعاشات ناشی از باد برج میلاد را با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده مطالعه کردند. طبق این مطالعه، شتاب ناشی از باد در بخش فوقانی برج سازه در حالت کنترل نشده فراتر از حد مجاز آسایش ساکنان است و استفاده از میراگر جرمی ۶۰۰ تنی در محل گنبد آسمان برج، در شرایط بهینه، مقدار جابه‌جایی و شتاب سازه را به‌ترتیب ۵۶ و ۶۰ درصد کاهش می‌دهد [5]. لو و چن (۲۰۱۱) بهینه‌سازی و طراحی میراگر جرمی برای برج مرکزی شانگهای را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، از میراگر پاندولی دوگانه با دو جرم متمرکز برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده گردید. اشغال فضای کمتر به عنوان مزیتی برای میراگر دوگانه معرفی شد [6]. لیو و همکاران (۲۰۰۸) ارتعاشات ناشی از باد ساختمان بلند مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده را با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار دادند و اعلام نمودند در خاک‌های نرم، ارتعاشات سازه در اثر بارهای دینامیکی باد کمتر از حالت خاک سفت می‌باشد و قابلیت کنترل میراگر جرمی در خاک‌های نرم بیشتر از خاک‌های سفت است [7]. لیونگ و همکاران (۲۰۰۹) پارامترهای بهینه TMD را برای یک سازه یک درجه آزادی تحت بارگذاری خارجی و ارتعاش پایه که با نویز سفید گوسی مدل شده بودند به دست آوردند و فرمول‌هایی برای این مقادیر ارائه کردند [8].

استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده برای کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله نیز به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه ادریس طاها و همکاران در خصوص ارزیابی کارایی میراگر جرمی دو جهته و پیچشی برای کنترل پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های نامنظم [9]، تحقیق کوهدرق در زمینه ارزیابی تأثیر TMD بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن آرمه جدا سازی شده [10] و مطالعه محبی و همکاران در خصوص تأثیر TMD برای کاهش پاسخ سازه‌ها با رفتار غیرخطی تحت زلزله [11] نمونه‌ای از این مطالعات می‌باشد.

در سال‌های اخیر نوع جدیدی از سیستم کنترل ارتعاشات ساختمان‌های بلند معرفی شده است که دارای قابلیت خودکنترلی است و بخشی از جرم سازه اصلی را به عنوان جاذب ارتعاش به کار می‌گیرد. وانگ و همکاران[12] سیستم‌های سازه‌ای ساختمان بلند متشکل از هسته مرکزی و بخش‌های معلق را تحت نیروی زلزله مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم، نیاز به جرم اضافی نبوده و نسبت جرمی میراگر به سازه اصلی بیشتر از میراگرهای جرمی رایج می‌باشد. نتایج تحقیق مذکور موید قابلیت کنترل مناسب سیستم پیشنهادی در مقابل نیروی زلزله بود. خدائی و ایمانی[13] اثر روش خودکنترلی برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد برج نانجینگ در کشور چین را در مقابل نیروهای دینامیکی باد مطالعه نمودند و دریافتند این سیستم به طور مؤثری پاسخ شتاب سازه را کاهش می‌دهد و نقش مهمی در تأمین آسایش ساکنان در شرایط بحرانی نیروهای دینامیکی باد دارد.

مطالعات پیشین در زمینه اثر TMD برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها عموماً به‌ازای پارامترها و موقعیت نصب مشخصی از سیستم میراگر جرمی انجام گرفته است. در این مطالعه، تأثیر جرم و موقعیت ارتفاعی محل نصب TMD در کنترل ارتعاشات عرضی و طولی ناشی از باد ساختمان‌های بلند مورد مطالعه قرار گرفته است. سازه بلند به عنوان تیر طره‌ای قائم با جرم‌های متمرکز شده در گره‌ها مدل شده است و پاسخ سازه در حوزه فرکانس تعیین شده است. مقادیر بهینه TMD به‌ازای نسبت‌های جرمی مختلف و موقعیت ارتفاعی آن استخراج شده است. شتاب تراز فوقانی سازه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و تأثیر پارامترهای مختلف TMD شامل نسبت جرمی و موقعیت ارتفاعی آن در کارایی سیستم مورد ارزیابی و بحث و بررسی قرار گرفته است.

مدل تحلیلی و ماتریس تابع انتقال

رفتار ساختمان بلند تحت بارهای جانبی، مشابه تیر طره‌ای قائم و با مود غالب خمشی می‌باشد. این مدل رفتاری در مطالعات متعددی برای محاسبه پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند در برابر باد به‌کار گرفته شده است [14,15]. در این مطالعه نیز ساختمان بلند، مشابه تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها مدل شده است. معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت بارهای دینامیکی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}+\mathbf{K}\mathbf{X}=\mathbf{F} \tag{۱}$$

که در آن $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به‌ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی کلی، $\mathbf{X}$ بردار جابه‌جایی‌های گرهی و $\mathbf{F}$ بردار نیروهای خارجی می‌باشد. ماتریس سختی سازه با تجمیع اثر سختی المان‌های تیر محاسبه می‌شود و برای کاهش حجم محاسبات، از روش تراکم درجات آزادی دورانی استفاده می‌شود. جزئیات محاسبه ماتریس سختی و تراکم درجات آزادی و محاسبه ماتریس‌های جرم و سختی در مرجع [16] ارائه شده است.

ماتریس جرم متناظر با سیستم تراکم یافته، ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن، همان جرم‌های متمرکز در گره‌ها هستند. ماتریس میرایی ذاتی سازه با استفاده از روش تناسب و پس از تحلیل مودال سازه و محاسبه اشکال، جرم‌ها و فرکانس‌های مودی از روش زیر قابل تعیین است:

$$\begin{gathered}\mathbf{C}_s=\phi^{-T}A\phi^{-1}\\ A=\mathrm{diag}[2\mu_1\zeta_1\omega_1 \quad \dots \quad 2\mu_j\zeta_j\omega_j \quad \dots \quad 2\mu_n\zeta_n\omega_n]\end{gathered} \tag{۲}$$

ϕماتریس اشکال مودی و μ_j ، ζ_j و ω_j به‌ترتیب جرم، میرایی و فرکانس های مودی و A ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن میرایی‌های مودی هستند.

مدل تحلیلی ساختمان بلند مجهز به میراگر جرمی، برای حالتی که میراگر جرمی در تراز فوقانی سازه نصب شده است در شکل (۱) نشان داده شده است. میراگر جرمی به صورت سیستم تک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود که توسط مجموعه موازی جرم و فنر به سازه اصلی متصل می‌شود. پارامترهای نسبت سختی و میرایی TMD به نحوی تنظیم می‌شود که ارتعاشات سازه اصلی را به‌طور بهینه کاهش دهد. برای سازه بلند n درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده، ماتریس کلی جرم به صورت زیر قابل نوشتن می‌باشد:

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}[\mathbf{M}_{sr}]_{n\times n} & [0]_{n\times 1}\\ [0]_{1\times n} & m_{TMD}\end{bmatrix} \tag{۳}$$

که در آن، $\mathbf{M}_{sr}$ ماتریس جرم سازه اصلی و m_{TMD} جرم TMD می‌باشد. ماتریس سختی کل سازه برای حالت کلی که میراگر جرمی در تراز i ام به سازه متصل شده باشد به صورت زیر قابل تعیین است:

$$\mathbf{K}=\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s(1,1) & \mathbf{K}_s(1,2) & & \mathbf{K}_s(1,i) & & \mathbf{K}_s(1,n) & 0 \\ \mathbf{K}_s(1,2) & \mathbf{K}_s(2,2) & & \mathbf{K}_s(2,i) & & \mathbf{K}_s(2,n) & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \mathbf{K}_s(i,1) & \mathbf{K}_s(i,2) & \cdots & \mathbf{K}_s(i,i)+\mathrm{k_{TMD}} & \cdots & \mathbf{K}_s(i,n) & -\mathrm{k_{TMD}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \mathbf{K}_s(n,1) & \mathbf{K}_s(n,2) & & \mathbf{K}_s(n,i) & & \mathbf{K}_s(n,n) & 0 \\ 0 & 0 & & -\mathrm{k_{TMD}} & & 0 & +\mathrm{k_{TMD}} \end{bmatrix} \quad (٤)$$

$\mathbf{K}_{sr}$ ماتریس سختی کاهش یافته سازه و $\mathrm{k_{TMD}}$ سختی سیستم TMD هست. محاسبه ماتریس میرایی نیز مشابه ماتریس سختی انجام می‌پذیرد.

ماتریس تابع انتقال بین جابه‌جایی‌های سازه و نیروهای خارجی با تبدیل فوریه معادله (۱) به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\mathbf{H}(\omega)=(-\omega^2\mathbf{M}+\mathrm{j}\omega\mathbf{C}+\mathbf{K})^{-1} \quad (٥)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای و j واحد موهومی می‌باشد. $\mathbf{H}(\omega)$ ماتریس انتقال و یا ماتریس تابع پاسخ فرکانسی نامیده می‌شود. ماتریس تراکم طیفی پاسخ برای سیستم چند درجه آزادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{S_x}(\omega)=\mathbf{H}(\omega)\mathbf{S_f}(\omega)\mathbf{H}^*(\omega) \quad (٦)$$

که در آن $\mathbf{H}^*(\omega)$ مزدوج مختلطی ماتریس انتقال سازه و $\mathbf{S_f}(\omega)$ ماتریس تراکم طیفی نیروی تحریک می‌باشد. درنهایت، واریانس پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه برای درجه آزادی i ام با استفاده از انتگرال عددی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

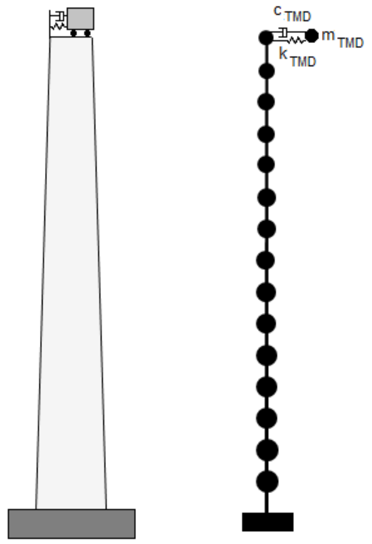
$$E[x_i^2]=\int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{ii}}(\omega)d\omega,\qquad E[\ddot{x}_i^2]=\int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 S_{x_{ii}}(\omega)d\omega \quad (٧)$$

در رابطه فوق، $\mathrm{S_{x_{ii}}}(\omega)$ عضو i ام روی قطر اصلی ماتریس تراکم طیفی پاسخ می‌باشد. انحراف معیار پاسخ نیز با جذرگیری از مقادیر واریانس پاسخ به دست می‌آید.

برای تعیین نسبت پاسخ ماکزیمم به انحراف معیار پاسخ، از ضریب اوج استفاده می‌شود. داونپورت عبارت زیر را برای ضریب اوج معرفی نمود [17]:

$$\mathrm{g}=\sqrt{2\ln(\nu \mathrm{T_0})}+\frac{0.577}{\sqrt{2\ln(\nu \mathrm{T_0})}} \quad (٨)$$

که g ضریب اوج، ν نرخ میانگین عبور از محور افقی با شیب مثبت در واحد زمان است که عموماً برابر با فرکانس مود اول سازه در نظر گرفته می‌شود و $\mathrm{T_0}$ زمان می‌باشد که مقدار آن ۳٦۰۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱ حالت کلی ساختمان بلند مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده در تراز فوقانی سازه و مدل تحلیلی آن

خصوصیات مهندسی باد و ماتریس طیف نیروهای طولی و عرضی باد

پاسخ ساختمان‌های بلند در برابر باد، شامل مؤلفه‌های طولی و عرضی باد می‌باشد. مؤلفه طولی شامل پاسخ استاتیکی و دینامیکی طولی می‌شود. سرعت باد در امتداد طولی به دو مؤلفه سرعت میانگین و نوسانی قابل تجزیه است. مؤلفه میانگین که مستقل از زمان فرض می‌شود، پاسخ استاتیکی طولی سازه را در پی دارد و مؤلفه نوسانی موجب ارتعاش سازه در امتداد طولی می‌شود. پاسخ

عرضی به ارتعاشات سازه در جهت عمود بر امتداد وزش باد گفته می‌شود. با عبور جریان از اطراف هر جسم هوابند، جریان‌های گردابی یا پیچک‌هایی در ناحیه پشت، در طرفین جسم شکل می‌گیرد. ریزش این جریان‌ها باعث تغییر الگوی فشار اطراف جسم و ایجاد نیروی عرضی می‌شود. فرکانس جریان‌های پیچشی وابسته به سرعت باد، عرض بادگیر و شکل مقطع عرضی سازه است. در این تحقیق، هر دو پاسخ طولی و عرضی سازه محاسبه می‌شود که مستلزم آن داشتن طیف نیروهای طولی و عرضی باد و پروفیل سرعت میانگین باد است که در ادامه ارائه می‌شوند.

پروفیل سرعت متوسط باد و نیروهای طولی و عرضی باد

تغییرات سرعت میانگین باد در لایه مرزی اتمسفر با قانون توانی یا لگاریتمی بیان می‌شود. حالت عمومی رابطه توانی به شکل زیر است:

$$U(z) = aU_b(\frac{z}{b})^{\alpha} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق a، b و α پارامترهای ناحیه‌ای و U_b سرعت مبنای باد می‌باشد که در اکثر آیین‌نامه‌ها به‌عنوان مقدار سرعت میانگین باد در ارتفاع ۱۰ متر در ناحیه باز، با یک دوره بازگشت معین تعریف می‌شود. مقادیر پارامترهای رابطه (۹) برای ناحیه مراکز شهرهای بزرگ دارای ساختمان‌های بلند با تراکم بالا، مطابق آیین‌نامه کانادا به این صورت است: a=۰/۶۳۲ ، b=۳۰ متر و a=۰/۳۶ [18]. مقدار ارتفاع گرادیان، که سرعت باد در ارتفاع بالاتر از آن ثابت فرض می‌شود، در ناحیه مذکور ۳۸۷ متر است.

سرعت باد در جهت طولی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \qquad (۱۰)$$

در این رابطه $\bar{U}$ سرعت میانگین و $u(t)$ مؤلفه نوسانی در امتداد طولی باد می‌باشد. نیروی پسا به‌صورت تابعی از زمان به صورت زیر است:

$$f_D(t) = \bar{f}_D + f'_D(t) \qquad (۱۱)$$

که $\bar{f}_D$ و f'_D به‌ترتیب بخش‌های میانگین و نوسانی نیروی پسا در واحد ارتفاع می‌باشند و از روابط زیر قابل تعیین هستند:

$$\bar{f}_D = 1/2\rho_a \bar{U}^2 C_D B \qquad (۱۲)$$

$$f'_D = \rho_a \bar{U} u(t) C_D B \qquad (۱۳)$$

ρ_a دانسیته هوا، U(z) سرعت میانگین باد در ارتفاع z، C_d ضریب پسا و B عرض سازه در جهت عمود بر امتداد باد است. تابع چگالی طیفی نیروی طولی باد از رابطه زیر به دست می‌آید [1].

$$S_{f_D}(n) = \rho_a^2 \bar{U}^2 B^2 D^2 C_D^2 S_u(n) \qquad (۱٤)$$

$S_u(n)$ چگالی طیفی مؤلفه نوسانی سرعت طولی باد می‌باشد.

نیروی عرضی باد در واحد ارتفاع سازه، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$F_S(z,t) = \frac{1}{2}\rho_a C_L(z,t) D(z) U^2(z) \qquad (۱۵)$$

که در آن D(z) و U(z) به‌ترتیب بعد مقابل باد و سرعت میانگین باد در ارتفاع z و $C_L(z,t)$ ضریب نیروی عرضی باد یا ضریب برا می‌باشد.

طیف نیروی طولی باد. محتوای فرکانسی نوسانات سرعت باد، با تابع تراکم طیفی نشان داده می‌شود. شکل تراکم طیفی به موقعیت و شرایط باد بستگی دارد. تابع طیف تراکم نوسانات سرعت طولی باد پیشنهادی توسط سیمیو[19] که وابسته به ارتفاع از سطح زمین می‌باشد، در مطالعات متعددی در زمینه پاسخ طولی ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گرفته است که فرمول آن به صورت زیر است:

$$S_u(z,n) = \frac{u_*^2}{n}\frac{200f}{[1+50f]^{5/3}} \qquad f = \frac{nz}{\bar{U}(z)} \qquad (١٦)$$

در رابطه فوق، z ارتفاع، f فرکانس کاهش یافته، n فرکانس تحریک، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین باد در ارتفاع مورد نظر و u_* سرعت اصطکاکی باد می‌باشد که از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$u_* = \sqrt{\kappa} U_b \qquad (۱۷)$$

κ ضریب پسای سطحی است که وابسته به زبری ناحیه است و U_b سرعت مبنای باد می‌باشد. همبستگی نوسانات سرعت باد بین دو نقطه، با افزایش فاصله آنها کاهش می‌یابد. ویکری [20] رابطه دوبعدی زیر را برای تابع همبستگی سرعت باد پیشنهاد داده است:

$$coh_{jk}(\omega) = exp\left\{ \frac{-|\omega|}{2\pi} \frac{\sqrt{c_z^2 (z_j - z_k)^2 + c_y^2 (y_j - y_k)^2}}{\frac{1}{2}[\bar{U}(z_j) + \bar{U}(z_k)]} \right\} \qquad (۱۸)$$

y و z به‌ترتیب مختصات افقی و ارتفاعی نقاط، ω فرکانس زاویه‌ای، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین باد و c_y و c_z ضرایب ثابت هستند.

طیف نیروی عرضی باد. برای تعیین ماتریس طیف نیروی عرضی باد از مطالعه لیانگ و همکاران[21] که روابط کاملی برای ساختمان‌های با مقطع عرضی مستطیل ارائه داده است استفاده شد. مطابق این مطالعه، برای ساختمان بلند با پلان نشان داده شده در شکل (۲)، طیف نیروی عرضی باد به‌ازای نسبت بعد $\frac{1}{2} \leq D/B < 2$ از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{nS(n)}{\sigma^2} = A \frac{H(C_1)}{(1-\bar{n}^2)^2 + C_1 \bar{n}^2} + (1-A) \frac{C_2^{0.5} \bar{n}^3}{1.56[(1-\bar{n}^2)^2 + C_2 \bar{n}^2]} \qquad (۱۹)$$

که n فرکانس تحریک، $\bar{n} = n/n_s$، $n_s = S_t U(z)/B$ فرکانس ریزش گردبادی، S_t عدد استروهال و σ انحراف معیار نیروی عرضی در ارتفاع z می‌باشد. مقادیر S_t و σ از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho_a U^2(z) \overline{C_L} B \qquad (۲۰)$$

$$S_t = 0.002(D/B)^2 - 0.023(D/B) + 0.105 \qquad (۲۱)$$

سایر پارامترهای رابطه (۱۹) به صورت زیر قابل تعیین هستند:

$$\overline{C_L} = 0.045(D/B)^3 - 0.335(D/B)^2 + 0.868(D/B) - 0.174 \qquad (۲۲)$$

$$H(C_1) = 0.179 C_1 + 0.65\sqrt{C_1} \qquad (۲۳)$$

$$C_1 = [0.47(D/B)^{2.8} - 0.52(D/B)^{1.4} + 0.24] /(\mathrm{H}/\sqrt{S}) \qquad (۲۴)$$

$$C_2 = 2 \qquad (۲۵)$$

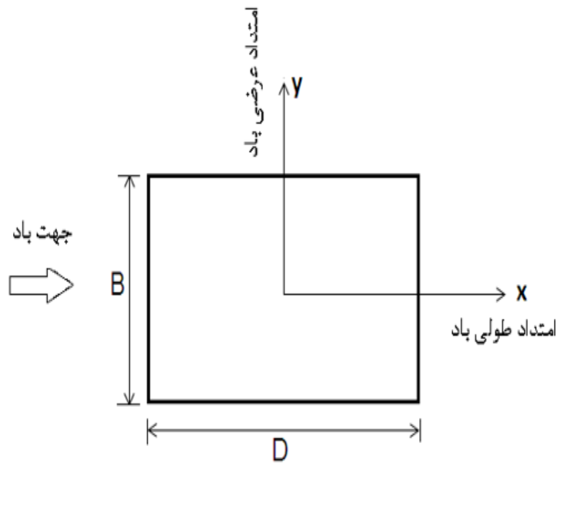
$$A = (\mathrm{H}/\sqrt{S})[-0.118(D/B)^2 + 0.358(D/B) - 0.214] + [0.066(\mathrm{D/B})^2 - 0.26(D/B) + 0.894] \qquad (۲۶)$$

در روابط فوق، نسبت $H/\sqrt{S}$ ضریب لاغری و $S = B \times D$ سطح مقطع عرضی ساختمان است.

ضریب همبستگی نیروهای عرضی باد بین دونقطه، که با افزایش فاصله بین نقاط کاهش می‌یابد، مطابق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\mathrm{coh}_{jk} = \exp\left[-\left(\frac{\Delta}{\alpha}\right)^2\right], \quad \Delta = \frac{|h_j - h_k|}{B} \qquad (۲۷)$$

h_j و h_k ارتفاع نقاط j و k می‌باشد و مقدار پارامتر α در رابطه فوق ۵/۵۶ است [21].



شکل ۲ پلان ساختمان و جهت باد

خصوصیات ساختمان بلند مورد مطالعه و مراحل تحلیل

برای مطالعه تأثیر پارامترهای میراگر جرمی در کنترل ارتعاشات ناشی از باد، مثالی از ساختمان بلند در نظر گرفته شد. مشخصات ابعادی و فیزیکی ساختمان از مطالعه خدایی (۲۰۲۰) استخراج گردید [22]. خصوصیات فیزیکی سازه، فرضیات مهندسی باد و مراحل انجام تحقیق در ادامه تشریح می‌شود.

ساختمان بلند در نظر گرفته شده به ارتفاع ٤۰۰ متر با مقطع عرضی مربعی است که ابعاد پلان آن در ترازهای تحتانی و فوقانی به ترتیب ۵۰ و ٤۰ متر می‌باشد. جرم حجمی ساختمان در این تحقیق، ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. مقدار ممان اینرسی سازه در تراز تحتانی ۷۳۱۷ متر به توان چهار و در تراز فوقانی ده درصد مقدار مذکور است. تغییرات ممان اینرسی در راستای قائم به صورت سهمی درجه ۲ در نظر گرفته شده است. جدول (۱) مشخصات سازه‌ای ساختمان را برای مدل ۲۵ درجه آزادی نشان می‌دهد. اطلاعات ارائه شده شامل ارتفاع، عرض، ممان اینرسی و سطح بادگیر در گره‌ها است. تعداد گره‌های سازه ۲۵ عدد در نظر گرفته شد که با توجه به ارتفاع ٤۰۰ متری ساختمان، فاصله گره‌ها از هم ١٦ متر است. مقدار میرایی سازه برای مود ارتعاشی نخست با فرض ساختمان فولادی، یک درصد در نظر گرفته شد و نسبت‌های میرایی متناظر برای مودهای ارتعاشی بالا با رابطه ارائه شده توسط کریم (۱۹۹٦) محاسبه شد [23].

اطلاعات آیرودینامیکی انتخاب شده به این شرح است:

دانسیته هوا ۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، پارامترهای پروفیل ارتفاعی سرعت میانگین باد برای مراکز شهرهای بزرگ بر مبنای آیین نامه کانادا [18]: a=۰/٦۳۲، b=۳۰ متر و α=۰/۳٦، ارتفاع گرادیان ۳۸۷ متر و ضریب پسا برای ساختمان‌های مستطیلی بلند برابر ۱/۳ می‌باشد.

برای انجام تحلیل‌های مورد نیاز در این تحقیق، از نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. با توجه به هدف تحقیق، مراحل برنامه تهیه شده به صورت زیر است:

- تعریف مشخصات ابعادی ساختمان.
- تعریف مشخصات مصالح از جمله مدول الاستیسیته، جرم حجمی ساختمان و میرایی ذاتی ساختمان.
- مشخص نمودن موقعیت گره‌های مدل سازه.
- تعیین ماتریس جرم سازه.
- تعیین ماتریس سختی المان‌های تیر.
- تعیین ماتریس سختی کلی سازه و اعمال شرایط مرزی.
- تراکم درجات آزادی دورانی در درجات انتقالی.
- تحلیل مودی سازه و تعیین ماتریس میرایی سازه.
- تعیین سرعت متوسط باد در گره‌ها بر اساس قانون توانی توزیع سرعت باد.
- تعریف مشخصات میراگر جرمی تنظیم شونده و محاسبه ماتریس‌های عمومی جرم، سختی و میرایی.
- تعیین ماتریس انتقال سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده.
- تعریف ماتریس طیف تراکم سرعت طولی و عرضی باد و نیروهای دینامیکی مربوط.
- بهینه‌سازی میراگر جرمی تنظیم شونده.
- محاسبه انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب عرضی و طولی سازه بر مبنای تحلیل حوزه فرکانس.
- بررسی تأثیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات ناشی از باد.

تحلیل و نتایج

با استفاده از روش تحلیل و فرضیات ارائه شده در بخش‌های پیشین، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی طولی و عرضی برای حالات کنترل نشده و کنترل شده محاسبه شد. فرضیات تکمیلی و نتایج هر حالت در ادامه تشریح می‌شود. با توجه به اینکه پاسخ ماکزیمم ناشی از باد در تراز فوقانی سازه اتفاق می‌افتد، انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب در موقعیت مذکور به عنوان مبنای بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی و مقایسه تأثیر سیستم‌های مورد مطالعه، قابلیت کنترل TMD به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$C_O = \left(\frac{\sigma_u - \sigma_c}{\sigma_u} \right) * 100 \quad (۲۸)$$

که σ_u انحراف معیار پاسخ تراز فوقانی در حالت کنترل نشده و σ_c مقدار پاسخ مذکور در حالت کنترل شده است. برای حصول دقت مناسب پاسخ دینامیکی سازه و همچنین برای پرهیز از حجم بالای محاسبات، بر اساس توصیه انجام شده در مطالعات پیشین [16,22] تعداد گره‌های مدل تحلیلی سیستم، ۲۵ عدد در نظر گرفته شد. در نتیجه، فاصله گره‌ها در راستای قائم ١٦ متر خواهد بود.

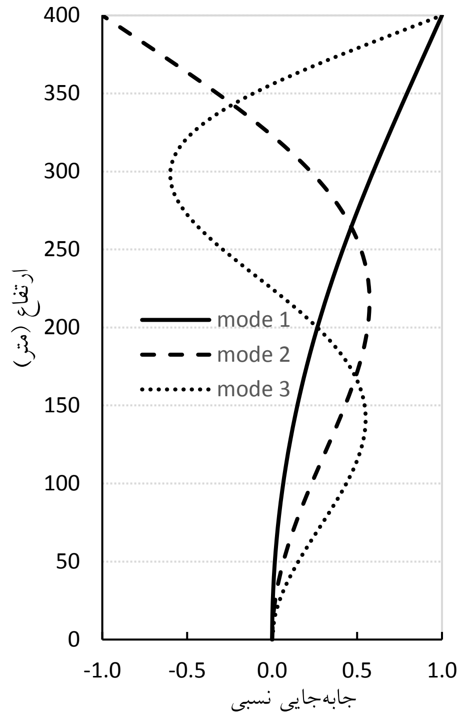
جدول ۱ اطلاعات مدل تحلیلی ساختمان بلند مورد مطالعه

ردیف	ارتفاع (m)	عرض (m)	ممان اینرسی (m^4)	سطح بادگیر (m^2)	جرم (تن)
1	16	49.6	6797.0	793.6	7872.6
2	32	49.2	6302.1	787.2	7746.1
3	48	48.8	5828.2	780.8	7620.7
4	64	48.4	5375.3	774.4	7496.2
5	80	48	4943.6	768.0	7372.8
6	96	47.6	4532.9	761.6	7250.5
7	112	47.2	4143.3	755.2	7129.1
8	128	46.8	3774.7	748.8	7008.8
9	144	46.4	3427.2	742.4	6889.5
10	160	46	3100.7	736.0	6771.2
11	176	45.6	2795.3	729.6	6654.0
12	192	45.2	2511.0	723.2	6537.8
13	208	44.8	2247.7	716.8	6422.6
14	224	44.4	2005.5	710.4	6308.4
15	240	44	1784.4	704.0	6195.2
16	256	43.6	1584.3	697.6	6083.1
17	272	43.2	1405.3	691.2	5972.0
18	288	42.8	1247.3	684.8	5861.9
19	304	42.4	1110.4	678.4	5752.9
20	320	42	994.6	672.0	5644.8
21	336	41.6	899.8	665.6	5537.8
22	352	41.2	826.1	659.2	5431.9
23	368	40.8	773.4	652.8	5326.9
24	384	40.4	741.8	646.4	5223.0
25	400	40	731.3	320.0	2572.8

ساختمان بلند در حالت کنترل نشده. در این قسمت، بخشی از نتایج مقدماتی شامل اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی، جابه‌جایی استاتیکی و کنترل صحت برنامه و همچنین انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب طولی و عرضی سازه در حالت کنترل نشده ارائه می‌شود.

اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی. تعیین اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی از مراحل مهم تحلیل دینامیکی سازه است که از کاربردهای آن، به تعیین ماتریس میرایی ذاتی سازه می‌توان اشاره نمود. تعداد اشکال مودی برای سازه مورد نظر با تعداد درجات آزادی مدل تحلیلی برابر است. لذا برای سازه مورد بررسی، تعداد ۲۵ شکل مودی و فرکانس طبیعی به‌دست آمد.

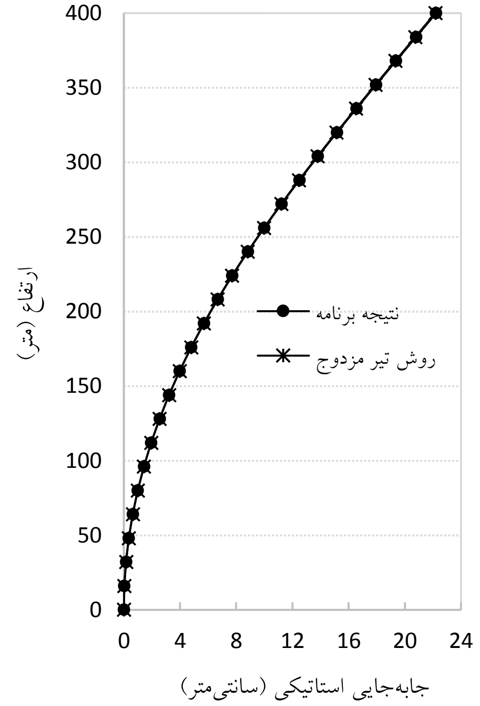
شکل (۳) اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی سیستم را برای سه مود اول نشان می‌دهد. فرکانس‌های طبیعی سه مود اول، به ترتیب ۱/۱۴۶، ۵/۵۳۲ و ۱۳/۴۴۳ رادیان بر ثانیه است.



شکل ۳ اشکال مودی و فرکانس‌های زاویه‌ای سه مود اول ارتعاشی سازه

جابه‌جایی استاتیکی و کنترل صحت برنامه. جابه‌جایی استاتیکی سازه در اثر مؤلفه میانگین سرعت باد در امتداد طولی ایجاد می‌شود. نیروی استاتیکی باد با مجذور سرعت میانگین باد متناسب است و مطابق رابطه (۱۲)، مقدار نیروی استاتیکی باد با افزایش ارتفاع از سطح زمین بیشتر می‌شود. طبق برنامه تهیه شده، تغییر شکل استاتیکی سازه با حاصل ضرب معکوس ماتریس سختی در بردار نیروهای استاتیکی باد به دست می‌آید. از مهمترین مشخصه‌های مدل تحلیلی سازه، ماتریس سختی آن است لذا، از عوامل مهم در صحت برنامه، دقیق بودن ماتریس سختی است که در پاسخ دینامیکی سازه نیز نقش اساسی دارد. برای کنترل دقت برنامه در محاسبه ماتریس سختی سازه و تغییر شکل استاتیکی آن، از روش تیر مزدوج که از روش‌های پایه‌ای در تحلیل سازه است، استفاده شد و تغییر شکل محاسبه شده توسط برنامه، با تغییر شکل حاصل از روش تیر مزدوج (محاسبه شده تو سط نرم‌افزار اکسل) مورد مقایسه قرار گرفت. مراحل روش تیر مزدوج برای سازه مورد نظر به این صورت است:

تعیین شدت نیروی وارده، تر سیم دیاگرام نیروی بر شی و لنگر خمشی، تقسیم مقادیر لنگر خمشی بر سختی خمشی سازه EI، ترسیم تیر مزدوج سازه و اعمال دیاگرام M/EI بر روی آن و در نهایت تعیین لنگر خمشـــی در تیر مزدوج که معادل با خیز در سازه اصلی می‌باشد.



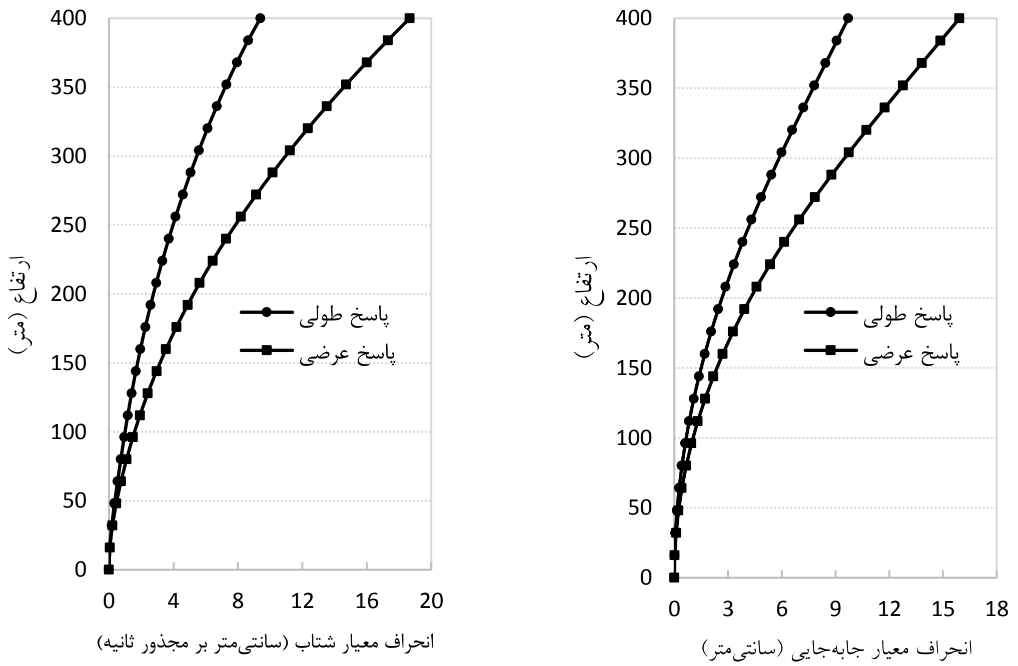
شکل ٤ توزیع جابه‌جایی استاتیکی ناشی از باد در راستای ارتفاعی سازه بر مبنای برنامه و روش تیر مزدوج

شکل (٤) توزیع ارتفاعی جابه‌جایی استاتیکی سازه را با بر مبنای نتیجه برنامه و روش تیر مزدوج نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج دو منحنی خیلی نزدیک به هم هستند و بر روی هم منطبق شده‌اند. جابه‌جایی استاتیکی تراز فوقانی سازه با روش تیر مزدوج ۲۲/۱۷ سانتی‌متر و با برنامه ۲۲/۲۲ سانتی‌متر به‌دست آمده است که اختلاف این دو عدد ۰/۰۵ سانتی‌متر و معادل با ۰/۲ درصد مقدار جابه‌جایی است. در روش تیر مزدوج، برای ترسیم دیاگرام‌های نیروی برشی، لنگر خمشی و تغییر شکل تیر، از روش معادل‌سازی ذوزنقه‌ای برای تعیین مساحت‌ها استفاده شده است، در صورتی که در برنامه تهیه شده از قابلیت انتگرال‌گیری عددی نرم‌افزار استفاده شده است و می‌توان گفت برنامه تهیه شده، نسبت به روش تیر مزدوج، از دقت بالاتری برخوردار است.

پاسخ دینامیکی سازه کنترل نشده. شکل (۵) توزیع ارتفاعی انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب سازه را در اثر نیروهای طولی و عرضی باد نشان می‌دهد. مقدار انحراف معیار جابه‌جایی طولی و عرضی تراز فوقانی سازه به‌ترتیب ۹/۷۱ و ۱۵/۹۲ سانتی‌متر و شتاب طولی و عرضی به ترتیب ۹/۳۹ و ۱۸/٦٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. مطابق این نتیجه، جابه‌جایی و شتاب عرضی سازه به ترتیب ٦٤ و ۹۹ درصد بیش از پاسخ‌های متناظر طولی می‌باشند. طبق رابطه (۸) و با توجه به اینکه فرکانس اصلی سازه ۰/۱۸۲ هرتز است، ضریب اوج ۳/۷٦ به‌دست می‌آید. لذا، مقدار بیشینه شتاب عرضی سازه حدود ۷۰/۲ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه خواهد بود که فراتر از حد آسایش ساکنان (حدود ۲۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه) است. جابه‌جایی طولی کل سازه در تراز فوقانی با جمع نمودن جابه‌جایی دینامیکی بیشینه و جابه‌جایی استاتیکی به دست می‌آید که مقدار آن حدود ۵۸/۷ سانتی‌متر خواهد بود. جابه‌جایی عرضی بیشینه نیز ۵۹/۸٦ سانتی‌متر می‌باشد. در صورتی که برآیند جابه‌جایی طولی و عرضی بیشینه را با روش جذر مربعات محاسبه کنیم، مقدار برایند جابه‌جایی بیشینه ۸۳/۸۳ سانتی‌متر به‌دست می‌آید که مقدار آن در محدوده مجاز جابه‌جایی قرار دارد.

توزیع پاسخ‌های مذکور در ارتفاع سازه به صورت سهموی هست و با افزایش ارتفاع از سطح زمین، ارتعاشات سازه با توان ۲ افزایش می‌یابد، لذا کنترل ارتعاشـــات در ترازهای فوقانی از اهمیت بالایی برخوردار است.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و مقدمات ارائه شده برای سازه کنترل نشده، در ادامه نتایج حاصل از به کارگیری سیستم TMD جهت کنترل ارتعاشات طولی و عرضی سازه در شرایط مختلف ارائه می شود. ضمناً با توجه به اینکه ارتعاشات عرضی بیش از ارتعاشـــات طولی اســـت، تمرکز عمده مباحث در زمینه کنترل ارتعاشات عرضی می‌باشد.



شکل ۵ تغییرات انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب طولی و عرضی در راستای ارتفاعی سازه کنترل نشده

ساختمان بلند مجهز به سیستم TMD. در این بخش، پاسخ دینامیکی ساختمان بلند مورد مطالعه در حالت مجهز به سیستم میراگر جرمی برای مقادیر مختلف جرم میراگر و ترازهای ارتفاعی محل نصب آن ارائه شده است. نسبت فرکانسی و میرایی سیستم TMD به صورت زیر تعریف شده است:

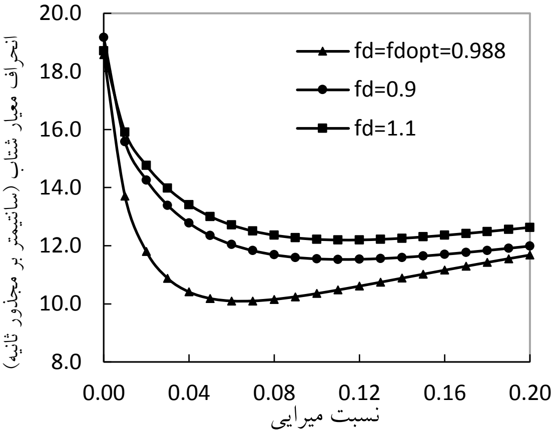
$$f_d = \omega_d/\omega_n \quad \text{و} \quad \zeta_d = c_d/(2m_d\omega_n) \qquad (۱۸)$$

که m_d، c_d و ω_d به ترتیب جرم، میرایی و فرکانس سیستم TMD و ω_n کمترین فرکانس طبیعی ساختمان می‌باشد.

عملکرد TMD به پارامترهای نسبت فرکانسی و نسبت میرایی وابسته است. برای مشخصات ثابت سازه‌ای و مهندسی باد و جرم معین TMD، پارامترهای مذکور بایستی به نحوی انتخاب شوند که تابع هدف مورد نظر، از قبیل انحراف معیار جابه‌جایی یا شتاب تراز فوقانی سازه کمینه شود. پارامترهای بهینه، عموماً تابعی از جرم میراگر هستند. برای کمینه کردن تابع هدف، از تابع کمینه‌یاب متلب با عنوان fminsearch استفاده شد. برای استفاده از این دستور، تابع هدف و پارامترهای متغیر معرفی می‌شوند و کمینه یاب متلب، تغییرات تابع هدف را به ازای متغیرهای تابع بررسی نموده و با عملیات جستجو، نقطه بهینه مربوط به پاسخ حداقل را می‌یابد. با توجه به اینکه، برای ساختمان مورد مطالعه، کنترل شتاب سازه از اهمیت بالاتری برخوردار است، لذا شتاب تراز فوقانی به عنوان تابع هدف معرفی شد. در این بخش، نتایج حاصل از به کارگیری TMD در مرحله نخست به ازای یک میراگر جرمی ثابت نصب شده در تراز فوقانی تشریح می‌شود و در ادامه تأثیر جرم TMD و موقعیت ارتفاعی محل نصب آن در کنترل ارتعاش سازه تشریح می‌شود.

بررسی تأثیر میراگر جرمی ۵۰۰ تنی واقع در تراز فوقانی. در این قسمت تأثیر یک میراگر جرمی تنظیم شونده ۵۰۰ تنی که در تراز فوقانی سازه نصب گردیده بررسی می‌شود و پارامترهای بهینه و مقدار متناظر قابلیت کنترل ارتعاشات سیستم تعیین می‌شود. برای میراگر جرمی مذکور، مقادیر بهینه نسبت فرکانسی و نسبت میرایی با فرض تابع هدف شتاب عرضی تراز فوقانی سازه با استفاده از تابع کمینه‌یاب متلب به ترتیب ۰/۹۸۸ و ۰/۰۶۵ تعیین شدند. به ازای شرایط بهینه، مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب تراز فوقانی به‌ترتیب ۱۰/۶۳ سانتی‌متر و ۱۰/۰۹ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است که در مقایسه با سازه کنترل نشده به‌ترتیب ۳۳/۲ و ۴۵/۹۳ درصد کاهش نشان می‌دهند. شکل (٦) تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی سازه را به ازای سه نسبت فرکانسی

مختلف شامل مقدار بهینه، ۰/۹ و ۱/۱ در برابر نسبت‌های میرایی مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در حالتی که ضریب میرایی صفر است، میراگر جرمی نقشی در کنترل ارتعاشات سازه ندارد. با افزایش میرایی، پاسخ سازه کاهش می‌یابد و در یک مقدار مشخصی از نسبت میرایی، به حداقل می‌رسد و پس از افزایش نسبت میرایی از مقدار بهینه، پاسخ سازه افزایش می‌یابد. لذا انتخاب صحیح پارامترهای میراگر جرمی، نقش مهمی در کنترل ارتعاشات سازه دارد. مقدار نسبت میرایی بهینه در این شکل با مقدار به دست آمده توسط تابع کمینه یاب متلب مطابقت دارد. مطابق شکل، با افزایش یا کاهش نسبت فرکانسی در مقایسه با مقدار بهینه، پاسخ سازه نسبت به مقدار بهینه بیشتر می‌شود.



شکل ۶ تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی تراز فوقانی سازه به ازای میراگر ۵۰۰ تنی و نسبت‌های میرایی و فرکانسی مختلف

تأثیر جرم TMD نصب شده در تراز فوقانی در قابلیت کنترل ارتعاش سازه. به منظور ارزیابی تأثیر جرم TMD در کنترل ارتعاشات سازه، انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب عرضی و طولی تراز فوقانی سازه به ازای مقادیر مختلف جرم میراگر در محدوده صفر تا ۶۰۰ تن در حالت نصب شده در تراز فوقانی سازه محاسبه شد. به ازای هر کدام از مقادیر جرم TMD، نسبت‌های بهینه سیستم، انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب تراز فوقانی سازه و انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب TMD محاسبه شد. جدول (۲) مقادیر جرم میراگر را به همراه پارامترهای تشریح شده برای کنترل ارتعاشات عرضی و جدول (۳) نتایج را برای کنترل ارتعاشات طولی نشان می‌دهد. مطابق این جداول، نسبت فرکانسی بهینه، نزدیک به عدد یک است و با افزایش جرم کاهش می‌یابد. میرایی بهینه برای محدوده جرمی بررسی شده، حدوداً بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ است و مقدار آن با افزایش جرم TMD بیشتر می‌شود. با افزایش جرم TMD پاسخ سازه و TMD کاهش می‌یابد. مطابق جدول (۲)، انحراف معیار شتاب عرضی سازه کنترل نشده ۱۸/۶۶ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. با استفاده از میراگر جرمی ۶۰۰ تنی در تراز فوقانی، کمیت مذکور به مقدار ۹/۷۹ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه کاهش می‌یابد که معادل با کاهش ۴۷/۵۳ درصدی است. طبق جدول (۳) کاهش شتاب طولی به ازای میراگر ۶۰۰ تنی حدود ۴۶ درصد است. مقایسه مقادیر پاسخ سازه در جداول (۲ و ۳) نشان می‌دهد ارتعاشات عرضی سازه در حالات کنترل شده و کنترل نشده بیش از ارتعاشات طولی است، به همین دلیل، ادامه نتایج با تمرکز بیشتری بر روی پاسخ عرضی ارائه می‌شود.

جدول ۲ پارامترهای بهینه سیستم TMD نصب شده در تراز فوقانی و پاسخ‌های متناظر عرضی سازه و TMD

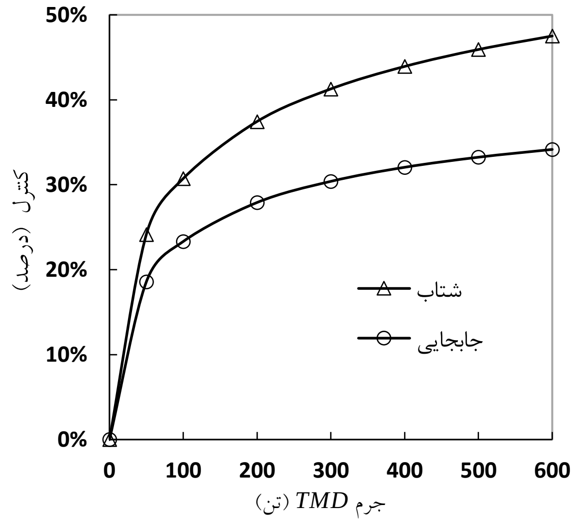
جرم TMD (تن)	پارامترهای بهینه TMD		پاسخ تراز فوقانی سازه		پاسخ TMD	
	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	$\sigma_{x_{cr}}$(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_{cr}}$(cm/s^2)	σ_{x_T}(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_T}$(cm/s^2)
0			15.925	18.660		
50	0.9988	0.0205	12.967	14.151	160.43	208.56
100	0.9972	0.0286	12.210	12.924	107.41	138.43
200	0.9956	0.0409	11.480	11.672	70.23	88.97
300	0.9930	0.0501	11.084	10.956	54.92	68.37
400	0.9910	0.0579	10.820	10.463	46.20	56.49
500	0.9887	0.0649	10.631	10.091	40.54	48.68
600	0.9861	0.0710	10.485	9.794	36.56	43.13

جدول ۳ پارامترهای بهینه سیستم TMD نصب شده در تراز فوقانی و پاسخ‌های متناظر طولی سازه و TMD

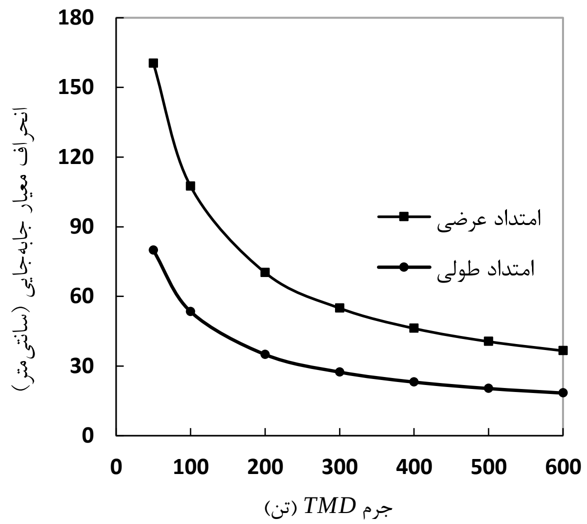
جرم TMD (تن)	پارامترهای بهینه TMD		پاسخ تراز فوقانی سازه		پاسخ TMD	
	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	$\sigma_{x_{al}}$(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_{al}}$(cm/s2)	σ_{x_T}(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_T}$(cm/s2)
0			9.713	9.394		
50	0.9992	0.0190	8.548	7.176	79.84	103.74
100	0.9986	0.0265	8.264	6.574	53.44	68.75
200	0.9971	0.0371	7.994	5.961	34.97	44.06
300	0.9956	0.0452	7.849	5.611	27.39	33.76
400	0.9941	0.0521	7.753	5.369	23.09	27.80
500	0.9927	0.0580	7.684	5.187	20.30	23.89
600	0.9913	0.0634	7.630	5.041	18.36	21.09

شکل (۷) تغییرات کنترل شتاب و جابه‌جایی عرضی تراز فوقانی سازه را در مقابل جرم TMD نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار کاهش شتاب بیشتر از کاهش جابه‌جایی است. برای مثال، به ازای میراگر ۶۰۰ تنی، کاهش شتاب عرضی سازه ۴۸ و جابه‌جایی عرضی ۳۴ درصد است. همچنین، درصد کاهش پاسخ سازه با افزایش جرم میراگر بیشتر می‌شود، با این‌حال، شیب منحنی‌ها با افزایش جرم TMD کاهشی است و این نتیجه نشان می‌دهد که به دست آوردن کاهش پاسخ بیشتر، نیاز به میراگر جرمی خیلی سنگین‌تری دارد. از طرف دیگر، افزایش جرم TMD موجب افزایش وزن سازه و نیروهای داخلی آن خواهد شد. لذا، جرم میراگر بایستی به نحوی انتخاب شود که ضمن حصول قابلیت کنترل مناسب از غیراقتصادی شدن طرح اجتناب شود.

از عوامل مهم دیگر در به‌کارگیری سیستم TMD، فضای مورد نیاز برای حرکات ارتعاشی آن می‌باشد. شکل (۸) انحراف معیار جابه‌جایی TMD در حالات کنترل ارتعاشات عرضی و طولی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود، جابه‌جایی TMD در حالت کنترل ارتعاشات عرضی از مقدار مربوطه در حالت کنترل ارتعاش طولی بزرگتر است. همچنین، جابه‌جایی TMD با افزایش جرم آن کاهش می‌یابد. به طور مثال، مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی سیستم TMD در جهت عرضی به ازای مقادیر جرم ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ تن به ترتیب ۱۰۷/۴۱، ۵۴/۹۲ و ۳۶/۵۶ سانتی‌متر است. برای تخمین دامنه جابه‌جایی ماکزیمم TMD از ضریب اوج، مطابق رابطه (۸) می‌توان استفاده نمود که مقدار آن برای سازه مورد نظر ۳/۷۶ به‌دست می‌آید. به‌طور مثال، انحراف معیار جابه‌جایی میراگر جرمی ۶۰۰ تنی برای کنترل ارتعاشات عرضی سازه، ۳۶/۵۶ سانتی‌متر و دامنه بیشینه آن ۱۳۷/۴۶ سانتی‌متر خواهد بود. لذا، در صورتی که محدودیتی در فضای محل نصب TMD وجود داشته باشد، استفاده از میراگرهای با جرم بالاتر مؤثرتر خواهد بود.



شکل ۷ تغییرات کنترل جابه‌جایی و شتاب **عرضی** تراز فوقانی سازه در مقابل جرم TMD

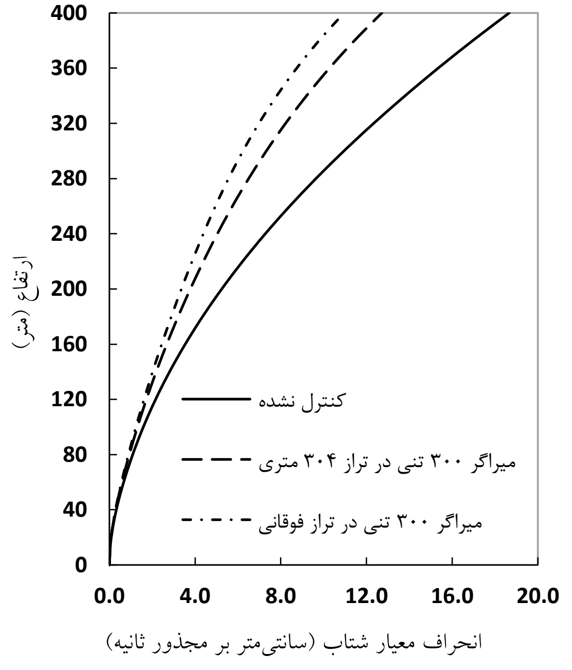


شکل ۸ تغییرات انحراف معیار جابه‌جایی TMD در مقابل جرم آن

تأثیر موقعیت ارتفاعی TMD در کاهش ارتعاشات ناشی از باد. به منظور بررسی تأثیر موقعیت ارتفاعی سیستم TMD در کاهش پاسخ دینامیکی سازه، پاسخ عرضی تراز فوقانی سازه به ازای سه میراگر جرمی ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی در حالات نصب شده در گره‌های پانزدهم تا گره فوقانی، معادل با محدوده ارتفاعی ۲٤۰ تا ٤۰۰ متری، محاسبه شد.

جدول (٤) نتایج را برای میراگر ۳۰۰ تنی نشان می‌دهد. نسبت‌های میرایی و فرکانسی بهینه و مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب عرضی تراز فوقانی سازه و TMD در این جدول ارائه شده است. مطابق این جدول، نسبت میرایی بهینه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD افزایش می‌یابد. به طور مثال، نسبت میرایی متناظر با ارتفاع‌های ۲٤۰ و ٤۰۰ متری به ترتیب، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۵۰۱ است. پاسخ تراز فوقانی با افزایش ارتفاع محل نصب TMD کاهش می‌یابد. به طور مثال، انحراف معیار شتاب عرضی تراز فوقانی، به ازای موقعیت TMD در تراز ۲٤۰ و ٤۰۰ متری به‌ترتیب ١٤/٣٦ و ١۰/٩٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است که معادل با کنترل ۲۳ و ٤١/٢٦ درصدی هستند. انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب TMD با افزایش ارتفاع محل نصب آن کاهش می‌یابد ولی مقدار تغییرات آن نسبتاً کم می‌باشد. به طور مثال، انحراف معیار جابه‌جایی TMD در ارتفاع‌های۲٤۰ و ٤۰۰ متری به ترتیب ٦٦/٤٤ و ٥٤/٩٢ سانتی‌متر است که نشان می‌دهد جابه‌جایی سیستم TMD در ارتفاع نصب ۲٤۰ متری، ۲١ درصد بیشتر از حالت نصب شده در تراز فوقانی است.

شکل (۹) تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی سازه را در مقابل ارتفاع به ازای سه حالت کنترل نشده و کنترل شده با TMD سیصد تنی واقع در ترازهای ارتفاعی ۳۰٤ متری (گره نوزدهم) و ٤۰۰ متری نشان می‌دهد. مطابق این شکل، حالت کلی تغییر شکل ساختمان در هر سه حالت مشابه هم و مانند مود ارتعاشی اول سازه است. در نتیجه تغییر موقعیت ارتفاعی TMD تغییری در فرم تغییر شکل ساختمان نشان نمی‌دهد. انحراف معیار شتاب تراز فوقانی در حالت کنترل نشده ١٨/٦٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و در موقعیت ارتفاعی میراگر ۳۰٤ و ٤۰۰ متری به ترتیب ١٢/٧٢ و ١۰/٩٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است؛ لذا کاهش شتاب عرضی سازه برای TMD سیصد تنی در موقعیت‌های ارتفاعی ۳۰٤ و ٤۰۰ متری به ترتیب ٣١/٨٣ و ٤١/٢٦ درصد است، و به بیانی دیگر، کاهش شتاب عرضی سازه به ازای نصب TMD در تراز فوقانی، حدود ٢٩/٦ درصد بیشتر از حالت نصب TMD در تراز ۳۰٤ متری است.



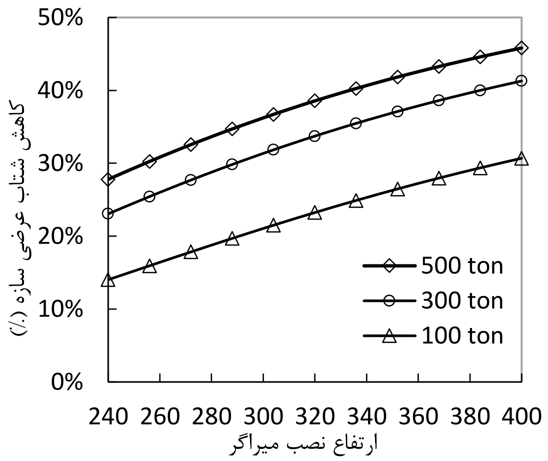
شکل ۹ تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی تراز فوقانی سازه در حالات کنترل نشده و کنترل شده با TMD ۳۰۰ تنی نصب شده در ترازهای ارتفاعی ۳۰٤ و ٤۰۰ متری

جدول ٤ پارامترهای بهینه TMD ۳۰۰ تنی نصب شده در ترازهای ارتفاعی مختلف و پاسخ‌های عرضی سازه و TMD

پاسخ TMD		پاسخ تراز فوقانی سازه		پارامترهای بهینه TMD		موقعیت ارتفاعی TMD
$\sigma_{\ddot{x}_T}$(cm/s^2)	σ_{x_T}(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_{cr}}$(cm/s^2)	$\sigma_{x_{cr}}$(cm)	$\zeta_{d_{opt}}$	$f_{d_{opt}}$	
86.46	66.44	14.36	13.09	0.0191	0.9992	240
84.31	64.93	13.91	12.82	0.0219	0.9989	256
82.31	63.56	13.49	12.56	0.0247	0.9984	272
80.65	62.47	13.09	12.31	0.0274	0.9980	288
78.73	61.20	12.72	12.09	0.0304	0.9975	304
76.45	59.68	12.37	11.88	0.0339	0.9969	320
74.85	58.71	12.04	11.69	0.0368	0.9962	336
73.08	57.62	11.74	11.51	0.0401	0.9955	352
71.43	56.64	11.46	11.35	0.0434	0.9947	368
69.86	55.75	11.20	11.21	0.0467	0.9939	384
68.34	54.92	10.96	11.08	0.0501	0.9930	400

شکل (۱۰) تغییرات درصد کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی سازه را به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع محل نصب TMD و جرم‌های میراگر ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، کاهش شتاب سازه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD بیشتر می‌شود. نسبت افزایشی کنترل سیستم برای TMD های سبکتر بیشتر است. به طور مثال برای میراگرهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی برای حالتی که میراگرها در تراز ۳۲۰ متری نصب شده باشند به ترتیب ۲۳/۲٤، ۳۳/۷۲ و ۳۸/٥٦ درصد و در حالتی که میراگر در تراز فوقانی نصب شده باشد به ترتیب ۳۰/٦۸، ٤۱/۲۸ و ٤٥/۸۱ درصد است. لذا، درصد کاهش پاسخ سازه به ازای TMDهای سبکتر حساسیت بیشتری نسبت به موقعیت ارتفاعی محل نصب TMD دارند.

در مجموع می‌توان گفت تراز فوقانی سازه موقعیت مناسبتری برای حصول حداکثر کاهش پاسخ سازه است. با این حال، در صورت وجود محدودیت می‌توان سیستم TMD را در ترازهای پایینتر نیز نصب نمود که در این صورت TMD های سنگینتر به دلیل وابستگی کمتر به تراز ارتفاعی در مقایسه با TMD های سبکتر عملکرد مناسبتری دارند. علاوه بر موضوع فوق، با افزایش جرم TMD، دامنه ارتعاش آن کاهش می‌یابد که به عنوان امتیازی برای آن محسوب می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی به ازای تغییر موقعیت ارتفاعی نصب و مقادیر مختلف جرم TMD

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات دینامیکی ناشی از باد ساختمان‌های بلند در امتداد عرضی و طولی باد مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر جرم TMD و موقعیت ارتفاعی محل نصب آن در کاهش ارتعاش سازه بررسی شد. برای این منظور، مثالی از ساختمان بلند با ارتفاع ٤۰۰ متر با پلان مربعی به ابعاد ٥۰ و ٤۰ متر به ترتیب در ترازهای تحتانی و فوقانی ارائه شد. مدل تحلیلی سازه به صورت سیستم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها در نظر گرفته شد و رفتار سازه به صورت تیر طره‌ای قائم با المان‌های تیر فرض شد. در حالت نصب TMD در تراز فوقانی سازه، جرم آن بین صفر تا ٦۰۰ تن فرض شد و به منظور بررسی تأثیر موقعیت ارتفاعی

محل نصب TMD، سه میراگر ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی در محدوده ارتفاعی ۲٤۰ تا ٤۰۰ متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. در هر حالتِ جرم و ارتفاع نصب معین میراگر، میزان کاهش پاسخ سازه محاسبه شد. از نتایج مهم حاصل از این تحقیق به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

۱- برای ساختمان بلند و مشخصات مهندسی باد فرض شده، نتایج نشان داد پاسخ عرضی سازه بیش از ارتعاشات طولی آن است. شتاب عرضی تراز فوقانی سازه کنترل نشده حدود ۹۹ درصد بیش از شتاب طولی است. همچنین شتاب سازه بیش از حد مجاز آسایش ساکنین بود.

۲- به ازای میراگر جرمی ٦۰۰ تنی در تراز فوقانی، جابه‌جایی و شتاب عرضی تراز فوقانی سازه در مقایسه با حالت کنترل نشده به ترتیب ۳٤ و ٤۸ درصد کاهش می‌یابند و در مجموع تأثیر کاهشی TMD در شتاب سازه بیش از جابه‌جایی بود.

۳- نتایج بررسی اثر تغییرات جرم TMD در محدوده صفر تا ٦۰۰ تن نصب شده در تراز فوقانی نشان داد نسبت فرکانسی بهینه برای مقادیر مختلف جرم میراگر، نزدیک به عدد یک است و وابستگی نسبتا کمی به جرم میراگر دارد ولی نسبت میرایی بهینه با افزایش جرم میراگر افزایش می‌یابد. به طور مثال، مقدار نسبت میرایی برای میراگرهای ۵۰ و ٦۰۰ تنی در حالت کنترل شتاب عرضی به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۷۱ بود.

٤- با افزایش جرم TMD، کنترل جابه‌جایی و شتاب افزایش می‌یابد. به طور مثال، کاهش شتاب عرضی برای میراگرهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ٦۰۰ تنی نصب شده در تراز فوقانی به ترتیب ۲٤، ٤۱ و ٤۸ درصد است. همچنین طبق نتایج، شیب منحنی کنترل سازه با افزایش جرم میراگر کاهش می‌یابد و برای به دست آوردن قابلیت کنترل‌های بالاتر به جرم‌های خیلی سنگین تر TMD نیاز خواهد بود.

۵- از عوامل مهم دیگر در به‌کارگیری سیستم TMD، فضای مورد نیاز برای عملکرد آن می‌باشد. انحراف معیار جابه‌جایی TMD با افزایش جرم آن کاهش می‌یابد. به طور مثال در حالت کنترل ارتعاش عرضی، مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی سیستم TMD به ازای جرم‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ٦۰۰ تن به ترتیب ۱۰۷/٤، ۵٤/۹۲ و ۳٦/۵٦ سانتی‌متر است.

٦- نتایج بررسی تأثیر موقعیت ارتفاعی TMD نشان داد کاهش پاسخ سازه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD بیشتر می‌شود و مقدار افزایشی کنترل برای TMDهای سبک‌تر بیشتر است. به طور مثال برای میراگرهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی برای حالتی که میراگرها در تراز ۳۲۰ متری نصب شده باشند به ترتیب ۲۳/۲٤، ۳۳/۷۲ و ۳۸/۵٦ درصد و در حالتی که میراگر در تراز فوقانی نصب شده باشد به ترتیب ۳۰/٦۸، ٤۱/۲۸ و ٤۵/۸۱ درصد است.

۷- نسبت میرایی بهینه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD افزایش می‌یابد. به طور مثال برای میراگر ۳۰۰ تنی، نسبت میرایی بهینه متناظر با ارتفاع نصب‌های ۲٤۰ و ٤۰۰ متری برای کنترل ارتعاشات عرضی به ترتیب، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۵۰۱ است. انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب سیستم TMD با افزایش ارتفاع محل نصب آن کاهش می‌یابد ولی مقدار تغییرات آن نسبتا کم می‌باشد. به طور مثال، برای میراگر ۳۰۰ تنی، انحراف معیار جابه‌جایی TMD نصب شده در ارتفاع‌های ۳۲۰ و ٤۰۰ متری به‌ترتیب ۵۸/٦۸ و ۵٤/۹۲ می‌باشد که نشان می‌دهد مقدار جابه‌جایی سیستم TMD در ارتفاع نصب ۳۲۰ متری، حدود ۷ درصد بیشتر از حالت نصب شده در تراز فوقانی است.

مراجع

[1] T. Balendra, *Vibration of buildings to wind and earthquake loads*, Springer Verlag, Department of Civil Engineering National University of Singapore, 1993.

[2] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," *Journal of wind and structures*, vol. 3, no. 4, pp. 201-251, 1999.

[3] J.A. Amin, A.K. Ahuja, "Aerodynamic modifications to the shape of the buildings: A review of the state-of-the-art," *Asian journal of civil engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 433-450, 2010.

[4] A. Sharma, H. Mittal, A. Gairola, “Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications: Review”, *Journal of Building Engineering*, vol. 18, pp. 180–194, 2018.

[5] A. Ghorbani-Tanha, K. Noorzad and M. Rahimian, “Mitigation of wind-induced motion of Milad tower by tuned mass damper,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 18, pp. 371–385, 2009.

[6] X. Lu, and J. Chen, “Parameter optimization and structural design of tuned mass damper for Shanghai centre tower,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 20, pp. 453–471, 2011.

[7] M. Y. Liu, W. L. Chiang, J. H. Hwang, Ch. R. Chu, “Wind-induced vibration of high-rise building with tuned mass damper including soil–structure interaction,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, pp. 1092–1102, 2008.

[8] A. Y. T. Leung, H. Zhang, C. C. Cheng, and Lee,Y. Y., “Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 37, no. 9, pp. 1223-1246, 2008.

[9] A. Edris Taha, S. Elias, V. Matsagar, A. Jain, “Seismic response control of asymmetric buildings using tuned mass dampers,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, https://doi.org/10.1002/tal.1673, 2019.

[10] M. Kouhdaragh, “Effect of tuned mass damper with various mass fractions on the seismic performance of isolated reinforced concrete structures,” *Journal of structural engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 15-25, 2020, (In Persian).

[11] M. Mohebbi, and A. Joghataie, “Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms,” *The structural design of tall and special buildings*, vol. 21, no. 1, pp. 57-76, 2012.

[12] Ch.Wang, Z. Lü, Tu. Yongming, “Dynamic responses of core-tubes with semi-flexible suspension systems linked by viscoelastic dampers under earthquake excitation,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 801-813, 2011.

[13] N. Khodaie, H. Eimani kalehsar, “Wind-induced vibration control of tall TV towers using a part of the main structure as a vibration absorber substructure,” *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 109-126, 2019, (In Persian).

[14] B. Samali, E. Mayol, K.C.S. Kwok, A. Mack, P. Hitchcock, “Vibration control of the wind-excited 76-story benchmark building by liquid column vibration absorbers,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 478–485, 2004.

[15] J.C. Wu, and J.N. Yang, “Active control of transmission tower under stochastic wind,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 2, pp. 1302-1312, 1998.

[16] K. H. Eimani, N. Khodaie, “Parametric study of the along-wind and across-wind responses of tall RC chimneys using the frequency domain analysis,” *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 4, no. 2, pp. 148-160, 2017.

[17] A.G. Davenport, “Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading,” *Proc. of the Institution of Civil Engineers*, vol. 28, no. 2, pp. 187-196, 1964.

[18] National Research Council (NRC), User's guide-NBC: structural commentaries (Part 4 of Division B), Canadian Commission on Building and Fire Codes, Ottawa (Canada), 2005.

[19] E. Simiu, “Wind spectra and dynamic along wind response,” *Journal of Structural Division, ASCE*, vol. 100, pp.

1897-1910, 1974.

[20] Vickery, B.J., “On the reliability of gust loading factors,” *Proc., Tech. Meet. Concern. Wind Loads Build. Struct.*, vol. 30, pp. 296–312, 1970.

[21] S. Lianga, S. Liu, Q.S. Li, L. Zhang, M. Gu, “Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, pp. 1757–1770, 2002.

[22] N. Khodaie, “Vibration control of super-tall buildings using combination of tapering method and TMD system,” *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 196, no. 104031, 2020.

[23] A. Kareem, “Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 59, pp. 131-157, 1996.

Journal Ferdowsi Civil Engineering , 35, 4, 2022. (73-86)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Identifying Apparent Welding Defects using Computer Vision Based on Deep Learning

Research Article

Mussa Mahmoudi[1], Soroush Ghaderi[2], Faezeh Mahmoudi[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.75044.1118

1. Introduction

There are various methods to identify damage in different conditions according to the importance of the structure, severity of damage, and type of damage. In general, structural damage detection methods can be divided into two categories: destructive methods and non-destructive methods. In destructive methods, which are often accompanied by testing or sampling of the original structure, the structure is changed and even in some cases it cannot be used anymore. Therefore, these methods are severely limited and as a result, in the field of damage identification, non-destructive methods will be more suitable option for continuous examination of the structure's condition, identification of possible damages, and safety evaluation.

Recent advances regarding computers, sensors, and other electronic technologies have turned non-destructive methods into effective, easy, and cost-effective methods for damage detection. Non-destructive methods are also divided into two categories: local and general damage detection methods.

Welding quality control (as one of the methods of making connections in steel buildings) has an important position in identifying damage in steel structures. Among the methods for detecting damage in welding, we can refer to objective inspection, magnetic field, ultrasonic, radiography, microwave, eddy current, thermal field, and image processing.

Defects that may appear in the appearance of the welding include the following: 1) Lack of Fusion (LOF); 2) Lack of Penetration (LOP); 3) Porosity; 4) Undercut; 5) Slag Inclusion; 6) Overlap; 7) Spatter; 8) Cracks.

2. Materials and methods

The Internet can be the largest source for providing images as software data, but because the more the number of images in the database the more accurate the software will be, other sources have been used to prepare images. These sources are technical and professional education centers and schools. Defects in these samples are identified by experienced weld inspectors before they are used in machine learning. For the proper use of captured images, the images that are given as input to the software are pre-processed by the user and modified in terms of framing. In this research, 52 photos of spatter class, 56 slag inclusion impurities, 104 undercuts, and 80 cracks were included for the database which are actually balanced data. Validating the model with usual factors is considered valid. Moreover, pre-processing was done on the images that automatically detects the weld area through deep learning. In addition to the mentioned cases, the data augmentation method can be a suitable approach to generate more training data. In this way, they enhance the samples through a number of random transformations that produce acceptable images. The model deals with more aspects of the data and generalizes better.

This research designs a program using image processing and artificial intelligence methods that can accurately detect and identify welding defects. Python programming language and OpenCV framework are used for image processing, Keras library is used to build and implement deep neural network, and Tensor platform is used for to detect and predict defects.

Convolutional neural networks (CNN) are very similar to artificial neural networks. The neural network takes all the training data in the input layer. It then passes the data through the hidden layers and changes the values based on the weight of each node. Finally, it returns its value in the output layer. Convolutional neural network is a special type of neural network with multiple layers. It processes data that has a grid arrangement and then extracts important features. A big advantage of using CNN is that you don't need to do many processing steps on the images.

3. Results and discussion

Figure 1 and 2 show the accuracy and cost in the training process, where the horizontal axis represents the number of training steps (dimensionless). Moreover, the vertical axis in Figure 1 shows the cost of training and in Figure 2 the accuracy of training. The vertical axes are scaled from zero to one. Examining Figure 1 and 2 shows that the system did not suffer from overfitting in the training phase.

---

*Manuscript received: January 31, 2022, Revised, September 7, 2022, Accepted, November 29, 2022.

[1].Corresponding Author Professor, Department of structure and earthquake engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, **Email:** m.mahmoudi@sru.ac.ir

[2]. Master Graduate, Department of structure and earthquake engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University.

[3]. Master Graduate, Department of Artificial intelligence, Azad University, Tehran Gharb Branch.

The input images apply changes so that the program can process it. Then the model is trained to analyze and process the image and by extracting the features of the image, predict the percentage belonging to each of the classes.

Figure 1. The cost of training compared to the increase of training steps

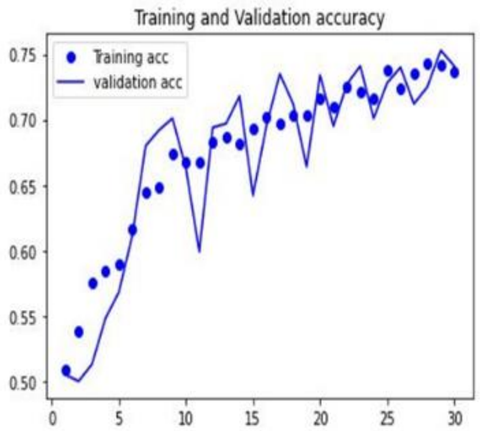


Figure 2. Validation compared to increasing training steps

4. Conclusion

This research proposed a method that can be used for detecting welding defects with the help of a machine and without the need for skilled inspectors. For using this method, it is enough to give the digital image of the tested weld to the software and conclude the health status of the weld. If the weld has several defects at the same time, the software expresses the contribution of each of the defects as a percentage. In order to validate the method and ensure the effectiveness of the software, several samples of defective welding images in which the amount of each type of welding defect was determined by expert welding inspectors were given to the machine, and the machine detected each defect with at least 85% accuracy.

According to the results of this research and the examples that were evaluated by this method, the following advantages can be considered for the proposed method:

- The use of this method and software can greatly reduce the need for skilled welding inspectors to detect external defects;
- The use of machines can significantly reduce human error in detecting external defects and even identify secondary defects;
- By using the proposed method, the time required to check welding defects with a large number is significantly reduced.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

شناسایی عیوب ظاهری جوش با استفاده از بینایی ماشین بر اساس یادگیری عمیق*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.75044.1118

موسی محمودی صاحبی[۱] سروش قادری[۲] فائزه محمودی صاحبی[۳]

چکیده *یکی از کنترلهای کیفیت جوش، کنترل عیوب ظاهری جوش مانند ترک سطحی، جرقه و پاشش، سر رفتن جوش بر روی فلز و ذوب ناقص است. در حال حاضر بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ها، کیفیت ظاهری جوش توسط یک بازرس به صورت چشمی (تست چشمی) کنترل می‌شود. میزان دقت کار در این روش به میزان مهارت شخص بازرس بستگی دارد. عدم استفاده از تجهیزات و فناوری باعث می‌شود تا خطای شناسایی عیوب ظاهری بالا باشد. در این تحقیق، روشی پیشنهاد می‌گردد تا به کمک تصاویر حاصل از جوش و استفاده از بینایی ماشین بر اساس یادگیری عمیق بتوان با دقت و سرعت مناسب عیوب ظاهری جوش را شناسایی کرد. در یادگیری عمیق از شبکه کونولوشنال برای استخراج ویژگی از تصویر استفاده می‌شود. برای اطمینان از دقت روش پیشنهادی، تصاویر جدیدی از جوش معیوب که قبلاً وضعیت آنها توسط بازرسان مجرب تعیین شده بود انتخاب گردید و وضعیت سلامت آنها به کمک ماشین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی می‌تواند با دقت قابل قبول (بالای ۸۵ در صد)، عیوب ظاهری جوش را شناسایی کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد، با استفاده از روش پیشنهادی، عیوب ظاهری جوش در مقایسه با روش سنتی با سرعت بیشتری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.*

واژه‌های کلیدی عیوب ظاهری جوش، شبکه عصبی کانولوشنال، پردازش تصویر، یادگیری عمیق، بینایی ماشین.

Identification of Apparent Welding Defects Using Computer Vision Based on Deep Learning

Mussa Mahmoudi Soroush Ghaderi Faezeh Mahmoudi

Abstract *One of the welding controls in health monitoring of structures is to visually control the appearance of welding defects (cracks, Spatter, Overlap, Lack of Fusion). Currently, according to regulations, the appearance quality of welding is controlled by an inspector visually. The accuracy of work in this method depends on the skill level of the inspector. Non using of equipment and technology leads to a high error in identifying visual defects. In this research, a method is proposed to be able to more accurately identify the appearance of welding defects with the help of imaging using machine vision based on deep learning. Convolutional network is used for deep learning to extract features from the image. The results show that the proposed method can identify welding defects with an acceptable accuracy (over 85%). Also, the results show that by using the proposed method, welding defects are evaluated more quickly compared to the traditional method.*

Keywords appearance welding defects, Convolutional Neural Network, image processing, deep learning, computer vision.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۱/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۹/۸می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استاد گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

Email: m.mahmoudi@sru.ac.ir

(۲) کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۳) کارشناسی ارشد هوش مصنوعی، دانشگاه آزاد واحد تهران غرب

مقدمه

روش‌های متنوعی برای شناسایی آسیب در شرایط مختلف با توجه به اهمیت سازه، شدت خسارت و نوع خسارت وجود دارد. به طور کلی می‌توان روشهای شناسایی خسارت سازه‌ای را به دو دسته روشهای مخرب و روشهای غیر مخرب تقسیم‌بندی کرد. در روشهای مخرب که اغلب همراه با آزمایش یا نمونه‌برداری از سازه اصلی هستند، سازه دچار تغییر شده و حتی در برخی از موارد دیگر قابل استفاده نیست. از این رو این روشها با محدودیت شدیدی مواجه هستند و در نتیجه در حوزه شناسایی خسارت، روشهای غیر مخرب برای بررسی مداوم وضعیت سازه، شناسایی خسارتهای احتمالی و ارزیابی ایمنی، گزینه بسیار مناسبی خواهند بود.

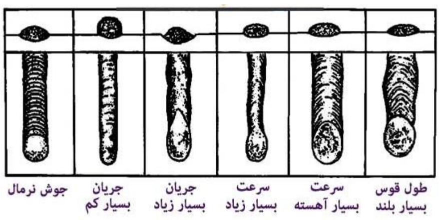
پیشرفتهای اخیر در حوزه کامپیوتر، حسگرها و سایر تکنولوژیهای الکترونیک، روشهای غیر مخرب را به روشهایی مؤثر، آسان و باصرفه برای شناسایی خسارت تبدیل کرده است. روشهای غیر مخرب نیز به دو دسته روشهای شناسایی آسیب محلی و کلی تقسیم‌بندی می‌شوند.

کنترل کیفیت جوش (به عنوان یکی از روشهای ایجاد اتصال در ساختمانهای فولادی) از جایگاه مهمی در شناسایی آسیب در سازه‌های فولادی برخوردار است. از روشهای تشخیص آسیب در جوش می‌توان به بازبینی عینی، میدان مغناطیسی، التراسونیک، رادیوگرافی، ماکروویو، جریان گردابی، میدان حرارتی و پردازش تصویر اشاره کرد. در حال حاضر بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ها، کیفیت ظاهری جوش توسط یک بازرس به صورت چشمی (تست چشمی) کنترل می‌شود.

عیوب ظاهری جوش. عیوبی که ممکن است در ظاهر جوش به‌وجود آید شامل موارد زیر است [1]:

- ذوب ناقص (Lack of Fusion (LOF))
- نفوذ ناقص (Lack of Penetration (LOP))
- تخلخل (Porosity)
- بریدگی کناره جوش (Undercut)
- ناخالصیهای حبس شده (Slag Inclusion)
- سر رفتن جوش روی فلز پایه (Overlap)
- جرقه و پاشش (Spatter)
- ترکها (cracks)

در شکل (۱) تأثیر عوامل مهم بر روی کیفیت ظاهری جوش ارائه شده است.



شکل ۱ تأثیر عوامل مهم روی کیفیت جوش

وقتی آزمایشهای غیر مخرب (Nondestructive tests) علاوه بر بازرسی عینی (Visual test) مورد نیاز باشد، باید اطلاعاتی از قبیل نوع جوشهایی که باید آزمایش شوند، درصدی از جوشها که باید تحت آزمایش قرار گیرند و روشهای آزمایش در مشخصات فنی ذکر شوند [2,3].

پردازش تصاویر و یادگیری ماشین. بررسی یک تصویر توسط انسان با توجه به کیفیت تصویر و نیز اندازه و موقعیت عیوب جوش می‌تواند باعث خطای انسانی شود، در صورتی که استفاده از کامپیوتر و روشهای جدید پردازش تصویر (Image Processing) و بینایی ماشین (Machine vision) می‌تواند تا حدود زیادی به ایجاد وضوح کیفی در تصاویر و همچنین یافتن عیوب در مدت زمان کمتر و با دقت بیشتری منجر گردد. تعداد زیاد تصاویر و همچنین در دسترس نبودن بازرسان باتجربه باعث ایجاد خستگی مضاعف در فرد مفسر می‌شود و این امر سبب افزایش خطا خواهد شد.

با توجه به موارد ذکر شده، روش بینایی ماشین علاوه بر اینکه از روش‌های غیر مخرب ارزیابی سازه‌ها می‌باشد، از هزینه‌ها و مخاطرات بازرسی انسانی مصون است.

پیشرفتهای گسترده هوش مصنوعی در حوزه یادگیری عمیق، ابزارهای مفیدی در اختیار بینایی ماشین قرار می‌دهد که از آن جمله می‌توان به شبکه‌های عصبی کانولوشنال (CNN) به عنوان مهمترین بخش آن اشاره کرد. از منظر بینایی ماشین سه نوع مسئله قابل حل می‌باشد:

– دسته‌بندی تصاویر که وجود یا عدم وجود شیء را مشخص می‌کند.

– تشخیص اشیا که علاوه بر تشخیص وجود شیء، تقریبی از محل شی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

- بخش‌بندی و تقسیم‌بندی معنایی که پیکسلهای موجود در تصویر را دسته‌بندی کرده و برای آن برچسب مخصوص اختصاص می‌دهد.

در این پژوهش هدف اول یا همان دسته‌بندی تصاویر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تاریخچه تحقیق. قطعه‌قطعه‌سازی تصاویر، روشی است که در سال ۲۰۰۹ توسط A.Mahmoudi وF.Regragui مطرح شد. روال کار در الگوریتم پیشنهادی آنها، تمرکز بر مناطقی بود که عیوب موجود هنگام فرایند جوشکاری را شامل می شود و این مناطق را به قطعات کوچکتر تقسیم‌بندی می‌کند. اساس کار این روش، تجزیه و تحلیل هیستوگرام (analysis Histogram) و بهبود کنتراست می‌باشد [4].

در سال ۲۰۰۵ روشی توسط Yi Sun، Peng Bai، Hong-yu Sun و Ping Zhou ارائه شد که در آن، عیوب سرباره، سوراخهای کرمی و ذوب ناقص، با استفاده از تشخیص الگوی فازی، به طور اتوماتیک شناسایی می‌شوند و در شرایطی که هر کدام از این نقایص از مقدار مجاز خود بیشتر باشند، به اپراتور اطلاع داده می‌شود [5].

یکی دیگر از روشهایی که در سال ۲۰۰۹ توسط Juan Zapata، Rafael Vilar و Ramon Ruiz ارائه شد، با هدف شناسایی خودکار عیوب جوش در تصاویر رادیوگرافی بود. با توجه به اینکه تصاویر رادیوگرافی، دارای نویز می‌باشند، ابتدا با بهره‌گیری از فیلتر میانه (Median filter)، تکنیک بهبود کنتراست و حد آستانه (Threshold)، وضوح تصاویر را بالا می‌برند. در گام بعدی، تعدادی از ویژگیهای هندسی انتخاب می‌شوند. سپس با بهره‌گیری از یک شبکه عصبی مصنوعی عیوب جوش دسته‌بندی می‌شوند [٦].

در سال ۲۰۱۲ Krizhevsky و همکاران [7] با استفاده از یک شبکه عصبی کانولوشنال عمیق توانستند به بیشترین دقت در زمینه دسته‌بندی تصاویر دست پیدا کنند. این موضوع آغازی جدید در مبحث بینایی کامپیوتر بود. البته موضوع شبکه‌های عصبی کانولوشن توسط LeCun و همکاران [8] ارائه شده بود، اما پیدایش نسلهای جدید پردازنده‌های گرافیکی، آنها را به راه حلی قابل استفاده در مسائل روزمره تبدیل کرد. Cha و همکاران [9] از یک شبکه عصبی کانولوشن برای دسته‌بندی تصاویر بتنی استفاده کردند. پس از آن و در مطالعه‌های دیگر اقدام به شناسایی و تشخیص محل آسیب نمودند. در این مطالعه، آنها از یک شبکه عصبی کانولوشنال استفاده کردند که علاوه بر دسته‌بندی تصاویر آسیبها، محل قرارگیری آنها را نیز به واسطه چهار مختصات از یک مستطیل محصور کننده ارائه داد. محتشم خانی و همکاران [10] با استفاده از یک مدل کانولوشنال و با بهره‌گیری از یادگیری انتقالی، اقدام به دسته‌بندی تصاویر برای داده‌های مربوط به توربینهای گازی کردند. Feng و همکاران [11] در مطالعه‌های دیگر اقدام به دسته‌بندی تصاویر برای شناسایی آسیبهای ایجاد شده در سطح سازه‌های آبی کردند که از فرایند یادگیری انتقالی استفاده شد. تمامی مطالعات اخیر از دقت بسیار بالای شبکه‌های عصبی کانولوشن و یادگیری عمیق در حوزه دسته‌بندی تصاویر مربوط به آسیبهای سازه‌ای حکایت دارند.

در حوزه یادگیری عمیق در سال ۲۰۱۵ با ارائه شبکه‌های عصبی تماماً کانولوشنال [12] مسیر جدیدی گشوده شد. Yang و همکاران [13] از شبکه‌های عصبی تماماً کانولوشنال استفاده کردند و فرایند دسته‌بندی تصاویر بتنی را به انجام رساندند. Zhang و همکاران [14] با پیچیدگی بسیار کمی این کار را به سرانجام رساندند. مطالعه‌ای دیگر [15] شبکه‌ای ارائه داد تا به کمک آن بتوان مسائل آسیبهای موجود برای سطوح مختلف را تشخیص داد و فرایند بخش‌بندی را برای تصاویر آنها به انجام رسانید. مدل مورد استفاده در این پژوهش نیز از نوع تماماً کانولوشنال بوده است که دقت آن نسبت به مدلهای جدیدتر کمی پایین می‌باشد. از دیگر مطالعات جدید در حوزه دسته‌بندی تصاویر می‌توان به U-NET [16] که مشابه شبکه‌های عصبی تماماً کانولوشنال است اشاره کرد، با این تفاوت که علاوه بر آموزش رمزگذار و رمزگشا، رابطه بین عناصر این دو نیز به مدل آموزش داده می‌شود. Liv و همکاران [17] با استفاده از مدل اصلی پیشنهادی U-NET مدلی ارائه کردند. آنها نشان دادند که این مدل نسبت به مدل‌های پیشین نیاز به داده آموزشی بسیار کمتری خواهد داشت. از دیگر مدل‌هایی که اخیراً در بخش‌بندی تصاویر به موفقیتهای زیادی دست یافته است می‌توان به DeepLab [18] و زیرمجموعه‌های آن [19,20] اشاره کرد. این مدل به واسطه بهره‌گیری از لایه‌های کانولوشن تفکیک‌پذیر توانسته است به بهترین نتایج دست یابد.

در تمامی تحقیقات ارائه شده، تصاویر مورد استفاده برای شناسایی آسیب از نوع تصاویر رادیوگرافی بود و از تصاویر دیجیتالی استفاده نشد. همچنین در هیچ یک از تحقیقات ارائه

شده شناسایی عیوب ظاهری مد نظر قرار نگرفت. در این تحقیق از تصاویر دیجیتالی حاصل از گوشی تلفن همراه و همچنین دوربینهای عکس‌برداری برای شناسایی عیوب ظاهری جوش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین در این تحقیق، روش شناسایی عیوب ظاهری جوش بر اساس یادگیری عمیق مورد بررسی قرار می‌گیرد و دقت آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور قطعاتی که عیوب ظاهری آنها از قبل توسط بازرسان مجرب جوش مشخص گردیده است به کمک یادگیری عمیق هم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا کارایی روش پیشنهادی در شناسایی آسیب ارزیابی گردد. در حقیقت نوآوری این تحقیق استفاده از یادگیری عمیق در شناسایی عیوب ظاهری جوش با استفاده از تصاویر دیجیتالی است.

روش تحقیق

در این تحقیق به تصاویر زیادی که در آنها عیوب جوش نمایان باشد احتیاج است. اینترنت می‌تواند بزرگترین منبع برای تهیه تصاویر به عنوان داده‌های نرم‌افزار باشد. اما از آنجا که هر چه تعداد تصاویر پایگاه داده بیشتر باشد، دقت نرم‌افزار بالا می‌رود، از منابع دیگری نیز برای تهیه تصاویر استفاده شده است. این منابع، مراکز آموزش فنی و حرفه‌ای، هنرستانها و مدارس می‌باشند. در این مراکز دوره‌های صلاحیت جوشکاری برای کارآموزان برگزار می شود که نمونه جوشهای تهیه شده توسط این افراد، دارای عیوب مختلف می‌باشند. عیوب این نمونه‌ها قبل از اینکه در یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گیرند توسط بازرسان مجرب جوش مورد شناسایی قرار می‌گیرند. برای استفاده مناسب از تصاویر برداشت شده نخست تصاویری که به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود توسط کاربر پیش‌پردازش شده و از نظر کادربندی اصلاح می‌گردند به نحوی که خط جوش مورد نظر به صورت تقریبی در وسط تصویر قرار بگیرد. با توجه به اینکه نرم‌افزار با استفاده از تعداد زیادی از تصاویر مختلف آموزش دیده است، تمامی حالات و اشکالاتی که ممکن است وجود داشته باشد، پوشش داده می شود. همچنین از آنجا که خروجی نرم‌افزار همواره شامل ٤ کلاس مختلف می‌باشد، اشکالات غیر مرتبط در صد کمی را به خود اختصاص می‌دهند و در اولویتهای انتهایی قرار می‌گیرند.

در این تحقیق، ۵۲ عکس از کلاس جرقه و پاشش، ٥٦ مورد از ناخالصیهای حبس شده، ١٠٤ مورد از تخلخل و ۸۰ مورد از ترک برای پایگاه داده لحاظ گردید که در واقع داده‌های متعادلی هستند و صحت‌سنجی مدل با فاکتورهای معمول، معتبر محسوب می‌شوند. ضمناً برای اینکه اشکالات غیر از عیوب جوش مشکلی برای این روش به وجود نیاورد یک پیش‌پردازش روی تصاویر انجام شد که از طریق یادگیری عمیق، ناحیه جوش را به صورت خودکار تشخیص می‌دهد.

علاوه بر موارد ذکر شده، روش تقویت داده‌ها می‌تواند رویکرد مناسبی برای تولید داده آموزشی بیشتر باشد. به این ترتیب که از طریق تعدادی از تبدیلات تصادفی که تصاویر قابل قبول تولید می‌کنند، اقدام به تقویت نمونه‌ها می‌کنند. هدف این است که در زمان آموزش مدل، یک تصویر را دو بار پردازش نکند. این کار کمک می‌کند تا مدل با جنبه‌های بیشتری از داده‌ها روبه‌رو شود و بهتر تعمیم یابد. این موارد تنها تعدادی از گزینه‌های انتخابی موجود هستند:

range Rotation: یک مقدار برحسب درجه است (۱۸۰-۰)، بازه‌ای که در آن می‌توان تصاویر را به صورت تصادفی چرخش داد.

zoom_range: برای انجام بزرگنمایی تصادفی درون تصویر انجام می‌شود.

horizontal_flip: برای وارونه کردن تصادفی نیمی از تصاویر به صورت افقی قرار می‌گیرد.

fill_mode: استراتژی به کار رفته برای پر کردن پیکسلهایی است که به تازگی ایجاد شدند و ممکن است پس از یک عمل چرخش یا تغییر عرض یا ارتفاع آنها آشکار شوند. همچنین یک تصویر جوش شامل چند عیب به صورت همزمان می‌باشد، با توجه به این موضوع اغلب برای یک اپراتور تمایز قائل شدن بین عیوب ممکن است با خطا همراه باشد، که این تحقیق کمک بزرگی به رفع این مشکل می‌کند.

در این تحقیق سعی شده است با استفاده از روش‌های پردازش تصویر و هوش مصنوعی (Intelligence Artificial) برنامه‌ای طراحی شود که بتواند با دقت بالا کار تشخیص و شناسایی عیوب ظاهری جوش را انجام دهد. در این مقاله از زبان برنامه‌نویسی پایتون (Python) و با چارچوب Opencv برای پردازش تصاویر، از کتابخانه Keras به منظور ساخت و اجرای

شبکه عصبی عمیق و از بستر Tensor برای قسمت شناسایی و پیش‌بینی عیوب استفاده شده است.

معماری شبکه عصبی کانولوشنال. شبکه‌های عصبی کانولوشن تا حد بسیار زیادی شبیه شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند. شبکه عصبی تمام داده‌های آموزش را در لایه ورودی می‌گیرد. سپس داده‌ها را از میان لایه‌های پنهان عبور داده و مقادیر را بر اساس وزن هر گره تغییر می‌دهد. در آخر مقدار آن را در لایه خروجی برمی‌گرداند. شبکه عصبی کانولوشن نوع خاصی از شبکه عصبی با چندین لایه است. داده‌هایی را که دارای آرایش شبکه‌ای هستند پردازش می‌کند و سپس ویژگیهای مهم را استخراج می‌کند. یک مزیت بزرگ استفاده از CNN این است که نیازی به انجام بسیاری از مراحل پردازش روی تصاویر ندارید. یک تفاوت بزرگ بین CNN و یک شبکه عصبی منظم این است که CNNها از پیچیدگی برای مدیریت ریاضیات پشت صحنه استفاده می‌کنند. حداقل در یک لایه CNN به جای ضرب ماتریس از ترکیب استفاده می‌شود. کانولوشنها در دو تابع محاسبه می‌شوند و یک تابع را برمی‌گردانند.

CNNها زیر مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی عمیق هستند. شبکه‌های عصبی عمیق به شبکه‌های عصبی‌ای گفته می‌شود که تعداد لایه‌های مخفی شبکه آنها بیش از سه لایه می‌باشد. در واقع یادگیری عمیق محاسبات پیچیده‌ای دارد که روی CPU سیستم‌های معمولی یا ممکن نیست یا بسیار زمانبر است. در اصل، CNN با استفاده از فیلترها که روی داده‌های ورودی می‌لغزاند کار می‌کند و یک استخراج ویژگی از تصویر دریافت می‌کند. آنچه آنها را بسیار خاص می‌کند این است که CNNها می‌توانند فیلترها را در صورت آموزش تنظیم کنند. به این ترتیب نتایج در زمان واقعی تنظیم می‌شوند. این باعث صرفه‌جویی زیادی در وقت و آزمایش و خطا می‌شود زیرا به پارامترهای زیادی احتیاج ندارند [21].

از آنجا که می‌توان فیلترها را برای آموزش بهتر CNN به‌روز کرد، این امر نیاز به فیلترهای دستی را از بین می‌برد. این موضوع امکان انعطاف‌پذیری بیشتری در تعداد فیلترها می‌دهد. یکی از مواردی که جلوی بسیاری از مشکلات استفاده از CNN را می‌گیرد، کمبود داده است، در حالی که می‌توان شبکه‌ها را با نقاط داده نسبتاً کمی آموزش داد، هر چه اطلاعات بیشتری در دسترس باشد، CNN بهتر تنظیم می‌شود. فقط باید به خاطر داشت که این نقاط داده باید تمیز و دارای برچسب باشند تا CNN بتواند از آنها استفاده کند. همین امر باعث گران شدن کار با آنها می‌شود. شبکه‌های عصبی کانولوشنال، شبکه‌های عصبی چند لایه هستند که واقعاً در استخراج ویژگیها از داده‌ها مهارت دارند. آنها به‌خوبی با تصاویر کار می‌کنند و نیاز به پردازش زیادی ندارند. با استفاده از کانولوشنال و تجمیع تصاویر برای کاهش ویژگیهای اصلی آن، می‌توان تصاویر را به‌درستی شناسایی کنید. آموزش مدلهای CNN با پارامترهای اولیه کمتر، از سایر شبکه‌های عصبی آسانتر است. در این حالت به تعداد زیادی از لایه‌های پنهان نیاز نیست زیرا کانولوشنالها قادر خواهند بود بسیاری از کشف لایه‌های پنهان را کنترل کنند.

آخرین لایه CNN لایه طبقه‌بندی است که مقدار پیش‌بینی شده را بر اساس نقشه فعال‌سازی تعیین می‌کند. آموزش CNN مشابه آموزش بسیاری از الگوریتمهای یادگیری ماشین است. ابتدا با برخی از داده‌های آموزشی که جدا از داده‌های آزمون است شروع خواهد کرد و وزن خود را بر اساس دقت مقادیر پیش‌بینی‌شده تنظیم خواهد کرد. البته باید به پیش‌برازشی هم توجه کرد.

یکی از مراحل کانولوشن ادغام یا pooling است. لایه ادغام اندازه نقشه‌های ویژگی را کاهش می‌دهد که این خود از تعداد پارامترهای یادگیری و همچنین میزان محاسبات شبکه می‌کاهد. لایه ادغام ویژگیهای موجود در هر ناحیه از نقشه ویژگی (Feature Maps) را که لایه کانولوشن تولید کرده است خلاصه می‌کند؛ در واقع مهمترین آنها را انتخاب می‌کند و به مرحله بعد منتقل می‌کند. این باعث می‌شود مدل در برابر تغییرات موقعیت ویژگیهای موجود در تصویر ورودی مقاومت بیشتری داشته باشد (شکل ۳).

به‌طور کلی سه نوع ادغام وجود دارد:

- **Max Pooling**: در این نوع ادغام (Pooling)، بزرگترین مقدار در ناحیه‌ای که فیلتر پوشانده است انتخاب می‌شود؛ بنابراین در این حالت خروجی یک نقشه ویژگی است که برجسته‌ترین ویژگی‌های نقشه ویژگی قبلی را دارد.
- **Average Pooling**: در این نوع ادغام، مقدار میانگین ناحیه‌ای که فیلتر روی آن قرار می‌گیرد محاسبه می‌شود؛ بنابراین میانگین ویژگیهای نقشه ویژگی قبلی را در خروجی ارائه می‌کند.

- **Sum Pooling**: ر این نوع ادغام، جمع کل ناحیه‌ای که فیلتر پو شانده ا ست محا سبه می شود و یک نق شه ویژگی جدید را ایجاد می‌کند.

بعد از فیلتر کردن یک ماتریس، سایز خروجی کمتر از ماتریس ورودی می‌شود. با لایه‌گذاری یا padding می‌توان به صورت جعلی اندازه ورودی را افزایش داد تا ماتریس خروجی هم‌اندازه ماتریس ورودی بشود. در مورد لایه‌گذاری صحبت بسیار است و معمولاً در پردازش تصویر بررسی می‌شود؛ اما یک راه ساده و رایج آن اضافه کردن سطر و ستون صفر به‌صورت متقارن به دور ماتریس ورودی است [22].

مجموعه داده imagenet که از آن در این روش استفاده می‌شود به صورت یک بسته همراه با Keras ارائه نمی‌شود. این مجموعه داده توسط Kaggle به عنوان بخشی از یک مسابقه بینایی کامپیوتری در اواخر سال ۲۰۱۳ زمانی که شبکه‌های عصبی کانولوشنی هنوز به عنوان یک جریان اصلی به شمار نمی‌رفتند، در دسترس قرار گرفت. این تصاویر، عکسهای JPEG با رزولوشن متوسط هستند. این مجموعه داده حاوی ۲۵۰۰۰ تصویر از سگها و گربه‌ها (۱۲۵۰۰ نمونه از هر کلاس) و حجم آن ۵۴۳ مگابایت است (به صورت فشرده). پس از دانلود و خارج کردن آن از حالت فشرده، باید مجموعه داده‌ای ایجاد شود که حاوی سه زیرمجموعه است: یک مجموعه آموزشی با ۱۰۰۰ نمونه از هر کلاس، یک مجموعه اعتبارسنجی با ۵۰۰ نمونه از هر کلاس و یک مجموعه آزمایشی با ۵۰۰ نمو نه از هر کلاس. بنابراین در واقع تعداد ۲۰۰۰ تصویر آموزشی، ۱۰۰۰ تصویر اعتبارسنجی و ۱۰۰۰ تصویر آزمایشی در اختیار قرار خواهد داد. هر بخش شامل تعداد یکسانی از نمونه‌های مربوط به هر کلاس است و یک مسئله طبقه‌بندی دودویی متوازن است به این معنی که دقت طبقه‌بندی، معیار مناسبی برای سنجش میزان موفقیت خواهد بود، در واقع از این مدل آماده با دیتاست غنی به منظور آموزش شبکه استفاده می شود [23,24] و سپس دیتا ست مخصوص، وظیفه جدید به سیستم اضافه می‌شود تا تشخیص تصاویر مورد نظر را آموزش ببینند [25].

در اینجا شبکه مورد استفاده متشکل از دنباله‌ای از ۱۶ لایه متراکم (Dens) و انبوهی از لایه‌های عصبی تماماً متصل هستند. لایه آخر یک لایه بیشینه هموار (Soft max) می‌باشد که به تعداد شماره کلاسها، مسیر دارد. به این معنی که آرایه‌ای از ٤ امتیاز احتمالی را باز خواهد گرداند (که مجموع آنها برابر با ۱ است). هر امتیاز برابر است با احتمال آنکه تصویر کنونی متعلق به یکی از کلاسهای مربوط به عیوب می‌باشد. برای آماده ساختن شبکه برای فرایند آموزش، لازم است به عنوان بخشی از مرحله گرداوری و تلفیق سه مورد دیگر نیز مشخص شوند [26] که عبارتند از:

یک تابع هزینه (Loss) یا زیان: شبکه چگونه می‌تواند عملکرد و کارایی خود را در داده‌های آموزشی بسنجد و بنابراین چگونه می‌تواند خود را در مسیر صحیح هدایت کند.

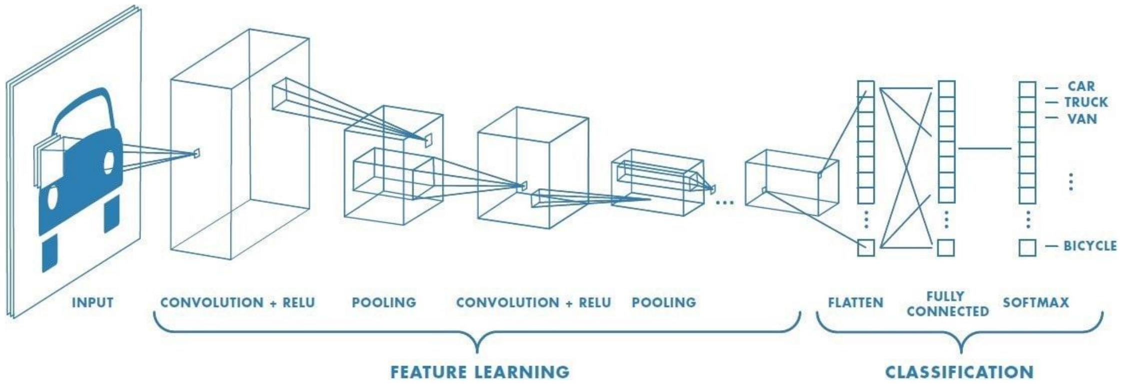
یک بهینه‌ساز (Optimizer): ساز و کاری که شبکه از طریق آن براساس داده‌هایی که مشاهده می‌کند، تابع هزینه خود را به‌روزرسانی می‌کند.

معیارهایی برای پایش در حین آموزش وآزمودن (Metrics): در اینجا تنها به دقت و صحت توجه خواهد شد (نسبتی از تصاویر که به درستی طبقه‌بندی شدند) [27].

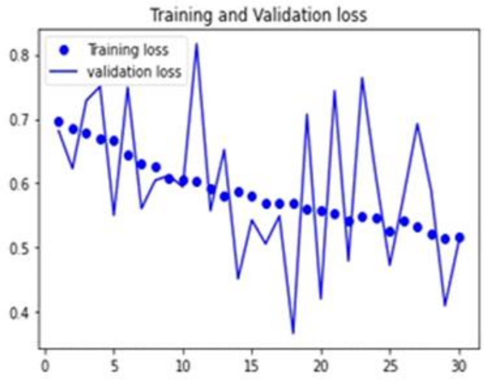
در جدول (۱) پارامتر های مربوط به معماری شبکه کانولوشنال ارائه شده است. همچنین در شکل (۲) معماری شبکه عصبی کانولوشنال که توضیحات آن در بخش جاری ارائه گردید نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای مربوط به معماری شبکه کانولوشنال

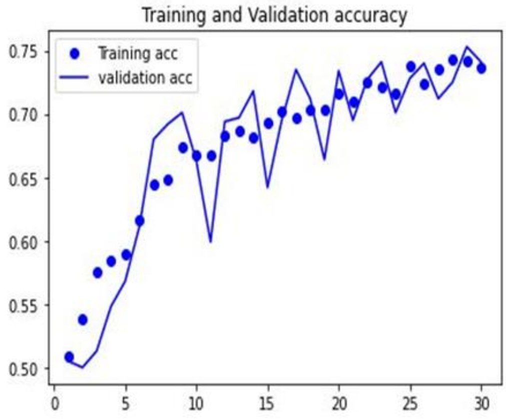
نوع مسئله	تابع فعالسازی لایه آخر	تابع هزینه
طبقه‌بندی دودویی	relu یا sigmoid	binary_crossentropy
طبقه‌بندی تک برچسبی چندکلاسی	relu یا sigmoid	binary_crossentropy
طبقه‌بندی چند برچسبی چندکلاسی	softmax	categorical_crossentropy
رگرسیون برای مقادیر اختیاری	None	mse
رگرسیون برای مقادیر بین ۰ و ۱	relu یا sigmoid	mse or binary_crossentropy



شکل ۲ معماری شبکه عصبی کانولوشنال



شکل ۳ بررسی هزینه آموزش در مقایسه با افزایش مراحل آموزش



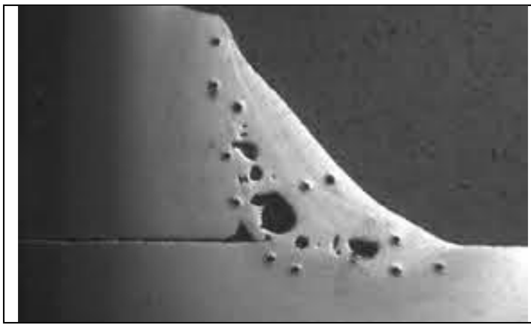
شکل ٤ بررسی صحت‌سنجی در مقایسه با افزایش مراحل آموزش

نتایج

شکلهای (۳ و ٤) دقت و هزینه را در فرایند آموزش نشان می‌دهند که در آنها محور افقی بیانگر تعداد مراحل آموزش (بدون بعد) است. همچنین محور عمودی در شکل (۳) هزینه آموزش و در شکل (٤) دقت آموزش را نشان می‌دهد. محورهای عمودی از صفر تا یک مقیاس شده است. بررسی شکلهای (۳ و ٤) نشان می‌دهد که سیستم در مرحله آموزش دچار بیش‌برازشی نشده است. بیش‌برازشی به این معناست که شبکه، داده‌های آموزشی را بیش از حد یاد گرفته و روی آن نتایج خوبی دارد ولی روی داده‌های جدید یا همان تست، نتایج قابل قبولی نخواهد داشت. برای این منظور یک دیتاست کمکی یا همان اعتبارسنجی به شبکه اضافه می‌شود تا نتایج شبکه بر روی آن بررسی گردد، در نتیجه با مشاهده نتایج که نشان‌دهنده نزدیک و همسو بودن نتایج داده‌های آموزش و اعتبارسنجی است می‌توان مطمئن بود نتایج روی داده‌های تست قابل قبول هستند.

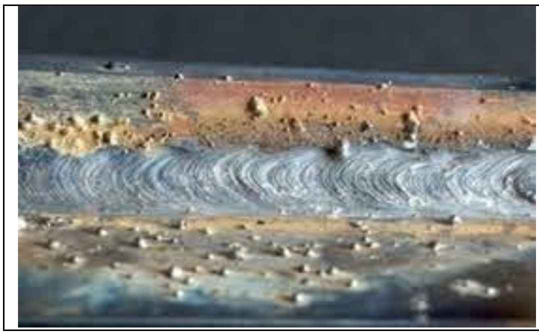
احتمال وجود (٪)	نوع عیب	الویت کلاس
۸۵/۱	ترک	احتمال اول
۱۱/٦	تخلخل	احتمال دوم
۱/۹۳	سرباره	احتمال سوم
۱/۳۲	پاشش	احتمال چهارم

الف



احتمال وجود (٪)	نوع عیب	الویت کلاس
۹۹/۹۹	تخلخل	احتمال اول
۰/۰۰۷	پاشش	احتمال دوم
۰/۰۰۲	سرباره	احتمال سوم
۰/۰۰۱	ترک	احتمال چهارم

ب



احتمال وجود (٪)	نوع عیب	الویت کلاس
۸٦/٤	پاشش	احتمال اول
۱۲/۷۳	تخلخل	احتمال دوم
۰/۸۳	سرباره	احتمال سوم
۰/۰۲	ترک	احتمال چهارم

ج

احتمال وجود (٪)	نوع عیب	الویت کلاس
۸٦/٤	سرباره	احتمال اول
۱۲/۷۳	پاشش	احتمال دوم
۰/۸۳	تخلخل	احتمال سوم
۰/۰۲	ترک	احتمال چهارم

د

شکل ۵ شناسایی عیوب ظاهری در جوش توسط ماشین: الف) ترک، ب) تخلخل، ج) جرقه و پاشش، د) ناخالصیهای حبس شده

در عمل، نیاز است که برنامه دیگری نوشته شود که بتواند تصویر مورد نظر کاربر را به عنوان ورودی دریافت و تغییراتی را بر آن اعمال کند تا برنامه بتواند آن را پردازش کند. سپس با استفاده از مدلی که از قبل آموزش دیده است اقدام به تحلیل و پردازش تصویر کند و با استخراج ویژگیهای تصویر، درصد تعلق به هر کدام از کلاسها را پیش‌بینی نماید. در آخر نیز به‌ترتیب تعلق به کلاسها، نتایج را در کنار تصویر وارد شده نمایش دهد.

در شکل (۵) چند مثال برای صحت‌سنجی این روش و میزان دقت آن ارائه شده است. این تصاویر توسط نویسندگان این تحقیق تهیه شد. تصاویر در اختیار بازرسان ماهر جوش قرار گرفت تا نظر خود را در مورد عیوب ظاهری آنها اعلام کنند و فقط عیب اصلی را برای هر یک از تصاویر بیان کنند. بازرسان عیوب زیر را برای هر یک از تصاویر مشخص کردند:

شکل الف: جوش دارای ترک

شکل ب: جوش دارای تخلخل

شکل ج: جوش دارای جرقه و پاشش

شکل د: جوش دارای ناخالصیهای حبس شده

در ادامه، تصاویر فوق به نرم‌افزار پیشنهادی داده شده و نوع عیوب ظاهری به کمک ماشین تعیین شد. به دلیل اینکه ممکن است هر تصویر دارای چند عیب به صورت همزمان باشد، ماشین این توانایی را دارد تا چند عیب به‌طور همزمان را نیز شناسایی کند. بنابراین، هر کدام از عیوب، با توجه به میزان آن عیب در جوش مورد نظر، درصد مشخصی را به خود اختصاص می‌دهند و اولویت‌بندی می‌شوند. نتایج به صورت زیر توسط ماشین بر حسب درصد اعلام گردید:

شکل الف: ماشین، عیب ترک در جوش را با احتمال ۸۵ درصد و عیب تخلخل را با احتمال ۱۱ درصد پیش‌بینی کرده است.

شکل ب: ماشین عیب تخلخل را با احتمال ۹۹ درصد پیش‌بینی کرده است.

شکل ج: سیستم عیب جرقه و پاشش را با احتمال ۸۶ درصد و تخلخل را با احتمال ۱۲ درصد شناسایی کرد.

شکل د: سیستم عیب ناخالصی حبس شده را با احتمال ۸۶ درصد و جرقه و پاشش را با احتمال ۱۲ درصد تشخیص داده است.

درصدهای اعلام شده، خروجیهای حاصل از پیش‌بینی توسط نرم‌افزار است و تطابق خوبی با درصدهای پیش‌بینی شده توسط بازرسان داشته است. ماشین توانسته است عیوب جوش را حداقل با ۸۵ درصد دقت تعیین نماید.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روشی پیشنهاد شده است که با استفاده از آن می‌توان عیوب ظاهری جوش را به کمک ماشین و بدون نیاز به بازرسان ماهر تشخیص داد. برای این منظور یک بسته نرم‌افزاری بر اساس یادگیری ماشین تهیه شد. در استفاده از این روش کافی است تصویر دیجیتالی جوش مورد آزمایش را به نرم‌افزار داد و وضعیت سلامت جوش را نتیجه گرفت. اگر جوش دارای چند عیب همزمان باشد نرم‌افزار میزان مشارکت هر یک از عیوب ظاهری را به صورت درصد بیان می‌کند. برای صحت‌سنجی روش و اطمینان از کارایی نرم‌افزار، چند نمونه از تصاویر جوش معیوب که میزان هر یک از انواع عیوب جوش در آن توسط بازرسان ماهر جوش تعیین شده بود به ماشین داده شد و ماشین با دقت حداقل ۸۵ درصد هر یک از معایب را شناسایی کرد.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و مثالهایی که با این روش مورد ارز یابی قرار گر فت می‌توان مزا یای زیر را برای روش پیشنهادی در نظر گرفت:

- ا ستفاده از این روش و نرم‌افزار می‌تواند نیاز به بازر سان ماهر جوش را برای تشخیص عیوب ظاهری تا حد زیادی کاهش دهد.
- استفاده از ماشین می‌تواند به طور چشمگیری خطای انسانی را در تشخیص عیوب ظاهری کاهش دهد و حتی عیوب ثانویه را نیز شناسایی کند.
- با بهره‌گیری از روش پیشنهادی، مدت زمان مورد نیاز برای بررسی معایب جوش با تعداد زیاد به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

در پایان یادآور می‌شود هرچه تعداد تصاویر برای آموزش ماشین بیشتر باشد، نرم‌افزار با دقت بیشتری تصاویر جدید را ارزیابی می‌کند.

مراجع

[1] Iranian Office of the Deputy for Technical Affairs Bureau of Technical Affairs and Standards, *Iranian structural welding code No.* 228, Tehran, Center for scientific documents and publications, (2001), (In Persian).

[2] Iranian Office of National Regulations and Building Control, *Guide to welding and welded joints in steel buildings*, Tehran, Tosseh publisher, (2015), (In Persian).

[3] Fatemi S.M., *Visual inspection of welding*, Tehran, Keyfiat publisher, (2018), (In Persian).

[4] Mahmoudi, A., & Regragui, F., "Welding defect detection by segmentation of radiographic images". *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, Vol. 7, pp. 111-115. IEEE. (2009, March).

[5] Sun, Y., Bai, P., Sun, H. Y., & Zhou, P., "Real-time automatic detection of weld defects in steel pipe", *Ndt & E International*, 38(7), 522-528, (2005).

[6] Y.J. Cha, W. Choi, G. Suh, S. Mahmoudkhani, O. Büyüköztürk, "Autonomous structural visual inspection using region-based deep learning for detecting multiple damage types", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(9), pp. 731-747, (2018).

[7] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks", *Advances in neural information processing systems*, 25, pp. 1097-1105, (2012).

[8] Y. LeCun, Y. Bengio, "Convolutional networks for images, speech and time series", *The handbook of brain theory and neural networks*, 3361(10), 1995, (1995).

[9] Y.J. Cha, W. Choi, O. Büyüköztürk, "Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), pp. 361-378, (2017).

[10] M. Mohtasham Khani, S. Vahidnia, L. Ghasemzadeh, Y.E. Ozturk, M. Yuvalaklioglu, S. Akin, N.K. Ure, "Deep-learning-based crack detection with applications for the structural health monitoring of gas turbines", *Structural Health Monitoring*, 19(5), pp. 1440-1452, (2020).

[11] C. Feng, H. Zhang, S. Wang, Y. Li, H. Wang, F. Yan, "Structural damage detection using deep convolutional neural network and transfer learning", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(10), pp. 4493-4502, (2019).

[12] J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell, "Fully convolutional networks for semantic segmentation", *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 3431-3440, (2015).

[13] X. Yang, H. Li, Y. Yu, X. Luo, T. Huang, X. Yang, "Automatic pixel-level crack detection and measurement using fully convolutional network", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(12), 1090, (2018).

[14] L. Zhang, F. Yang, Y.D. Zhang, Y.J. Zhu, "Road crack detection using deep convolutional neural network", *2016 IEEE international conference on image processing (ICIP)*, IEEE, 2016, pp. 3708-3712.

[15] V. Hoskere, Y. Narazaki, T.A. Hoang, B. Spencer Jr, "MaDnet: multi-task semantic segmentation of multiple types of structural materials and damage in images of civil infrastructure", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10, 757-773, (2020).

[16] O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox, "Unet: Convolutional networks for biomedical image segmentation", *International Conference on Medical image computing and computerassisted intervention*, Springer, pp. 234, (2015).

[17] Z. Liu, Y. Cao, Y. Wang, W. Wang, "Computer vision-based concrete crack detection using U-net fully convolutional networks", A*utomation in Construction*, 104, pp. 129-139, (2019).

[18] L.C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, A.L. Yuille, "Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution and fully connected crfs", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 40(4), pp. 834-848, (2017).

[19] L.-C. Chen, G. Papandreou, F. Schroff, H. Adam, "Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation", *arXiv preprint arXiv*,1706.05587, (2017).

[20] L.C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, H. Adam, "Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation", *the European conference on computer vision (ECCV)*, pp. 801-818, (2018).

[21] Zhang, Z., Wen, G., & Chen, S., "Weld image deep learning-based on-line defects detection using convolutional neural networks for Al alloy in robotic arc welding", *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 208-216, (2019).

[22] Feng, S., Zhou, H., & Dong, H., "Using deep neural network with small dataset to predict material defects", *Materials & Design*, 162, 300-310, (2019).

[23] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens, Q.V. Le, "Learning transferable architectures for scalable image recognition", *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 8697-8710, (2018).

[24] Zhang, Y., You, D., Gao, X., Zhang, N., & Gao, P. P., "Welding defects detection based on deep learning with multiple optical sensors during disk laser welding of thick plates", *Journal of Manufacturing Systems*, 51, 87-94, (2019).

[25] Chollet, F., "Deep Learning with Python", *United States: Manning Publications*, (2018).

[26] Hou, W., Wei, Y., Guo, J., & Jin, Y., "Automatic detection of welding defects using deep neural network" *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 933, No. 1, p. 012006, IOP Publishing, (2017, December).

[27] Deng, L., "A tutorial survey of architectures, algorithms, and applications for deep learning", *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, (2014).

Journal Ferdowsi Civil Engineering , 35, 4, 2022. (87-110)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir

Evaluation of Mechanical Properties of Concrete by Replacing Natural Aggregates with Fine and Coarse Recycled Aggregates

Research Article

Aref Sarhanghi[1], Fereydoon Omidinasab[2], Ahmad Dalvand[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77651.1164

1. Introuduction

Recycled concrete aggregates have the most abundance compared to other recycled aggregates. In this research, by using recycled concrete aggregates instead of natural aggregates, the mechanical properties of this type of concrete were investigated. Reviewing previous studies showed that most of the studies have focused on the percentage of coarse aggregate replacement, moisture content of recycled aggregate, mechanical properties, efficiency, shrinkage, water-to-cement ratio in Recycled Aggregate Concrete (RAC) samples. In most of the studies, the properties of fresh and hardened concrete containing recycled concrete aggregates have been conducted and little research has been done on the replacement of recycled concrete aggregates. Moreover, no special work has been done on RAC energy absorption. The innovation of this research is that three groups of RAC samples were made with the replacement of recycled concrete fine aggregate, the replacement of recycled concrete coarse aggregate and the simultaneous replacement of recycled concrete fine aggregate and coarse aggregate instead of natural aggregates in amounts of 0, 15, 30 and 45%. To compensate for the loss of mechanical properties of RAC, amounts of 7.5% and 15% of microsilica were substituted for cement. Energy absorption parameter of recycled samples was investigated in addition to the mechanical properties of compressive strength, tensile strength, and bending strength.

2. Laboratory program

2.1. Recycle

For the recycle of aggregate materials, 20×20×20 cm concrete samples available in the concrete laboratories of Khorram Abad city with a grade of 400 kg/m3 were used. These samples were crushed using a stone crusher and in sizes fine and coarse particles were separated and finally in the university laboratory and with their granulation by performing a sieve test, were sieved into sand sizes, and used.

2.2. Material

The cement used in this research is Portland cement type II and two different types of aggregate including one type Natural Aggregate (NA) and one type Aggregate Recycled from Recycle Aggregate (RA) with grade 400 were used. These aggregates were prepared with the same grading. Moreover, microsilica was used in the production of Azna factory in Lorestan province. Carboxylate super plasticizers were also used in all mixing designs.

The amount of water absorption for NA and RA was 4.16% and 8.76%, respectively. The increase in water absorption of RA compared to NA is reasonable due to the mortar attached to the surface of these aggregates. Moreovr, the resistance of natural and recycled materials against wear and impact was determined and compared using the Los Angeles Test. The abrasion rate for NA and RA was 23.11 and 28.54%, respectively. This indicates that RA has shown a lower abrasion resistance than NA, which is reasonable considering the porous structure of RA and the mortar attached to their surface.

2.3. Mixing design

The variables of these mixing designs include the percentage of replacing sand, sand and NA sand with RCA, in the form of 0%, 15%, 30%, and 45%, as well as microsilica of 7.5% and 15%. The ratio of water to cement and the amount of super plasticizers were constant for all mixing plans and were considered equal to 0.42 and 4.2 kg/m3, respectively. A total of 21 mixing plans were designed for this research.

2.4. Samples

The compression samples made in this research are cubic and have dimensions 10×10×10 cm. In this experiment, cubic samples were made in 21 mixing designs. Three samples were made for each mixing design, and a total of 63 samples were made for this test. The samples were subjected to compressive tests using a 2000 kN digital

*Manuscript received: July 10; 2022. Revised, September 7, 2022. Accepted, December 12, 2022.

1. MSc Structures, Technical and Engineering Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

[2]. Corresponding author. Associate Professor in Structures, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran. **Email**: omidinasab.f@lu.ac.ir

[3]. Associate professor in Structures, Technical and Engineering Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

concrete breaker jack with a loading speed of 0.3 MPa/s according to ASTM C39 standard.

The Brazilian tensile strength test was performed according to the ASTM C496 standard with a loading rate of 0.05 MPa/s. The test was performed using a digital testing machine with a capacity of 2000 kN. This test was performed on 21 cylindrical samples with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm, and the samples were made in 21 mixing designs and 3 samples for each mixing design.

Prismatic beams with dimensions of 6x8x32 cm according to ASTM C1609 standard were used to make bending samples in this research. Three samples were made for 21 designs of mixing prismatic beams. The three-point bending test was performed with a jack device with a capacity of 2000 kN. The displacement of the middle of the span was measured with a LVDT with a length of 150 mm.

3. Multivariate optimization

Using the results obtained from the experiments, an optimization method was studied to select the most appropriate mixing design in terms of mechanical properties (compressive, tensile, and bending resistances) and the amount of energy absorption. An optimization method basically consists of a performance function for decision making. The overall desirability of the mixing plans is shown in descending order in Figure 1. Among the recycled mixing designs that have the highest amount of overall desirability, the mixing designs contain 30% recycled sand with 7.5% microsilica, 45% recycled sand with 7.5% microsilica, 15% sand recycled with 7.5% microsilica, and 15% recycled sand with 15% microsilica are seen. It is interesting that the two recent designs with 15% recycled sand and 15% recycled sand, one with 7.5% microsilica and the other with 15% microsilica, have obtained similar results in terms of desirability.

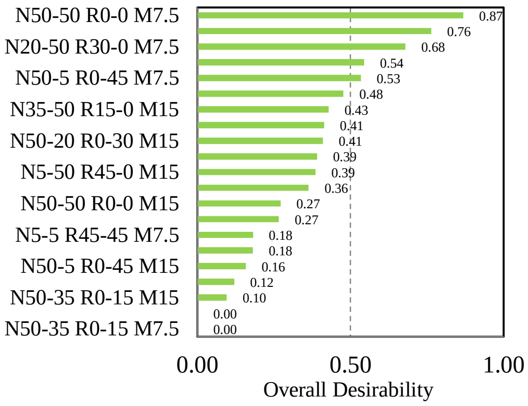


Figure 1. The overall desirability of mixing plans in descending order

4. Results and discussion

By using 0, 15, 30 and 45% of recycled aggregates instead of natural aggregates and using microsilica in different percentages of 7.5% and 15% and super plasticizers in the mixing designs, the following results were obtained regarding the mechanical strength of concrete:

- Adding microsilica of 7.5% and 15% to the samples with natural aggregate increased the compressive strength by 163% and 29%, respectively;
- In the samples with 7.5% microsilica, with the increase in the replacement percentage of recycled sand or recycled sand or recycled sand, the energy absorption has an increasing trend; but in the samples with 15% microsilica, with the increase in the replacement percentage of recycled sand or recycled sand or recycled sand, the amount of energy absorption showed a decreasing trend. In other words, energy absorption decreases with increasing amount of microsilica;
- Among all the mixing designs, the best mixing design in terms of compressive strength is the design containing 5.7% microsilica and 15% recycled sand, in terms of tensile strength, is the design containing 5.7% microsilica and 45% recycled sand, in terms of bending strength, is the design containing 7.5% microsilica and 30% recycled sand, in terms of energy absorption, is the design containing 15% microsilica and 15% recycled sand were identified.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

ارزیابی خواص مکانیکی بتن با جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.77651.1164

عارف سرهنگی[۱]   فریدون امیدی نسب[۲]   احمد دالوند[۳]

چکیده *سنگدانه‌های بتنی بازیافتی یکی از انواع سنگدانه‌های بازیافتی است که بیشترین فراوانی را نسبت به سایر سنگدانه‌های بازیافتی دارد. در این تحقیق با استفاده از جایگزینی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، خصوصیات مکانیکی این نوع بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی در چهار درصد ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤۵ انجام شد و این جایگزینی هم به صورت مستقل (شن یا ماسه به‌صورت مجزا) و هم به صورت همزمان (هم شن و هم ماسه با هم) انجام شد. با توجه به استفاده ۵۰ در صد شن و ۵۰ در صد ماسه در طرح اختلاط مرجع و با جایگزینی درصدهای فوق‌الذکر با سنگدانه‌های درشت و ریز بتنی بازیافتی تعداد ۲۱ طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفت. نسبت آب به سیمان در همه طرح‌های اختلاط ثابت نگه داشته و برابر با ۰/٤۲ در نظر گرفته شد. برای جبران کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از میکروسیلیس در درصدهای مختلف ۷،۵ و ۱۵ و فوق روان کننده در طرح‌های اختلاط استفاده شد. با انجام آزمایش‌های مختلف، خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین طرح اختلاط از نظر مقاومت فشاری، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت کششی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکرو سیلیس و ٤۵٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت خمشی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکرو سیلیس و ۳۰٪ شن بازیافتی، طرح حاوی ۱۵٪ میکرو سیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی مشخص شدند. با بررسی چندمتغیره خواص مکانیکی نمونه‌های بتن، مشخص گردید که طرح‌های اختلاط بازیافتی حاوی ۱۵٪، ۳۰٪ شن بازیافتی و ٤۵٪ ماسه بازیافتی با ۷/۵٪ میکرو سیلیس و همچنین طرح اختلاط ۱۵٪ ماسه بازیافتی با ۱۵٪ میکرو سیلیس، در بین طرح‌های اختلاط بازیافتی، بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند.*

واژه‌های کلیدی سنگدانه بازیافتی، سنگدانه طبیعی، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

Evaluation of Mechanical Properties of Concrete by Replacing Natural Aggregates with Fine and Coarse Recycled Aggregates

Aref Sarhanghi   Fereydoon Omidinasab   Ahmad Dalvand

Abstract *Recycled concrete aggregates are one of the types of recycled aggregates that have the most abundance compared to other recycled aggregates. In this research, by using the replacement of recycled concrete aggregates instead of natural aggregates, the mechanical properties of this type of concrete have been investigated. The replacement of natural aggregates with recycled aggregates was done in four percentages of 0, 15, 30 and 45, and this replacement was done both independently (i.e. sand or gravel separately) and simultaneously (both sand and gravel together). According to the use of 50% sand and 50% sand in the reference mixing plan and by replacing the percentages with coarse and fine recycled concrete aggregates, 21 mixing plans were used. The ratio of water to cement was kept constant in all mixing plans and was considered equal to 0.42. To compensate for the decrease in strength due to the replacement of recycled aggregates, micro silica in different percentages of 7.5 and 15 and super plasticizers were used in the mixing designs. By performing various tests, the mechanical properties of concrete samples were investigated. The results showed that the best mixing design in terms of compressive strength is the design containing 7.5% micro silica and 15% recycled sand, in terms of tensile strength, the design containing 7.5% micro silica and 45% recycled sand, in terms of flexural strength, the design containing 7.5% micro silica and 30% recycled sand, the plan containing 15% micro silica and 15% recycled sand was determined. By examining the mechanical properties of concrete samples, it was determined that the recycled mixing plans contain 15%, 30% recycled gravel and 45% recycled sand with 7.5% microsilica, as well as the mixing plan of 15% recycled sand with 15% microsilica. , among the recycled mixing plans, they had the highest amount of overall utility.*

Key words Recycled aggregate, natural aggregate, flexural strength, compressive strength, tensile strength.

* تاریخ دریافت مقاله۱٤۰۱/٤/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۹/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

(۲) نویسنده مسئول دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

(۳) دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

Email: omidinasab.f@lu.ac.ir

مقدمه

بتن یکی از متداولترین و پرمصرفترین مصالح ساختمانی است [1]. از کاربردهای بتن می‌توان در ساخت جاده‌ها، پل‌ها و سدها نام برد. جزء اصلی بتن سنگدانه است که حدود ۷۵ درصد حجم کل آن را تشکیل می‌دهد و آن را به تنها جزء مهم در تعیین خصوصیات کلی بتن تبدیل می‌کند [2]. تولید بتن مستلزم تهیه اجزایی است که از منابع طبیعی به دست آمده و آن را برای محیط‌زیست خطرناک می‌کند [3]. به دست آوردن سنگدانه باعث اختلال در معادن و در نتیجه کاهش منابع کمیاب می‌شود. یک جایگزین محبوب استفاده از سنگدانه بازیافتی (Recycle Aggregate) (RA) به دست آمده از زباله‌های بتن است. در چند دهه اخیر، سازه‌های بسیاری در خاورمیانه در طی رشد اقتصادی منطقه ساخته شده است. با این حال، این سازه‌ها به دلیل پایان عمر مفید خود در حال تخریب هستند. دلیل اصلی تخریب‌ها، عدم رعایت مشخصات سازه‌ها در زمان ساخت است. تخریب سازه‌ها منجر به ایجاد قلوه‌سنگ‌های بتنی می‌شود که می‌تواند بیشتر خرد شود و سنگدانه‌های بازیافتی تولید شود. این سنگدانه‌ها را می‌توان در مخلوط‌های بتن استفاده کرد که از جنبه‌های مختلف سودمند است. مزایای اصلی استفاده از RA کاهش مشکلات زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در منابع کل است [4]. آمارها بیان می‌کنند که ۷۰ درصد از ۱۰۰۰۰ تن زباله عمومی روزانه دبی نتیجه ضایعات ساختمانی و تخریب است [5].

برخی از مطالعات نشان دادند که با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بتنی بازیافتی RCA و طرح اختلاط بتن برای نسبت آب به سیمان کمتر، بتن با مقاومت بالاتری حاصل می‌گردد [6–10]. جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های ریز با افزودن مواد معدنی می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی برای افزایش مقاومت فشاری بتن سنگدانه بازیافتی مورد استفاده قرار گیرد [11]. در تحقیقی امکان جایگزینی سنگدانه‌های ریز طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی در بتن مورد بررسی قرار گرفت. میزان جایگزینی سنگدانه‌های ریز طبیعی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی بود. مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در ۲۸ روز عمل‌آوری، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی بتن به‌شدت تحت تأثیر درصد سنگدانه‌های بازیافتی قرار دارد. مشخص شد که با افزایش مقدار سنگدانه بازیافتی، مقاومت به‌صورت خطی کاهش یافت؛ بنابراین برای استفاده از ضایعات بازیافتی بتن به عنوان سنگدانه‌های ریز، لازم است تحقیقات تکمیلی با افزودنی‌های مناسب برای جبران افت مقاومت فشاری و خمشی انجام شود [12]. چندین مطالعه گزارش کردند که مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه بازیافتی (Recycle Aggregate Concrete) (RAC) به‌خصوص در مقاومت ۲۸ روزه، بالاتر از بتن مشابه ساخته شده توسط سنگدانه طبیعی به میزان ۲۵٪+ است، [13]. در تحقیقاتی ثابت شد که سطح رطوبت کل می‌تواند مقاومت را تا ۲۰٪ افزایش دهد یا آن را تا ۳۰٪ در صورت جایگزینی با ۱۰۰ درصد RA کاهش دهد، مقاومت فشاری نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر نسبت آب به سیمان قرار دارد [14 - 15]. سطح ادغام RA بر خواص مکانیکی RAC تأثیر می‌گذارد. محققان در [16] دریافتند که مقاومت فشاری بتن ۳۰–۴۵ مگاپاسکال با ۲۵ درصد RA درشت با استفاده از همان مقدار سیمان در NA قابل دستیابی است. مدول الاستیسیته RAC در مقایسه با بتن حاوی سنگدانه طبیعی (Natural Aggregate Concrete) (NAC) کمتر بود و مقاومت کششی RAC ممکن است بیشتر از NAC باشد. دلباس و همکاران [17] که اثرات استفاده از دوده سیلیس را با RA مطالعه کردند، به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری ۵٪ و ۱۰٪ دوده سیلیس به ترتیب ۳,۲۳٪ و ۱۲,۹٪ در مقایسه با RAC با ۰٪ دود سیلیس افزایش می‌یابد. افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن با جایگزینی دوده سیلیس به اثر پرکننده همراه با اثر پوزولانی نسبت داده می‌شود [18]. چندین مطالعه بیان کردند که اگر RA تا ۳۰٪ با سنگدانه‌های درشت طبیعی جایگزین شود، خواص مکانیکی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند [23-21 ,19]. از سوی دیگر، مطالعه انجام شده توسط [24] نشان داد که جایگزینی تمام سنگدانه‌های درشت با ۱۰۰ درصد RA کمترین تأثیر را بر عملکرد دارد. از نظر ارتباط بین مقاومت فشاری و سایر خواص مکانیکی مانند مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی، چندین مطالعه، یافته‌ها را گزارش کرده‌اند [25، 24، 20]. از نظر خواص مکانیکی بتن، یونس و مصطفی [26] خواص مکانیکی RAC را با خواص NAC مقایسه کردند. مقاومت فشاری مورد بررسی از ۳۰,۲ تا ٤١ مگاپاسکال در ۲۸ روز متغیر بود. مقاومت فشاری RAC تقریباً ۸٤ درصد NAC بود. از سوی دیگر، مقاومت کششی ۹۳ درصد NAC بود. یافته‌های مشابهی توسط اسماعیل و همکاران گزارش شده است. در سال ۱۳۸۸ علیرضا خالو و همکارانش[27]

به بررسی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی پرداختند. به‌کارگیری سنگدانه‌های بازیافتی موجب افت خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم گردید و دستیابی به خواص خودتراکم را دشوار ساخت. جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانهٔ طبیعی با درشت‌دانه بازیافتی منجر به ساخت بتن خودتراکم مناسبی گردید. در سال ۱۳۸۹ مقیمی و همکارانش[28] نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده باعث دستیابی به بتن بازیافتی با مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی گردید. بریتو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که کاربرد مصالح بازیافتی درشت‌دانه باکیفیت بالا تأثیرات ناچیزی نسبت به بتن معمولی دارد [29]. در سال ۲۰۱۷ آپورا [30] با جایگزینی ۲۰٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی در بتن به این نتیجه رسید که استفاده از سنگدانه بازیافتی تنها ۱۴٪ کاهش مقاومت را به دنبال داشته، اما با جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی شاهد کاهش مقاومت ۱۰٪ مقاومت فشاری، ۲۴٪ مقاومت کششی و ۳۴٪ مقاومت خمشی را نشان داد. طبق همین نتایج بیان نمود که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی میزان مقاومت در سنین بالا کاهش می‌یابد.

با جمع‌بندی مرور مطالعات انجام شده، مشخص گردید که بیشتر مطالعات بر روی درصد جایگزینی درشت‌دانه، میزان رطوبت سنگدانه بازیافتی، خواص مکانیکی، کارایی، انقباض، نسبت آب به سیمان در نمونه‌های RAC متمرکز شده و در اکثر این تحقیقات بر روی خواص بتن تازه و سخت شده حاوی درشت‌دانه بتنی بازیافتی انجام شده است و تحقیقات کمی بر روی جایگزینی ریزدانه بتنی بازیافتی انجام شده است. نوآوری پژوهش حاضر به این صورت است که سه گروه نمونه RAC با جایگزینی ریزدانه بتنی بازیافتی، جایگزینی درشت‌دانه بتنی بازیافتی و جایگزینی همزمان ریزدانه و درشت‌دانه بتنی بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی در مقادیر ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد انجام شد. برای جبران افت خواص مکانیکی RAC مقادیر ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان شد. علاوه بر خواص مکانیکی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نمونه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت.

برنامه آزمایشگاهی

بازیافت. برای بازیافت مصالح سنگدانه از نمونه‌های بتنی ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر موجود در آزمایشگاه‌های بتن شهر خرم‌آباد با عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد و این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنگ‌شکن خرد شده و در اندازه‌های ریز و درشت جداسازی شده و در نهایت در آزمایشگاه دانشگاه و با دانه‌بندی آنها با انجام آزمایش الک، در اندازه‌های شن و ماسه الک شده و مورداستفاده قرار گرفت. در شکل (۱) سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نشان‌داده‌شده است.

مصالح. سیمان استفاده شده در تحقیق، سیمان پرتلند نوع II بوده و وزن مخصوص و سطح مخصوص سیمان مصرفی به ترتیب ۳/۱ g/cm^3 و ۳۰۰۰ cm^2/g می‌باشد که منطبق بر آیین‌نامهٔ ACI-318-14 [31] و بر اساس استاندارد ASTM C150/C150M-17 [32] می‌باشد. در جداول (۱ و ۲) به ترتیب، آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده‌است. دو نوع سنگدانه مختلف شامل یک نوع (NA سنگدانه طبیعی) و یک نوع (RA سنگدانه بازیافتی از نخاله‌های بتنی) با عیار ۴۰۰ استفاده شد. این سنگدانه‌ها با دانه‌بندی یکسانی تهیه شدند. همچنین میکروسیلیس مورد استفاده تولید کارخانه ازنا در استان لرستان است. از افزودنی‌های روان‌ساز کربوکسیلاتی به عنوان فوق روان کننده در همه طرح‌های اختلاط نیز استفاده شده است.

(الف)	(ب)	(ج)	(د)	(و)

شکل ۱ سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی و میکروسیلیس: الف) شن طبیعی، ب) ماسه طبیعی، ج) شن بازیافتی، د) ماسه بازیافتی، و) میکروسیلیس

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	CaO.f	Cl	L.O.I
(٪)	21.5	5.1	4.4	63.2	1.75	2.1	---	---	0.75	---	1.05

جدول ۲ مشخصات فیزیکی سیمان

بلین (cm^2/gr)	باقی‌مانده روی الک ۹۰ میکرون (Seive # 170)	انبساط طولی	درصد آب	زمان‌گیرش اولیه (min)	زمان‌گیرش نهایی (min)
3000	-	0.03	---	130	215

خصوصیات NA و RA. سنگدانه‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده بتن هستند که خصوصیات آنها نقش به‌سزایی در رفتار بتن دارد. چگالی و جذب آب دو پارامتر مهم در بررسی خصوصیات سنگدانه‌ها هستند. این دو پارامتر برای NA و RA محاسبه شدند. وزن مخصوص سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی (NA و RA) به ترتیب ۲/۶۵ و ۲/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بودند [31]. این نتایج نشان دهنده آن است که وزن مخصوص RAکمتر از وزن مخصوص NA است. به جهت تعیین میزان ملات چسبیده به سطح RA آیین‌نامه مشخصی وجود ندارد. چندین پیشنهاد برای به دست آوردن مقدار ملات چسبیده به سطح RA وجود دارد که در این تحقیق از روش پیشنهادی Sanchezو Gutierrez [33] استفاده شده است. برای کل سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در این تحقیق و قبل از اینکه نمونه‌ها ساخته شود این آزمایش انجام شد، چرا که ملات چسبیده به سنگدانه‌ها، بر روی مقدار جذب آب و چگالی آنها تأثیر خواهد داشت. در این تحقیق چون نمونه‌های سنگدانه‌های بازیافتی بتنی از یک منبع تأمین شده؛ لذا یک نمونه از آن انتخاب شد و این آزمایش روی آن انجام گردید. در صورتی که منبع تهیه سنگدانه‌ها متفاوت باشد بایستی این آزمایش برای هرکدام از آنها انجام گردد. بر مبنای این پیشنهاد نمونه‌ای از RA به مدت ۲ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. سپس به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۵۰۰°C خشک و سپس سریعاً در آب سرد قرار داده شدند. نمونه‌ها بعد از سرد شدن با استفاده از چکش لاستیکی به آرامی مالش داده شدند تا ملات چسبیده به سطح آنها جدا شود. بعد از انجام مراحل فوق با گذراندن نمونه از الک شماره ٤ درصد وزنی ملات چسبیده به RA به مقدار ۱٤ درصد به دست آمد. جذب آب NA و RA بر اساس ASTM C125 [34] محاسبه شد. میزان جذب آب برای NA و RA به ترتیب ٤/۱٦ و ۸/۷٦ درصد به دست آمد. افزایش جذب آب RA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است. همچنین در این تحقیق با استفاده از دستگاه لس‌آنجلس مقاومت مصالح طبیعی و بازیافتی در مقابل سایش و ضربه تعیین و با هم مقایسه شد. این آزمایش بر اساس ASTM C131 [35] انجام شد. میزان ساییدگی برای NA و RA به ترتیب ۲۳/۱۱ و ۲۸/٥٤ درصد به دست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که RA در مقابل ساییدگی مقاومت کمتری را نسبت به NA از خود نشان داده است که با توجه به ساختار متخلخل RA و ملات چسبیده به سطح آنها، این نتیجه منطقی است.

طرح اختلاط. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این تحقیق در جدول (۱) نشان داده شده است. متغیرهای این طرح‌های اختلاط شامل درصد جایگزینی ماسه، شن و شن و ماسه NA با RCA، به‌صورت ۰، ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد و همچنین میکروسیلیس به مقدار ۷/۵٪ و ۱۵٪ است. مقدار نسبت آب به سیمان و مقدار فوق روان‌کننده برای همه طرح‌های اختلاط ثابت بوده و به ترتیب برابر با ۰/٤۲ و ٤/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد ۲۱ طرح اختلاط برای این تحقیق طراحی گردید. در ادامه جزئیات این طرح‌های اختلاط در جدول (۳) ارائه شده است. ترتیب نام‌گذاری اسامی طرح‌های اختلاط به این صورت است که حرف N و R به معنی سنگدانه طبیعی و بازیافتی است و اعداد جلوی این حروف به ترتیب درصد شن و ماسه است. حرف M هم به معنی میکروسیلیس است. به عنوان مثال طرح اختلاط N50-35 R0-15 M15 به این معنی است که درصد شن و ماسه طبیعی به ترتیب ۵۰ و ۳۵ درصد است و درصد شن و ماسه بازیافتی به ترتیب صفر و ۱۵ درصد است و در این طرح اختلاط مقدار میکروسیلیس هم ۱۵ درصد است. ذکر این نکته لازم است که در طرح اختلاط مرجع درصد سنگدانه طبیعی و بازیافتی ۵۰ درصد و بدون میکروسیلیس در نظر گرفته شده که به‌عنوان طرح اختلاط شمارهٔ ۲۱ در جدول فوق ارائه شده است.

در همه طرح‌های اختلاط مقدار سیمان ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت آب به سیمان ۰/۴۲، مقدار فوق روان کننده ۴/۲ کیلوگرم بر متر مکعب است.

ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری

نمونه‌های فشاری ساخته شده در این پژوهش به‌صورت مکعبی و دارای ابعاد (۱۰×۱۰×۱۰) سانتی‌متر هستند. در این آزمایش نمونه‌های مکعبی در ۲۱ طرح اختلاط و برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شده و در مجموع ۶۳ نمونه برای این تست ساخته شد. برای ساخت نمونه‌ها از قالب پلاستیکی استفاده شده است. نمونه‌ها با استفاده از جک بتن شکن ۲۰۰۰ کیلو نیوتن دیجیتالی و با سرعت بارگذاری ۰/۳ MPa/s مطابق با استاندارد ASTM C39 [36] مورد آزمایش فشاری قرار گرفتند. برای به دست آوردن مقاومت فشاری مشخصه هر نمونه، از سه نمونه (آزمونه) مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای ۶۳ نمونه در جدول (۳) ارائه شده است. مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی (شکست) بتن با استفاده از روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌گردند [31]:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad (۱)$$

$$f_r = 0.62\lambda\sqrt{f_c'} \quad (۲)$$

نمونه‌های مورد آزمایش و همچنین نحوهٔ شکست نمونه‌ها پس از آزمایش در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته برخی نمونه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است.

(الف) (ب) (ج)

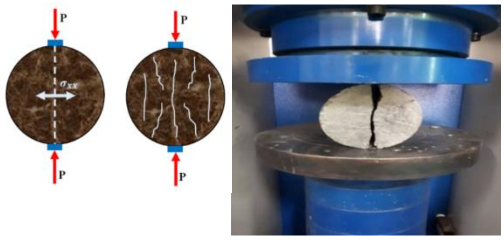
شکل ۲ آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی: الف) نحوهٔ تست، ب) نمونه‌های ساخته شده قبل از آزمایش و ج) نحوهٔ شکست نمونه‌ها بعد از آزمایش

جدول ۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

No.	Mix Design	Compressive Strength (MPa)			
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
1	N50-50 R0-0 M7.5	79.4	74.3	59.8	71.17
2	N35-50 R15-0 M7.5	78.6	76.5	81.5	78.87
3	N50-35 R0-15 M7.5	51.3	68.6	41.1	53.67
4	N35-35 R15-15 M7.5	54.3	51.8	63.7	56.60
5	N20-50 R30-0 M7.5	43.9	55.9	72.1	57.30
6	N50-20 R0-30 M7.5	43.2	47.1	56.2	48.83
7	N20-20 R30-30 M7.5	52.3	27.2	51.6	43.70
8	N5-50 R45-0 M7.5	55.0	42.0	18.6	38.53
9	N50-5 R0-45 M7.5	42.3	25.6	56.2	41.37
10	N5-5 R45-45 M7.5	46.8	40.9	57.4	48.37
11	N50-50 R0-0 M15	11.2	33.6	60.2	35.00
12	N35-50 R15-0 M15	40.2	40.5	46.5	42.40
13	N50-35 R0-15 M15	27.0	31.6	27.9	28.83
14	N35-35 R15-15 M15	61.7	46.3	69.0	59.00
15	N20-50 R30-0 M15	43.2	46.1	44.5	44.60
16	N50-20 R0-30 M15	51.9	56.3	62.2	56.80
17	N20-20 R30-30 M15	32.1	38.1	27.5	32.57
18	N5-50 R45-0 M15	48.6	52.3	29.4	43.43
19	N50-5 R0-45 M15	42.6	44.1	61.8	49.50
20	N5-5 R45-45 M15	16.4	24.6	22.0	21.00
21	N50-50 R0-0 M0	32.6	15.3	33.3	27.07

مقاومت کششی بتن (دو نیم شدن)

آزمون مقاومت کششی برزیلی (دو نیم شدن)، مطابق با استاندارد ASTM C496 [37] با سرعت بارگذاری ۰٫۰۵ MPa/s انجام شد. آزمایش با استفاده از یک ماشین تست دیجیتال به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن انجام شد. نمونه‌های ساخته شده، نحوه آزمایش و نحوه شکست نمونه‌ها پس از آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. این آزمایش بر روی ۲۱ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد و نمونه‌ها در ۲۱ طرح اختلاط و برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شد که نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است.



(الف)

(ب)

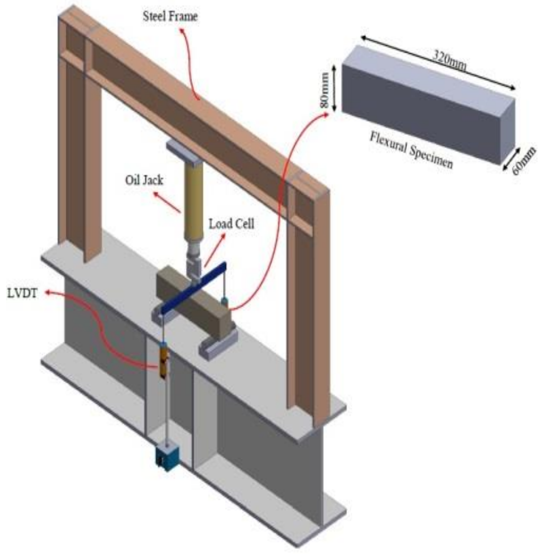
(ج)

شکل ۳ آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای: الف) نحوهٔ تست، ب) نمونه‌های ساخته شده قبل از آزمایش و ج) نحوهٔ شکست نمونه‌ها بعد از آزمایش

مقاومت خمشی تیرهای منشوری

برای ساخت نمونه‌های خمشی در این تحقیق تیرهای منشوری به ابعاد ۶×۸×۳۲ سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM C1609 [38] استفاده شد. تعداد ۳ نمونه برای ۲۱ طرح اختلاط تیرهای منشوری ساخته شد (شکل ٤). جزئیات آزمایش مقاومت خمشی از طریق آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) مطابق شکل (۵) نشان داده شده است. نحوه آزمایش و شکست تیرها در شکل (٦) قابل مشاهده است. آزمایش خمش سه نقطه‌ای با یک دستگاه جک به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و جابه‌جایی وسط دهانه با LVDT با طول ۱۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج مقاومت خمشی در جدول (۵) ارائه شده است.

شکل ٤ نمونه‌های منشوری (تیر) ساخته شده برای آزمایش مقاومت خمشی



شکل ۵ جزئیات دستگاه و آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

جدول ٤ نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

No.	Mix Design	Tensile Strength (MPa)			
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
1	N50-50 R0-0 M7.5	7.00	3.99	3.11	4.70
2	N35-50 R15-0 M7.5	5.05	3.39	4.27	4.24
3	N50-35 R0-15 M7.5	4.08	3.45	4.24	3.92
4	N35-35 R15-15 M7.5	4.33	4.27	3.68	4.09
5	N20-50 R30-0 M7.5	4.33	3.49	4.99	4.27
6	N50-20 R0-30 M7.5	3.67	3.36	4.05	3.69
7	N20-20 R30-30 M7.5	3.67	3.74	4.71	4.04
8	N5-50 R45-0 M7.5	5.49	4.52	3.64	4.55
9	N50-5 R0-45 M7.5	3.33	3.80	5.67	4.26
10	N5-5 R45-45 M7.5	3.17	2.73	3.92	3.28
11	N50-50 R0-0 M15	3.96	3.36	2.89	3.40
12	N35-50 R15-0 M15	4.21	4.98	4.11	4.43
13	N50-35 R0-15 M15	4.58	3.64	4.49	4.24
14	N35-35 R15-15 M15	3.05	3.49	2.92	3.15
15	N20-50 R30-0 M15	4.43	3.86	3.80	4.03
16	N50-20 R0-30 M15	4.65	3.14	3.05	3.61
17	N20-20 R30-30 M15	2.61	4.40	2.92	3.31
18	N5-50 R45-0 M15	3.30	4.27	3.55	3.71
19	N50-5 R0-45 M15	2.86	4.05	2.61	3.17
20	N5-5 R45-45 M15	3.49	2.92	3.01	3.14
21	N50-50 R0-0 M0	4.49	3.01	2.76	3.42

جدول ٥ نتایج مقاومت خمشی تیرهای منشوری

No.	Mix Design	Flexural Strength (MPa)			
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
1	N50-50 R0-0 M7.5	6.5	7.52	9.26	7.76
2	N35-50 R15-0 M7.5	8.36	6.49	7.24	7.36
3	N50-35 R0-15 M7.5	5.01	6.31	4.59	5.30
4	N35-35 R15-15 M7.5	5.83	5.08	6.56	5.82
5	N20-50 R30-0 M7.5	8.10	6.62	7.93	7.55
6	N50-20 R0-30 M7.5	5.15	7.61	7.24	6.66
7	N20-20 R30-30 M7.5	6.46	5.21	6.31	5.99
8	N5-50 R45-0 M7.5	8.23	5.88	7.55	7.22
9	N50-5 R0-45 M7.5	8.07	8.56	5.16	7.26
10	N5-5 R45-45 M7.5	5.55	6.42	5.32	5.76
11	N50-50 R0-0 M15	8.46	5.52	6.78	6.92
12	N35-50 R15-0 M15	6.13	5.03	7.27	6.14
13	N50-35 R0-15 M15	4.95	5.77	5.27	5.33
14	N35-35 R15-15 M15	7.58	4.73	7.63	6.64
15	N20-50 R30-0 M15	7.16	6.09	7.22	6.82
16	N50-20 R0-30 M15	5.74	6.70	7.06	6.5
17	N20-20 R30-30 M15	7.36	5.93	5.30	6.19
18	N5-50 R45-0 M15	6.10	6.13	7.63	6.62
19	N50-5 R0-45 M15	5.82	6.80	7.34	6.65
20	N5-5 R45-45 M15	5.84	5.31	5.40	5.51
21	N50-50 R0-0 M0	9.04	8.98	7.68	8.56

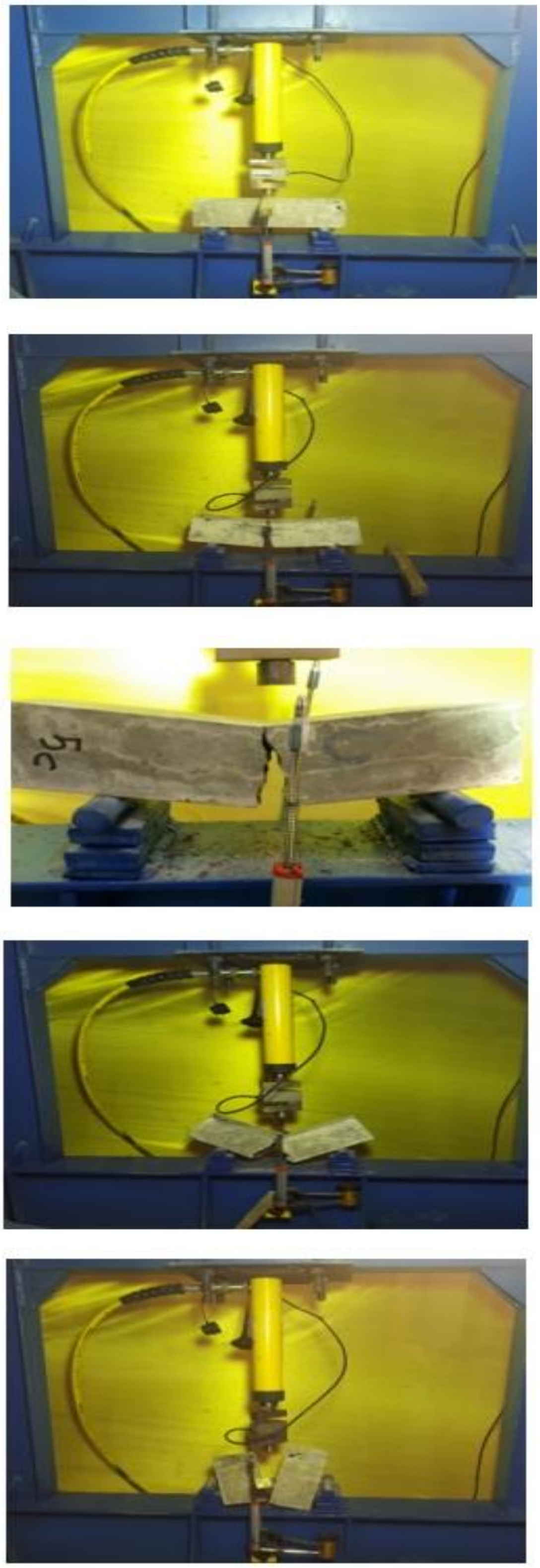
تجزیه و تحلیل نتایج

مقاومت فشاری. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها برای ۲۱ طرح اختلاط به دست آمد. این نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد مقاومت فشاری برای سه آزمونه در هر طرح اختلاط انجام شده است. در شکل (٦-الف) نمودار میله‌ای مقاومت فشاری میانگین سه نمونه در همه طرح‌های اختلاط نشان داده شده است. همان طور که در شکل (٦-الف) و همچنین جدول (۳) مشاهده می‌گردد بیشترین

مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲ بوده که در آن ۳۵٪ شن طبیعی، ۵۰٪ ماسه طبیعی، ۱۵٪ شن بازیافتی و بدون ماسه بازیافتی است. کمترین مقدار مقاومت فشاری هم مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲۰ بوده که در آن ۵٪ شن طبیعی، ۵٪ ماسه طبیعی، ٤۵٪ شن بازیافتی و ٤۵٪ ماسه بازیافتی است.

الف) نمونه‌های با ۷/۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، کم شده و به ترتیب ۱۵٪، ۳۰٪ و ٤۲٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱ کاهش داشته است (شکل ۷–ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۵ و ۸، کاهش‌یافته و به ترتیب ۲۰٪ و ٤٦٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است. البته در نمونه با طرح اختلاط شماره ۲، نه‌تنها کاهش نداشته بلکه به مقدار ۱۱٪ مقاومت فشاری افزایش داشته است (شکل ۷–ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷٪/۵ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، کاهش یافته و به ترتیب ۲۱٪، ۳۹٪ و ۳۲٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است (شکل ٦–ب).

با توجه به نتایج فوق، همان طور که انتظار داریم جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری شده است. همچنین گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی باعث کاهش کمتری در مقاومت فشاری شده است. گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت فشاری بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه ماسه بازیافتی تأثیر کمتری و نسبت به گروه شن بازیافتی تأثیر بیشتری در کاهش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ٦ نحوۀ آزمایش و شکست نمونه‌های تیر منشوری

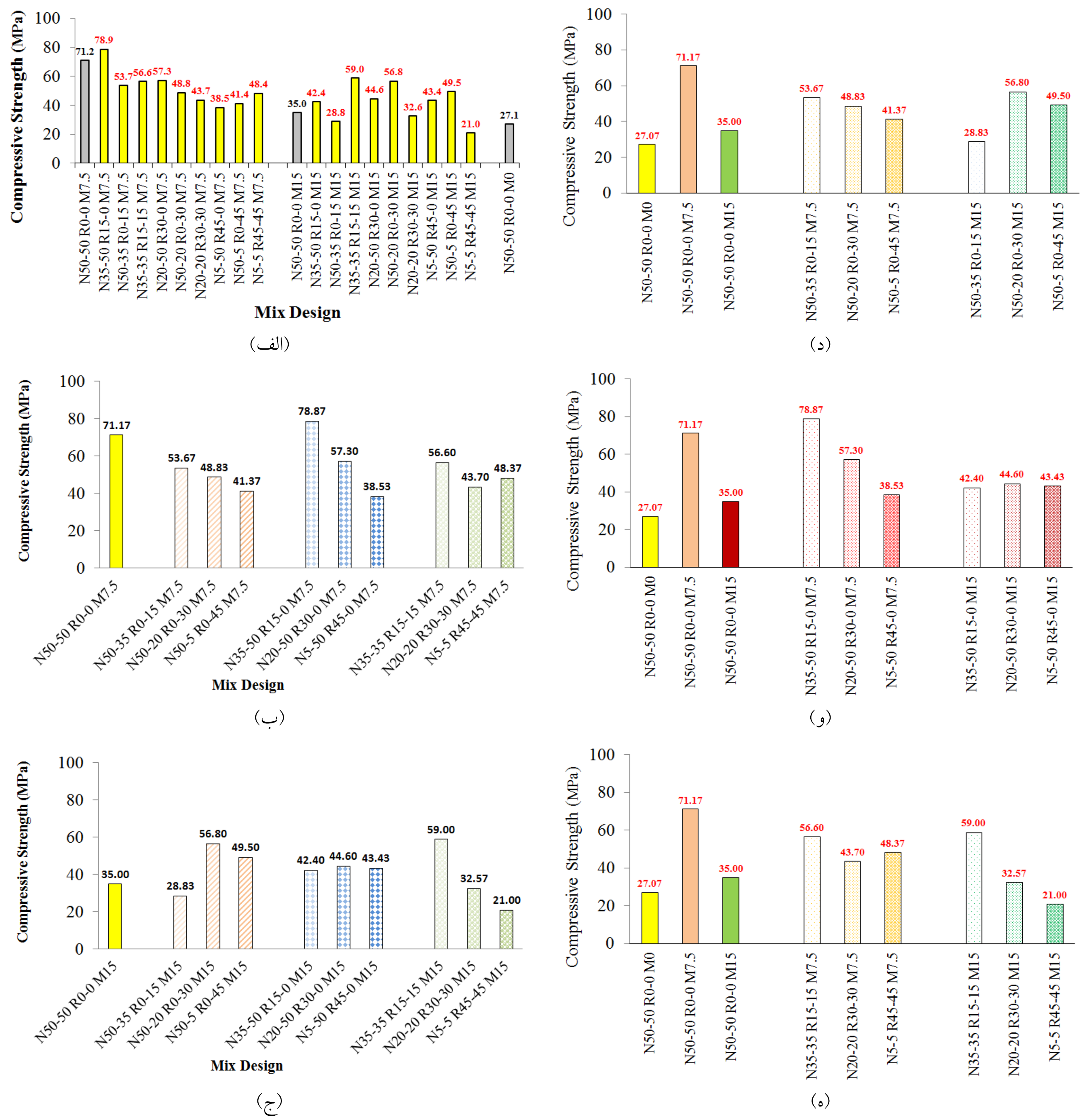
ب) نمونه‌های با ۱۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱۱ تا ۲۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤٥ درصد، مقدار مقاومت فشاری در برخی نمونه‌ها کاهش و در برخی نمونه‌ها افزایش یافته و به ترتیب حدود ۱۸٪ کاهش و ۱٦٪ و ۱۹٪ افزایش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱۱) نشان داده شده است (شکل ۷-ج).

با توجه به نتایج فوق مشخص می‌شود که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی همراه با میکروسیلیس، در اکثر نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی باعث افزایش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری شده است. همچنین گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی باعث افزایش کمتری در مقاومت فشاری شده است. گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت فشاری بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه شن بازیافتی تأثیر کمتری و نسبت به گروه شن و ماسه بازیافتی تأثیر بیشتری را در افزایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد.

ج) مقایسه نتایج نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس. مقایسه نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی (نمونه‌های با طرح اختلاط شمارهٔ ۱، ۱۱ و ۲۱) نشان می‌دهد که افزایش مقدار میکروسیلیس به مقدار ۷/۵٪ و ۱۵٪، باعث افزایش مقاومت فشاری به مقدار حدود ۱٦۰٪ و ۲۹٪ نسبت به نمونه مرجع بدون میکروسیلیس (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۲۱) شده است. به عبارتی با افزایش مقدار میکروسیلیس، رشد مقاومت فشاری کاهش داشته است (شکل ۷-د). مقایسه نمونه‌های سه گروه مختلف بازیافتی، حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس (۷/۵٪ و ۱۵٪) نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس، مقاومت فشاری در اکثر نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته در صورتی که در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت فشاری در اکثر نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (شکل ٦-د). در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شمارهٔ ۱ و ۱۱) و حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقدار مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۲۱) به ترتیب ۱٦۵٪ و ۲۹٪ رشد داشته است. جالب این است که در نمونه با ۷/۵ درصد میکروسیلیس مقدار رشد مقاومت فشاری نسبت به نمونه با ۱۵ درصد میکروسیلیس بیش از ۵ برابر رشد مقاومت داشته است.

در بررسی و مقایسه مقاومت فشاری در گروه شن بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ٤٦٪ کاهش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ۲۲٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ۱۳٪ افزایش داشته است (شکل ٦-و). در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری روندی کاهشی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت فشاری روندی تقریباً ثابتی داشته است (شکل ۷-و).

در بررسی و مقایسه مقاومت فشاری در گروه شن و ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ٤٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ۲۵٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت فشاری به مقدار ٥٦٪ کاهش داشته است (شکل ٦-ه).



شکل ۷ میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های سه آزمونه‌ای برای: الف) همه طرح‌های اختلاط، ب) طرح‌های اختلاط با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ج) طرح‌های اختلاط با ۱۵٪ میکروسیلیس، د) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف ماسه بازیافتی، و) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن بازیافتی، ه) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی.

کیفیت ملات قدیمی احاطه کننده RCA و کیفیت دو ناحیه انتقال بین سطحی (Interfacial Transition Zone) (ITZ) بین ملات قدیمی و RCA (ITZ قدیمی) و بین ملات قدیمی و ملات جدید (ITZ جدید) از جمله عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی می‌باشند. معمولاً ITZ قدیمی نسبت به ITZ جدید ضعیفتر است. بنابراین ITZ قدیمی می‌تواند به عنوان نقطه شروع و گسترش ترک‌ها و ایجاد خرابی‌ها در بتن‌های بازیافتی در نظر گرفته شود و این خود یکی از دلایل کاهش مقاومت این نوع بتن‌ها می‌باشد [39-40].

مقاومت کششی

همان طوری که در شکل (۸-الف) و همچنین جدول (٤) مشاهده

می‌گردد بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۱ بوده که در آن ۵۰٪ شن طبیعی، ۵۰٪ ماسه طبیعی، بدون شن و ماسه بازیافتی است. کمترین مقدار مقاومت کششی هم مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲۰ بوده که در آن ۵٪ شن طبیعی، ۵٪ ماسه طبیعی، ۴۵٪ شن بازیافتی و ۴۵٪ ماسه بازیافتی است.

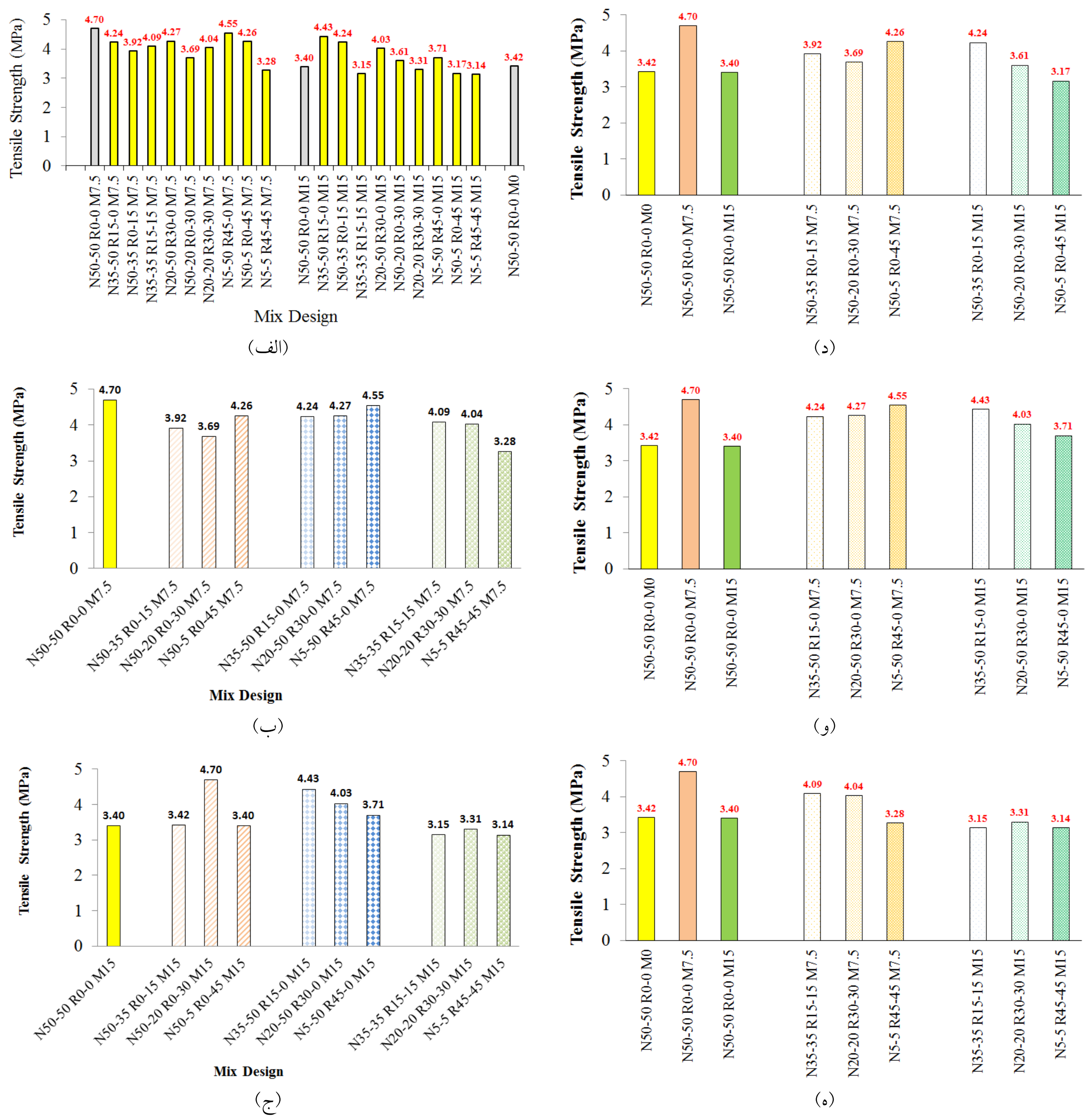
الف) نمونه‌های با ۷/۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شمارهٔ ۱ تا ۱۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش یافته و به ترتیب حدود ۱۷٪، ۲۱٪ و ۹٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۱) کاهش داشته است (شکل ۸-ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش‌یافته و به ترتیب حدود ۱۰٪، ۹٪ و ۳٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است (شکل ۸-ب). در بین نمونه‌های بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها، کاهش‌یافته و به ترتیب حدود ۱۳٪، ۱۴٪ و ۳۰٪ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است.

ب) نمونه‌های با ۱۵٪ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شمارهٔ ۱۱ تا ۲۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد، مقدار مقاومت کششی در برخی نمونه‌ها کاهش و در برخی نمونه‌ها افزایش یافته و به ترتیب حدود ۸۷٪ و ٦٪ افزایش و ۷٪ کاهش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شمارهٔ ۱۱) نشان داده شده است (شکل ۸-ج).

نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی باعث افزایش در مقدار مقاومت کششی شده است. همچنین گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی باعث کاهش در مقاومت کششی شده است. گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت کششی بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه ماسه بازیافتی تأثیر کمتری و نسبت به گروه شن و ماسه بازیافتی تأثیر را بیشتری در افزایش مقاومت کششی نشان می‌دهد.

ج) مقایسه نتایج نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس. با افزایش مقدار میکروسیلیس، رشد مقاومت فشاری کاهش داشته است (شکل ۸-د). مقایسه نمونه‌های سه گروه مختلف بازیافتی حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس (۵/٪۷ و ۱۵٪) نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی در همه نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته در صورتی که در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی در بیش از نیمی از نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است (شکل ۷-د). در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱ و ۱۱) و حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقدار مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع (نمونه با طرح اختلاط شماره ۲۱) به ترتیب ۳۷٪ افزایش و ۱٪ کاهش داشته است.

جالب این است که در نمونه با ۷/۵ درصد میکروسیلیس مقدار رشد مقاومت کششی نسبت به نمونه با ۱۵ درصد میکروسیلیس بیش از ۳۸٪ رشد مقاومت داشته است. در بررسی و مقایسه مقاومت کششی در گروه ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۱۳٪ کاهش داشته؛ در نمونه‌های با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۲۷٪ افزایش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۲۰٪ کاهش داشته است.



شکل ۸ میانگین مقاومت کششی نمونه‌های سه آزمونه‌ای برای: الف) همه طرح‌های اختلاط، ب) طرح‌های اختلاط با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ج) طرح‌های اختلاط با ۱۵٪ میکروسیلیس، د) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف ماسه بازیافتی، و) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن بازیافتی، ه) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی

در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً صعودی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً نزولی داشته است.

در بررسی و مقایسه مقاومت کششی در گروه شن بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۵٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ٦٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی به مقدار ۱۸٪ کاهش

داشته است (شکل ۸-و). در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی صعودی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی نزولی داشته است (شکل ۸-و).

در بررسی و مقایسه مقاومت کششی در گروه شن و ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ٪۷/۵ و ٪۱۵ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی به مقدار ٪۲۳ کاهش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی به مقدار ٪۱۸ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی به مقدار ٪٤ کاهش داشته است (شکل ۷-ه). در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی روندی نزولی داشته و در نمونه-های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور همزمان، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً ثابت داشته است (شکل ۷-ه).

با توجه به مقایسه همه نمونه‌های بازیافتی معلوم گردید که نمونه حاوی ٪۱۵ میکروسیلیس و ٪۳۰ ماسه بازیافتی، بیشترین مقدار مقاومت کششی و معادل با ٤/۷ مگاپاسکال را به خود اختصاص داده و بهترین طرح اختلاط از این حیث بوده و در رده بعدی نمونه حاوی ٪۷/۵ میکروسیلیس و ٪٤۵ شن بازیافتی، مقدار مقاومت کششی و معادل با ٤/۵۲ مگاپاسکال را به خود اختصاص داد.

ضعیف بودن ITZ قدیمی نسبت به ITZ جدید باعث کاهش مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی شده و این موضوع با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی بیشتر می‌شود. همچنین با توجه به خواص فیزیکی RCA، مانند سطوح ناهموار آنها، این سنگدانه‌ها می‌توانند شرایط ریز ترک‌ها را در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) بهبود بخشند و کشش شکافتن بتن را افزایش دهند [39-40].

مقاومت خمشی تیرهای منشوری

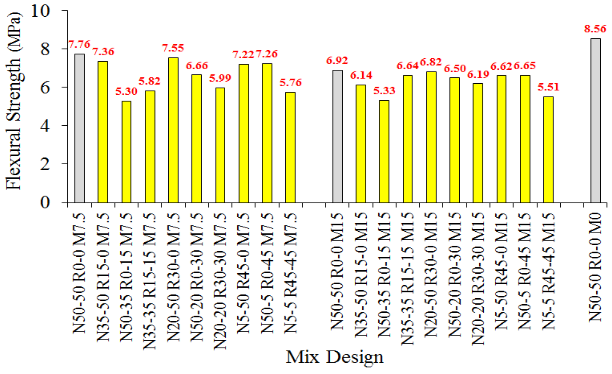
همان‌طوری که در شکل (۹-الف) مشاهده می‌گردد بیشترین مقدار مقاومت خمشی تیرهای منشوری مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۲۱ بوده که در آن ٪۵۰ شن طبیعی، ٪۵۰ ماسه طبیعی و بدون شن و ماسه بازیافتی و میکروسیلیس است. کمترین مقدار مقاومت خمشی هم مربوط به نمونه طرح اختلاط شماره ۳ بوده که در آن ٪۵۰ شن طبیعی، ٪۳۵ ماسه طبیعی، بدون شن بازیافتی و ٪۱۵ ماسه بازیافتی است.

الف) نمونه‌های با ٪۷/۵ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه-های بازیافتی با ٪۷/۵ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱ تا ۱۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها، کاهش‌یافته و به ترتیب ٪۳۲، ٪١٤ و ٪٦ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱) کاهش داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ٪۷/۵ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، در حالتی که ماسه بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی نشده است، مقدار مقاومت خمشی تیرهای منشوری نمونه‌ها کاهش یافته و به ترتیب ٪۵، ٪۳ و ٪۷ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ٪۷/۵ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، کاهش یافته و به ترتیب ٪۲۵، ٪۲۳ و ٪۲٦ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است (شکل ۹-ب).

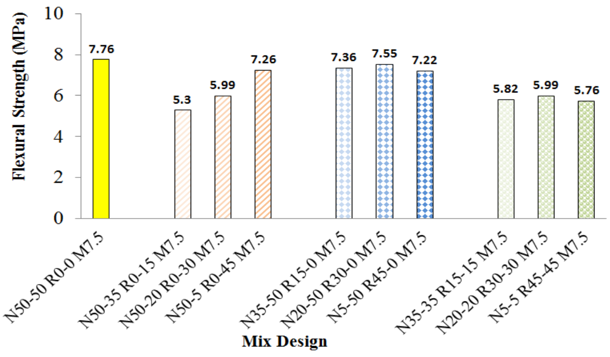
ب) نمونه‌های با ٪۱۵ درصد میکروسیلیس. در بین نمونه‌های بازیافتی با ٪۱۵ میکروسیلیس (نمونه‌هایی با طرح اختلاط شماره ۱۱ تا ۲۰)، با افزایش ماسه بازیافتی و جایگزینی آن با ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت خمشی کاهش یافته و به ترتیب حدود ٪۲۳، ٪٦ و ٪٤ کاهش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی (نمونه با طرح اختلاط شماره ۱۱) نشان داده شده است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ٪۱۵ میکروسیلیس، با افزایش شن بازیافتی و جایگزینی آن با شن طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، در حالتی که ماسه بازیافتی جایگزین ماسه طبیعی نشده است، مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش داشته و به ترتیب حدود ٪۱۱، ٪۱ و ٪٤ نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی کاهش داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با ٪۱۵ میکروسیلیس، با افزایش همزمان شن و ماسه بازیافتی و

جایگزینی همزمان آن با شن و ماسه طبیعی به مقدار ۱۵، ۳۰ و ٤۵ درصد، مقدار مقاومت خمشی کاهش داشته و حدود ٤٪، ۱۱٪ و ۲۰٪ کاهش نسبت به نمونه حاوی شن و ماسه طبیعی داشته است (شکل ۹-ج).

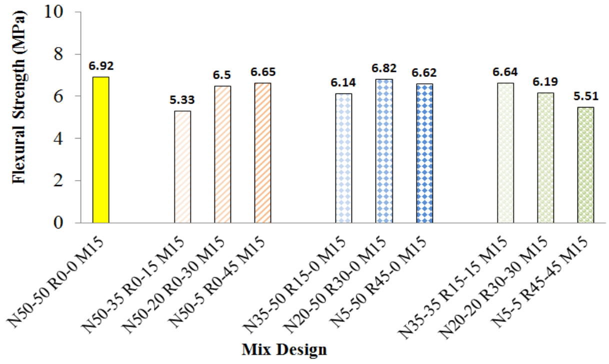
با توجه به نتایج فوق مشخص می‌شود که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی، در همه نمونه-ها باعث کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین سه گروه جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، گروه جایگزینی شن بازیافتی با شن طبیعی باعث کاهش کمتری در مقدار مقاومت خمشی شده است. همچنین گروه جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی با شن و ماسه طبیعی باعث کاهش بیشتری در مقاومت خمشی شده است. گروه جایگزینی ماسه بازیافتی با ماسه طبیعی از نظر تأثیر بر مقاومت خمشی بین دو گروه فوق قرار گرفته و نسبت به گروه شن بازیافتی تأثیر بیشتری و نسبت به گروه شن و ماسه بازیافتی تأثیر کمتری در کاهش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.



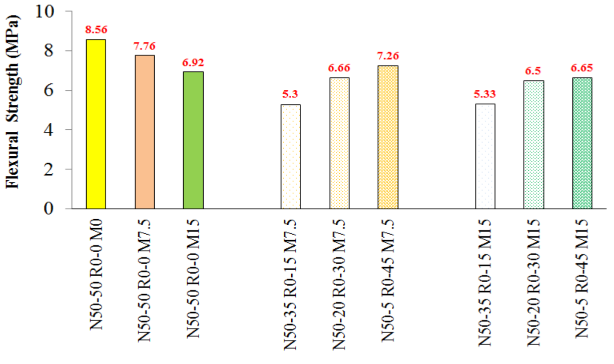
(الف)



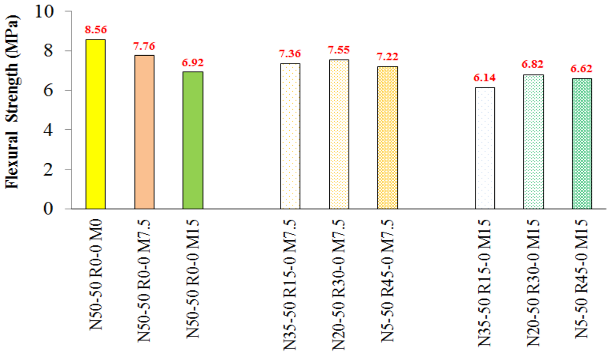
(ب)



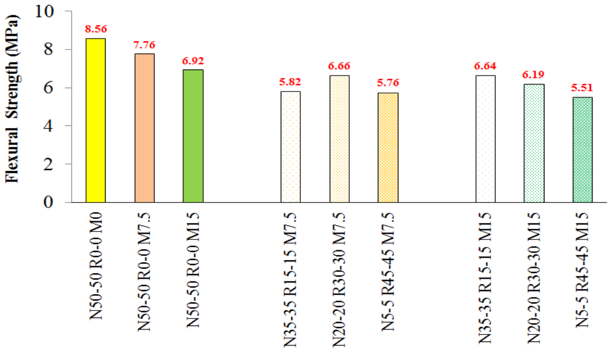
(ج)



(د)



(و)



(ه)

شکل ۹ میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های سه آزمونه‌ای برای: الف) همه طرح‌های اختلاط، ب) طرح‌های اختلاط با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ج) طرح‌های اختلاط با ۱۵٪ میکروسیلیس، د) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف ماسه بازیافتی، و) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن بازیافتی، ه) نمونه‌های مشابه با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی

ج) مقایسه نتایج نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس.
مقایسه نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی (نمونه‌های با طرح اختلاط شماره ۱، ۱۱ و ۲۱) نشان می‌دهد که افزایش مقدار میکروسیلیس به مقدار ۷/۵٪ و ۱۵٪ (در نمونه‌های با طرح اختلاط شماره ۱ و ۱۱)، باعث کاهش مقاومت خمشی به مقدار حدود ۹٪ و ۱۹٪ نسبت به نمونه مرجع بدون میکروسیلیس (نمونه با طرح اختلاط شماره ۲۱) شده است. به عبارتی با افزایش مقدار میکروسیلیس، رشد مقاومت خمشی کاهش داشته است. مقایسه نمونه‌های سه گروه مختلف بازیافتی، حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس (۷/۵٪ و ۱۵٪) نشان می‌دهد که هم در نمونه‌های حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس، مقاومت خمشی در همه نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته و هم در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت خمشی در همه نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش داشته است. در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی و حاوی ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقدار مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۹٪ و ۱۹٪ کاهش داشته است. جالب این است که در نمونه با ۷/۵ درصد میکروسیلیس مقدار رشد مقاومت خمشی نسبت به نمونه با ۱۵ درصد میکروسیلیس ۱۲٪ رشد مقاومت خمشی داشته است (شکل ۹-د).

در بررسی و مقایسه مقاومت خمشی در گروه ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۲٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۸٪ کاهش داشته است. در نمونه‌های با ۷/۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی صعودی داشته است (شکل ۹-د).

در بررسی و مقایسه مقاومت خمشی در گروه شن بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱۷٪ کاهش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱۰٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۸٪ کاهش داشته است. در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً صعودی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً صعودی داشته است (شکل ۹-و). در بررسی و مقایسه مقاومت خمشی در گروه شن و ماسه بازیافتی در نمونه‌های مشابه با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس مشخص شد که با افزایش میکروسیلیس از ۷/۵ به ۱۵ درصد، در نمونه‌های با ۱۵ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۱٤٪ افزایش داشته، در نمونه‌های با ۳۰ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ۷٪ کاهش داشته و در نمونه‌های با ٤٥ درصد شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی به مقدار ٤٪ کاهش داشته است. در نمونه‌های با ۷/۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً نزولی داشته و در نمونه‌های با ۱۵ درصد میکروسیلیس با افزایش مقدار شن و ماسه بازیافتی به طور هم‌زمان، مقدار مقاومت خمشی روندی نزولی داشته است (شکل ۹-ه).

با توجه به مقایسه همه نمونه‌های بازیافتی معلوم گردید که نمونه حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۳۰٪ شن بازیافتی، بیشترین مقدار مقاومت خمشی و معادل با ۷/۵۵ مگاپاسکال را به خود اختصاص داده و بهترین طرح اختلاط از این حیث بوده و در رده بعدی، نمونه حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی و معادل با ۷/۳٦ مگاپاسکال را به خود اختصاص داد. با توجه به خواص فیزیکی RCA مانند سطح ناهموار آنها، استفاده از این سنگدانه‌ها انسجام بین اجزای بتن در ITZ را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کنترل انتشار ترک در زمینه با ایجاد اترینگیت سوزنی شکل نیز یکی از دلایل افزایش مقاومت خمشی بتن است [40-41].

بهینه‌یابی چندمتغیره

با استفاده از نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها، یک روش بهینه‌یابی مورد مطالعه قرار گرفت، تا مناسبترین طرح اختلاط از نظر خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی) انتخاب گردد. یک روش بهینه‌یابی اساساً از یک تابع عملکرد برای تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. در این تابع متغیرهای مستقل و

وابسته بر فرمولاسیون و نتیجه تصمیم نهایی تأثیر می‌گذارند. مصالح تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط، متغیرهای مستقل هستند، در حالی که خواص مکانیکی متغیرهای وابسته‌ای هستند که بر اساس متغیرهای مستقل تغییر می‌کنند. اگر فقط یک معیار وجود داشته باشد، حداکثر یا حداقل مقدار آن به راحتی تعیین می‌شود و نیازی به بهینه‌یابی نیست، اما از آنجایی که در این تحقیق معیارهای مختلفی همچون مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی مدنظر است، بایستی طرح‌های اختلاطی با بیشترین مقاومت از طریق بهینه‌یابی انتخاب شوند. از آنجایی که بهینه‌یابی معمولاً شامل تابع هدف است، در این تحقیق از یک روش بهینه‌یابی چند متغیره استفاده شده است که تابع مطلوبیت نامیده می‌شود [42]. مقدار این تابع بین ۰ و ۱ است. مقدار تابع مطلوبیت با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد [43].

$$d_j = \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j}\right]^{t_j} \qquad (۳)$$

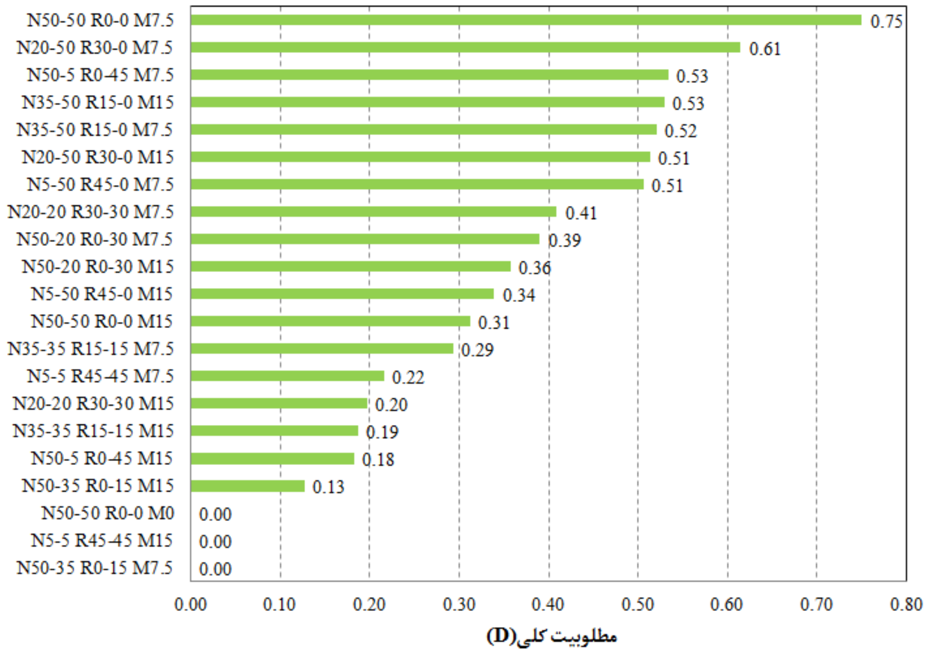
که در آن، d_j مقدار تابع مطلوبیت، Y_j پاسخ و $\min f_j$ و $\max f_j$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار بین پاسخ‌های مربوط به معیار j^{th} می‌باشد. توان t_j پارامتر وزنی برای معیار j^{th} است. از آنجایی که معیارهای این تحقیق دارای اهمیت یکسانی می‌باشند، پارامتر وزنی برای تمامی آنها مساوی ۱ در نظر گرفته شد. تابع مطلوبیت برای معیارهایی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی که حد بالای آن مطلوب می‌باشد، با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد. سپس، تابع مطلوبیت کلی (D) به عنوان تابع هدف مطابق با رابطه (٤) در نظر گرفته شد [43].

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \ldots . \times d_m)^{\frac{1}{m}} \qquad (٤)$$

که در آن، m تعداد معیارها است. از آنجایی که در این تحقیق معیارهای تصمیم‌گیری شامل خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی است، m =4 در نظر گرفته شد. هر قدر مقدار تابع مطلوبیت کلی برای یک طرح اختلاط بیشتر باشد، نشان دهنده آن است که این طرح اختلاط مقاومت مکانیکی بیشتر دارد. نتایج مربوط به بهینه‌یابی در جدول (٦) نشان داده شد. برای طرح اختلاطی که تابع مطلوبیت مربوط به حتی یک معیار برای آن صفر به دست آمده باشد، تابع مطلوبیت کلی آن نیز صفر خواهد شد.

جدول ٦ میزان مطلوبیت طرح‌های اختلاط

طرح اختلاط	مطلوبیت			مطلوبیت کلی
	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	
N50-50 R0-0 M7.5	0.87	1.00	0.75	0.75
N20-50 R30-0 M7.5	0.63	0.72	0.69	0.61
N35-50 R15-0 M15	0.37	0.83	0.26	0.53
N50-5 R0-45 M7.5	0.35	0.72	0.60	0.53
N35-50 R15-0 M7.5	1.00	0.71	0.63	0.52
N20-50 R30-0 M15	0.41	0.57	0.47	0.51
N5-50 R45-0 M7.5	0.30	0.90	0.59	0.51
N20-20 R30-30 M7.5	0.39	0.58	0.21	0.41
N50-20 R0-30 M7.5	0.48	0.35	0.42	0.39
N50-20 R0-30 M15	0.62	0.30	0.37	0.36
N5-50 R45-0 M15	0.39	0.37	0.40	0.34
N50-50 R0-0 M15	0.24	0.17	0.50	0.31
N35-35 R15-15 M7.5	0.62	0.61	0.16	0.29
N5-5 R45-45 M7.5	0.47	0.09	0.14	0.22
N20-20 R30-30 M15	0.20	0.11	0.27	0.20
N35-35 R15-15 M15	0.66	0.01	0.41	0.19
N50-5 R0-45 M15	0.49	0.02	0.41	0.18
N50-35 R0-15 M15	0.14	0.71	0.01	0.13
N50-35 R0-15 M7.5	0.56	0.50	0.00	0.00
N50-50 R0-0 M0	0.10	0.18	1.00	0.00
N5-5 R45-45 M15	0.00	0.00	0.06	0.00



شکل ۱۰ مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی

میزان مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. تابع مطلوبیت کلی برای طرح‌های اختلاط N50-50 R0-0 M0، N5-5 R45-45 M15 و N50-35 R0-15 M7 برابر صفر به دست آمد. این نتیجه بیان کننده آن است که استفاده از این طرح‌های اختلاط کمترین مقدار خواص مکانیکی را به طور همزمان به دنبال خواهند داشت. در بین طرح‌های اختلاط بازیافتی که بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند، طرح‌های اختلاط حاوی ۳۰٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۴۵٪ ماسه بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ ماسه بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس، دیده می‌شوند. جالب این است که دو طرح اخیر با ۱۵٪ شن بازیافتی و ۱۵٪ ماسه بازیافتی یکی با ۷/۵٪ میکروسیلیس و دیگری با ۱۵٪ میکروسیلیس نتایج مشابهی را از نظر مطلوبیت به خود اختصاص داده‌اند.

نتیجه‌گیری

با جایگزینی ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در چهار گروه که شامل نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی، با ماسه بازیافتی، با شن بازیافتی و با شن و ماسه بازیافتی است. برای جبران کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، از میکروسیلیس در درصدهای مختلف ۷/۵ و ۱۵ درصد و فوق روان کننده در طرح‌های اختلاط استفاده شد. با جایگزینی درصدهای فوق - الذکر تعداد ۲۱ طرح اختلاط ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. با انجام آزمایش‌ها مختلف مقاومت مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همچنین با بررسی چند متغیره، بهترین طرح‌ها از نقطه نظر کلی نیز مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

۱. افزودن میکروسیلیس به مقدار ۷/۵ و ۱۵ درصد به نمونه-های با سنگدانه طبیعی باعث افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به مقدار ۱۶۳٪ و ۲۹٪ گردید.
۲. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شد. در نمونه‌های با ۷/۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش کمتری در مقاومت فشاری شده و نتایج مقاومت فشاری جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است. در نمونه‌های با ۱۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث افزایش بیشتری در مقدار مقاومت فشاری

شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث افزایش کمتری در مقاومت فشاری شده و نتایج مقاومت فشاری جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است.

۳. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها شد. در نمونه‌های با ۷/۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت کششی شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش کمتری در مقاومت کششی شده و نتایج مقاومت کششی جایگزینی همزمان شن و ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است. در نمونه‌های با ۱۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی شن بازیافتی باعث افزایش بیشتری در مقدار مقاومت کششی شده، جایگزینی ماسه بازیافتی باعث افزایش کمتری در مقاومت کششی شده و نتایج مقاومت کششی جایگزینی همزمان شن ماسه بازیافتی، باعث کاهش در مقاومت کششی نمونه‌ها شد.

٤. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌جای سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها شد. در نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی شن و ماسه بازیافتی باعث کاهش بیشتری در مقدار مقاومت خمشی شده، جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش کمتری در مقاومت خمشی شده و نتایج مقاومت خمشی جایگزینی ماسه بازیافتی، بین دو گروه فوق قرار گرفته است.

۵. در نمونه‌های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی شن بازیافتی یا ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت خمشی روندی تقریباً افزایشی داشته و در نمونه-های با ۷/۵٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی شن و ماسه بازیافتی، مقدار مقاومت کششی روندی تقریباً کاهشی داشت.

٦. در بین کل طرح‌های اختلاط بهترین طرح اختلاط از نظر مقاومت فشاری، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت کششی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ٤۵٪ شن بازیافتی، از نظر مقاومت خمشی، طرح حاوی ۷/۵٪ میکروسیلیس و ۳۰٪ شن بازیافتی مشخص شدند.

۷. با بررسی چند متغیره خواص مکانیکی نمونه‌های بتن، مشخص گردید که طرح‌های اختلاط حاوی ۳۰٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ٤۵٪ ماسه بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ شن بازیافتی با ۷/۵٪ میکروسیلیس، ۱۵٪ ماسه بازیافتی با ۱۵٪ میکروسیلیس، در بین طرح‌های اختلاط بازیافتی، بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند. جالب این است که دو طرح اخیر با ۱۵٪ شن بازیافتی و ۱۵٪ ماسه بازیافتی یکی با ۷/۵٪ میکروسیلیس و دیگری با ۱۵٪ میکروسیلیس نتایج مشابهی را از نظر مطلوبیت به خود اختصاص داده‌اند.

مراجع

[1] M. Limbachiya, M. Seddik Meddah, Y. Ouchagour, "Performance of portland/silica fume cement concrete produced with recycled concrete aggregate," *ACI Materials Journal*, vol. 109, pp. 91–100, 2012.

[2] A.K. Tamimi, J.A. Abdalla, Z.I. Sakka, "Prediction of long-term chloride diffusion of concrete in harsh environment," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 829–836, 2008.

[3] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C. Molin, J.L.D. Ribeiro, "Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 421–430, 2010.

[4] S.W. Tabsh, , A.S. Abdelfatah, "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1163–1167, 2009.

[5] A.S. Abdelfatah, S.W. Tabsh, "Review of research on and implementation of recycled concrete aggregate in the GCC," Advances in Civil Engineering, 2011.

[6] M. Tavakoli, P. Soroushian, "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate," *Material Journal*, vol. 93, no. 2, pp. 178–181, 1996.

[7] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, M. S. Mathews, "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 829–836, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006, 2009,

[8] I. B. Topçu, "Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 12, pp. 1817–1823, Dec., doi: 10.1016/S0008-8846(97)00190-7, 1997.

[9] J. T. Smith, "Recycled concrete aggregate - A viable aggregate source for concrete pavements," UWSpace. http://hdl.handle.net/10012/4900, 2010.

[10] T. C. Hansen, H. Narud, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate," *oncrete International*, vol. 5, no. 1, pp. 79–83, 1983.

[11] J. de Brito, N. Saikia, "Recycled aggregate in concrete: use of industrial," Construction and Demolition Waste, Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, vol. 1, ISBN 9781447145394, 2009.

[12] D.D. Nguyen, D.T. Nguyen, T.H. Cao, V.T. Phan, "Evaluating the possibility of replacing natural fine aggregates in concrete with recycled aggregates," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 11, no. 6, pp. 7805-7808, 2021,

[13] R. M. Salem, E. G. Burdette, N. M. Jackson, "Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete," *Material Journal*, vol. 100, no. 3, pp. 216–221, 2003.

[14] V. Tam, X. Gao, C. Tam, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1195–1203, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025, 2005.

[15] S. Lotfi, J. Deja, P. Rem, R. Mróz, E. Van Roekel, H. Van Der Stelt, "Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 87, pp. 117–125, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.03.010, 2014.

[16] M.C. Limbachiya, E. Marrocchino, A. Koulouris, "Chemical–mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate," *Waste Management*, vol. 27, pp. 201–208, 2007.

[17] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 407–415, 2007.

[18] C. Zhou, Z. Chen, "Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 497–506, 2017.

[19] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 439-449, 2012.

[20] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir "Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2171–2186, 2016.

[21] M. Gomes, J. De Brito, "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance," *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 663–675, 2009.

[22] K.H. Younis, A.A. Amin, H.G. Ahmed, et al., "Recycled aggregate concrete including various contents of metakaolin: mechanical behavior," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, pp. 1–17, doi.org/10.1155/2020/8829713, 2020.

[23] N.K. Bui, T. Satomi, H. Takahashi, "Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 496–507, 2018.

[24] M.L. Berndt, "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2606–2613, 2009.

[25] H., Dilbas, S. M. Sim, Ö. Çakir, "An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 50–59, 2014.

[26] A. Ismail, K.H. Younis, S. Maruf, "Recycled aggregate concrete made with silica fume: experimental investigation," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 8, pp.1136–1143, 2020.

[27] P. Hosseini, A.R. Khalo, M.M. M. Khodavirdi Zanjani, "Study on the construction of self-compacting concrete using recycled aggregates", *Concrete Research Journal*, third year/number on, 2008, (In Persin).

[28] M. Moghimi, J. Baranjian, K, Nemati, "Investigation of the mechanical properties of recycled concrete using crushed concrete," Second National Congress of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran , 2004, (In Persin).

[29] J. De Brito, J. Ferreira, J. Pacheco, D. Soares, M. Gurreiro, "Structural, material, mechanical and durability properties and behavior of recycled aggregates concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 1-16, 2016.

[30] A. Apurva, V.S. Fursule, Shingade, "Experimental study of concrete using recycled aggregate with nano silica," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 8, pp. 950-953, 2017.

[31] ACI 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)V, ACI Committee 318", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 2014.

[32] ASTM C150/C150M-17., "Standard Specification for Portland cement," ASTM International, West Conshohocken, PA., 2017.

[33] M. D. J. Sanchez, P. A. Gutierrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 872–877, 2009.

[34] ASTM C125-19, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

[35] ASTM C131/C131M-14, "Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine," 2006.

[36] ASTM C 39/C 39M-03, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," 2003.

[37] ASTM C 496/C 496M-11, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens," 2011.

[38] ASTM C1609/C1609M-19, "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)," 2019.

[39] S.W. Tabsh, A.S. Abdelfatah, "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1163–1167, 2009.

[40] L. Senas, C. Priano, S. Marfil, "Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 498–505, 2016.

[41] Z.H. Duan, C.S. Poon, "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars," *Materials Design*, vol. 58, pp. 19–29, 2014.

[42] S.M. Zabihi, H.R. Tavakoli, "Evaluation of monomer ratio on performance of GGBFS-RHA alkali-activated concretes," *Construction Building Material*, vol. 208, pp. 326– 332, 2019.

[43] O. Sengul, M. A. Tasdemir, "Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag," *Material Civil Engineering*, vol. 21, pp. 494–501, 2009.

CONTENTS

Developing a Prediction Model for Rutting Depth of Warm Mix Asphalt Mixture Using Neural Network	Mahsa Rouhi Fariman - Sayyed Ali Hosseini Mansour Fakhri	1
The Influence of Soil Particle Size Distribution on the Abrasion of EPB Machine Cutting Tools	Mohammad Darbor - Hamid Chakeri Taha Ansari	17
Backward Solution (in-time) of the Pollution Transport Equation in River Using Group Preserving Scheme	Amir Mohammad Saadat -Mehdi Mazaheri Jamal Mohammad Vali Samani	35
Investigation of the Effect of the Mass and Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings	Nahmat Khodaie - Hamed Teimouri	53
Identification of Apparent Welding Defects Using Computer Vision Based on Deep Learning	Mussa Mahmoudi - Soroush Ghaderi Faezeh Mahmoudi	73
Evaluation of Mechanical Properties of Concrete by Replacing Natural Aggregates with Fine and Coarse Recycled Aggregates	Aref Sarhanghi - Fereydoon Omidinasab Ahmad Dalvand	87

JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD

Ferdowsi University of Mashhad

ISSN 2008-7454

General Director: F. Irani
Editor-Chief: M. R. Esfahani
Published: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

M. Reza Esfahani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
F. Irani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
K. badv	Professor	Urmia University
J. Bolouri Bazaz	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
A. Pouya	Professor	Ecole des Ponts Paris tech
S. M. Hosseini	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
N. Hafezi Moghaddas	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseininia	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Sh. Danesh	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Gh. Rakhshandehro	Professor	Shiraz University
M. H. Sebt	Professor	Amirkabir University of Technology
F. Shahabian Moghadam	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
A. Kavussi	Professor	Tarbiat Modares University
H. Ganji Doost	Professor	Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
F. Moghadas Nejad	Professor	Amirkabir University of Technology
M. Kianoush	Professor	University of Ryerson

Text Editor: Yousef Bina
Administrative Director: T. Hooshmand
Typist: A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering
Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.
P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN
Tel: +98 51 38806024; Fax: +98 51 38807384; Email: ejour@um.ac.ir
Web site: http://civil-ferdowsi.um.ac.ir

ISSN 2783-2805

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Developing a Prediction Model for Rutting Depth of Warm Mix Asphalt Mixture Using Neural Network 1
Mahsa Rouhi Fariman - Sayyed Ali Hosseini
Mansour Fakhri

The Influence of Soil Particle Size Distribution on the Abrasion of EPB Machine Cutting Tools 17
Mohammad Darbor - Hamid Chakeri -Taha Ansari

Backward Solution (in-time) of the Pollution Transport Equation in River Using Group Preserving Scheme 35
Amir Mohammad Saadat -Mehdi Mazaheri
Jamal Mohammad Vali Samani

Investigation of the Effect of the Mass and Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings 53
Nahmat Khodaie - Hamed Teimouri

Identification of Apparent Welding Defects Using Computer Vision Based on Deep Learning 73
Mussa Mahmoudi - Soroush Ghaderi - Faezeh Mahmoudi

Evaluation of Mechanical Properties of Concrete by Replacing Natural Aggregates with Fine and Coarse Recycled Aggregates 87
Aref Sarhanghi - Fereydoon Omidinasab - Ahmad Dalvand

Serial No. 40

Vol. 35, No. 4
Winter, 2022