بکارگیری شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبانی بمنظور مدلســازی رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن قائم نفوذپذیر با هسته متخلخل

مصطفی گندمی[۱*]، محرم دولتشاهی پیروز[۲] ، ایمان ورجاوند[۳]، محمد رضا نیکو[۴]

[۱]دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های دریایی، دانشکده عمران، دانشگاه تهران؛ mostafa.gandomi@ut.ac.ir
[۲]دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تهران؛ mdolat@ut.ac.ir
[۳]دانش آموخته دکتری سازه‌های دریایی دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ ivarjavand@ut.ac.ir
[۴]دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز؛ nikoo@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:
موج‌شکن نفوذپذیر قائم
پرسپترون چندلایه
ماشین بردار پشتیبان
مدل فیزیکی

چکیده

در این تحقیق امکان بکارگیری شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبانی بمنظور مدلسازی رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های نفوذپذیر قائم با هسته متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور از داده‌های مطالعه آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی استفاده شده است تا ضرایب انعکاس و گذر موج برخوردی به سازه که بیانگر رفتار هیدرودینامیکی هستند را به عرض محفظه موج‌شکن، نسبت ارتفاع مصالح سنگی به عمق آب، نسبت عرض محفظه به طول موج، ارتفاع موج، عدد موج در عمق آب و تیزی موج مرتبط شود. نتایج حاکی از آن است مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبانی دارای عملکرد بهتری در مدلسازی رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن مورد مطالعه بوده و تا حد زیادی به داده‌های واقعی همبسته (R= ۰/۸۶۸۹ برای ضریب انعکاس و R=۰/۹۶۶۲۹ برای ضریب گذر) است. در ادامه بمنظور آشکارسازی پاسخ ضرایب انعکاس و گذر به هریک از پارامترهای ورودی مدل برتر، مطالعه پارامتریک انجام گرفته است. همچنین با استفاده از آنالیز حساسیت میزان مشارکت پارامترهای ورودی در پیشبینی ضرایب انعکاس و گذر مورد بررسی قرار گرفته است.

Application of Multilayer Perceptron Neural Network and Support Vector Machine for Modeling the Hydrodynamic Behavior of Permeable Breakwaters with Porous Core

Mostafa Gandomi[1*], Moharram Dolatshahi Pirooz[2], Iman Varjavand, Mohammad Reza Nikoo

[1] Ph.D. student of marine structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran; mostafa.gandomi@ut.ac.ir
[2] Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran; mdolat@ut.ac.ir
[3] Graduated Ph.D. of marine structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran; ivarjavand@ut.ac.ir
[4] Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University; nikoo@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 1 Jun. 2019
Accepted: 14 Jul. 2019

Keywords:
Permeable Breakwaters
Multilayer perceptron
Support vector machine
physical model

ABSTRACT

In this research, the application of multilayer perceptron (MLP) neural networks and support vector machine (SVM) for modeling the hydrodynamic behavior of Permeable Breakwaters with Porous Core has been investigated. For this purpose, experimental data have been used on the physical model to relate the reflection and transition coefficients of incident waves as the output parameters to the width of the breakwater chamber, the ratio of the height of rockfill material to the water depth, the ratio of the width of the chamber to the wavelength, Wave number in water depth and wave steepness. The results indicate that the MPL model has better performance in modeling the hydrodynamic behavior than the SVM model and is largely correlated to real data (R = 0.8689 for reflection coefficient and 0.96629 R = for transient coefficient). In order to reveal the response of reflection and transition coefficients to each input parameter, a parametric study was performed. Also, using the sensitivity analysis, the participation rate of each input parameters in the prediction of reflection and transient coefficients has been studied.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

۱ - مقدمه

برای قرن‌ها عملیات تخلیه و بارگیری کشتی‌ها در بنادری انجام می‌گرفت که بطور طبیعی در مکانی امن و دور از مخاطرات طبیعی قرار داشتند. با این‌حال افزایش نیاز به نواحی بندری و کمبود نواحی امن طبیعی، منجر به ساخت نواحی مصنوعی در داخل دریا شد. این سازه‌ها اساساً به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که با انعکاس و/ یا اتلاف انرژی موج از نواحی بندر محافظت می‌نمایند.

در سالیان گذشته، متداول‌ترین نوع موج‌شکن برای محافظت بنادر، موج‌شکن‌های توده سنگی بودند. کارکرد اصلی این موج شکن‌ها، شکست امواج در شیب ساخته شده از سنگ معادن است. اتلاف انرژی موج در این موج‌شکن‌ها با استفاده از منافذ و فضای خالی موجود در سازه صورت می‌پذیرد.

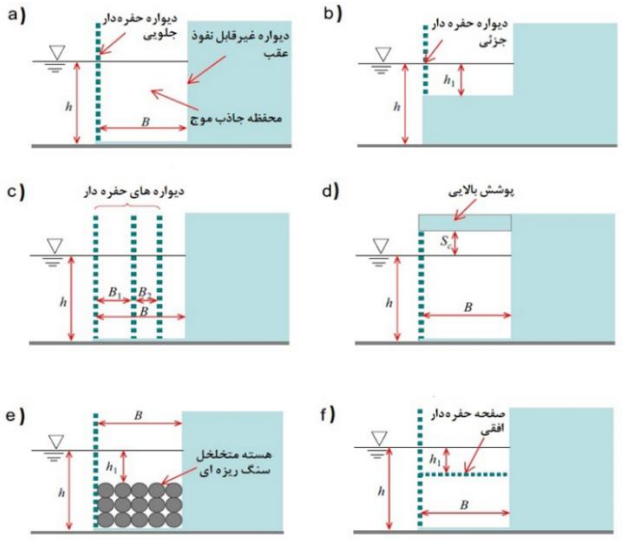
طی دو دهه گذشته به تبع توسعه و تغییرات مهم در زمینه تجارت جهانی و حمل و نقل دریایی، نیازهای بندری نیز تغییرات زیادی نموده است. به‌طوری که روزانه تقاضا برای گسترش بنادر و عمیق‌تر کردن آن‌ها رو به افزایش می‌باشد. حجم مصالح مورد نیاز برای موج‌شکن‌های توده سنگی با افزایش عمق، بصورت تصاعدی بالا می‌رود. بنابراین هزینه و مشکلات محیطی مرتبط با فرآیند ساخت، با افزایش عمق بطور چشمگیری افزایش می‌یابند.

این مسائل باعث رونق گرفتن ساخت موج‌شکن‌های کیسونی قائم و دیواره‌های عمودی شده است. این موج شکن‌ها به‌عنوان گزینه جایگزین حفاظت نواحی بندری در اعماق زیاد عمل می‌کنند و بطورکلی، موج شکن‌های نوع کسیونی می‌توانند عملکرد هیدرولیکی، هزینه کلی تمام شده، کیفیت کنترل سازه، جنبه‌های زیست محیطی و زمان ساخت و نگهداری را بهبود ببخشند. موج-شکن‌های قائم با ایجاد صفحه غیرقابل نفوذ در برابر موج، بخش اعظم انرژی را منعکس می‌کنند. این درجه بالا از انعکاس، باعث بروز مشکلاتی به شکل نقاط ضعف در سازه خواهد شد. اثر متقابل موج برخوردی و موج منعکس شده می‌تواند منجر به تولید امواج ناپایدار تیز شود که عملیات ناوبری و پهلوگیری شناورها را دچار مخاطره و مشکل کند. امواج منعکس شده همچنین می‌توانند با انتشار به حوضچه آرامش، برای شناورهای پهلو گرفته و یا عملیات تخلیه بارگیری، خطراتی را ایجاد کنند. سایر ایرادات و مشکلات این سازه، افزایش روگذری، نیروی بزرگتر روی سازه، فرسایش موضعی (آب شستگی)[1]، اثرگذاری روی جریانات انتقال رسوب موازی ساحل[2] و افزایش اثر تشدید به علت انرژی موج بلند به دام افتاده در داخل بندر می‌باشد.

موج‌شکن‌های نفوذپذیر انتها بسته در ابتدا در سال ۱۹۶۱ توسط جارلن به‌عنوان پاسخی بر مشکلات کیسون‌های متداول ارائه شد. این موج‌شکن‌ها از سه بخش اصلی دیواره جلویی نفوذپذیر، محفظه جاذب انرژی و دیوار انتهایی غیرقابل نفوذ تشکیل شده‌اند. در طول سالیان گذشته اصلاحات زیادی برای عملکرد بهتر انعکاسی و افزایش پایداری سازه‌ای این موج‌شکن‌ها پیشنهاد شده است.

پارامتر کنترل نیرو و انعکاس در این نوع موج‌شکن، عرض محفظه جاذب B (بصورت بدون بعد B/L بخش بر طول موج) و نفوذپذیری هندسه دیوار جلویی است. به‌دلیل یکسان‌بودن عمق آب در خارج و داخل سازه، طول موج ورودی و خروجی از سازه یکسان است (شکل ۱ (a)) [۱].

در عمل برای افزایش پایداری از کیسون نفوذپذیر جزئی مطابق شکل ۱ (b) استفاده می‌شود. در این موج‌شکن‌ها به دلیل تفاوت عمق آب در داخل و خارج کیسون، طول موج ورودی دچار تغییر می‌شود.



شکل ۱: موج‌شکن‌های انتها بسته (a) نمونه موج‌شکن پیشنهادی جارلن (b)موج‌شکن نفوذپذیر جزئی(c)موج‌شکن نفوذپذیر چندلایه‌ای(d) موج‌شکن نفوذپذیر سرپوش‌دار (e) موج‌شکن نفوذپذیر پرشده از مصالح متخلخل (f) موج‌شکن نفوذپذیر دارای صفحه حفره‌دارافقی

در کارهای اجرایی، به‌دلیل تمایل به کاهش بیشتر ضریب انعکاس، از چند صفحه نفوذپذیر به‌جای یک صفحه استفاده می‌شود (شکل ۱ (c)). چن و همکاران [۲] بیان کردند در نفوذپذیری دیواره جلویی برابر ۴۰٪، وجود ضخامت میانی نقش بسزایی در کاهش انعکاس ایفا می‌کند حال آن‌که برای حالت ۲۰٪ نفوذپذیری دیواره جلویی، وجود صفحات میانی نتیجه معکوس می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر، توآ و لین [۳] دریافتند نفوذپذیری هندسی دیواره‌ها باید بصورت کاهشی در جهت موج ورودی باشد تا بهترین عملکرد موج‌شکن حاصل گردد.

به‌دلیل لزوم استفاده چندجانبه و بهینه، در بسیاری از کارها نیاز به استفاده از فضای بالای موج‌شکن به‌عنوان مسیر تردد، گذر تأسیسات، اسکله پهلوگیر وفضای نصب تجهیزات تخلیه و بارگیری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

است. برای ایجاد چنین فضایی مطابق شکل ۱ (d) از یک سازه درپوش بروی محفظه‌ها استفاده می‌شود.

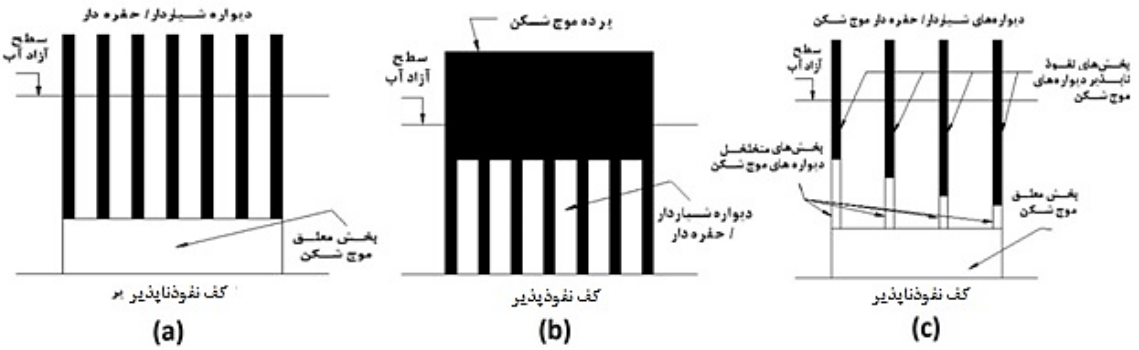
برای افزایش پایداری موج‌شکن، مخصوصاً در برابر لغزش و نیز کاهش هزینه ساخت در بتن‌ریزی فضای داخلی، از موج‌شکن‌های نفوذپذیر با هسته متخلخل (شکل ۱ (e)) استفاده شده است ([۴]). ایزاکسون و همکاران [۴] نشان دادند نیروی وارد بر دیواره نفوذپذیر در این سازه‌ها کمتر است اما وجود هسته متخلخل باعث افزایش انعکاس و بالاروی موج می‌شود. حال اگر نیروی وارد بر دیواره نفوذپذیر پارامتر اصلی طراحی باشد، استفاده از مصالح متخلخل تا سطح آب توصیه می‌شود و اگر در کنار نیرو، انعکاس نیز اهمیت داشته باشد، استفاده از مصالح بصورت مغروق توصیه می‌گردد [۵].

یکی دیگر از شیوه‌های مستهلک‌کردن و اتلاف انرژی موج، استفاده از صفحات حفره‌دار افقی در محفظه جذب انرژی است (شکل ۱ (f)). این صفحات با ایجاد اغتشاش در حرکت قائم و افقی ذرات آب به عملکرد موج‌شکن کمک می‌کنند. با استفاده از این موجشکن‌ها می‌توان با محفظه جذب کوچکتر به عملکرد یکسان در کاهش انعکاس رسید.

آلودگی آب نواحی بندری یکی از مسائل عمده زمان بهره‌برداری بنادر است و چرخش آب نزدیک ساحل[۳] برای حفظ سلامت زیست‌بوم در بنادر، اهمیت بسزایی دارد. به همین دلیل، چرخش طبیعی آب از دریا به بندر و برعکس، نقش مهمی در کاهش آلودگی خواهد داشت. بدین‌منظور، می‌توان از موج‌شکن‌های شیاردار یا حفره‌دار بدون دیواره انتهایی استفاده نمود. گزینه اصلی استفاده موج‌شکن‌هایی متشکل از شمع‌های با فاصله، دیواره‌های شیاردار صفحه‌ای مغروق و... در یک یا چند ردیف خواهد بود. با این‌حال، استفاده از این سازه‌ها در بنادری مجاز است که مقداری از فعالیت امواج در آن‌ها مجاز باشد. مطابق آیین‌نامه دریایی ژاپن[۴] (OCDI) و دستورالعمل طراحی سازه‌های ساحلی ایران (نشریه ۶۳۵)، برای کشتی‌های کوچک، متوسط و بزرگ به‌ترتیب ارتفاع حدی مجاز موج ($H_{1/3}$) در ناحیه حوضچه آرامش بندر برابر با ۰/۳، ۰/۵ و ۱/۵-۰/۷ متر است. این نکته‌ای است که حد عملکرد سازه موج‌شکن در برابر امواج را هنگام طراحی مشخص می‌کند. علاوه بر آنچه گفته شد این موج‌شکن‌ها کمترین اختلال را در حرکت طبیعی رسوبات (مخصوصا معلق) ایجاد کرده و هزینه ساخت در آب‌های عمیق و استفاده از مصالح را کاهش می‌دهند[۶].

بطور معمول عرض و وزن انواع مرسوم موج‌شکن‌ها (توده‌سنگی و انواع وزنی) با افزایش عمق و نیاز به مقدار بیشتری از مصالح برای ساخت و ظرفیت بیشتر باربری در کف، افزایش می‌یابد. همچنین این موج‌شکن‌ها با مسدودکردن جریان رسوب موازی ساحل[۵] باعث ایجاد فرسایش در سواحل اطراف می‌شوند. به‌علاوه این سازه‌ها با جلوگیری از گردش آب، باعث کاهش کیفیت آب در نزدیکی ساحل می‌شوند. برای حل مشکلات مطرح‌شده، اولین نمونه عملی از موج‌شکن‌های شیاردار (بعضی مواقع نیز موج‌شکن باصفحه شیاردار یا موج‌شکن شمعی نیز خوانده می‌شوند) توسط ویگل[۶] معرفی گردید. با این وجود، نمونه‌هایی از استفاده این نوع موج‌شکن از زمان باستان وجود دارد. سازه‌های نفوذپذیر قائم با انتهای باز و سازه‌های نفوذپذیر قائم با انتهای بسته به‌دلیل مکانیزم یکسان استهلاک انرژی، گاهی به‌جای هم در ادبیات فنی به‌کار برده می‌شوند [۷]. نمونه‌های زیادی از ساخت این نوع موج‌شکن در بنادر دنیا موجود دارد، به‌عنوان مثال از موج‌شکن‌های بندر بای کاما و بندر چندل در کانادا، بندر روسکوف در فرانسه، خلیج بندر تفریحی هاف مون در نیوزلند و بندر پلای موس در ایالات متحده می‌توان نام برد [۱۰،۸،۹].

بررسی موج‌شکن‌های نفوذپذیر بیانگر آنست که ضریب انعکاس و گذر که دو پارامتر اصلی این نوع موج‌شکن‌ها هستند، بیشتر به نفوذپذیری دیواره بستگی دارند و این وابستگی به طول و ارتفاع موج ورودی کمتر است. آنچه مشخص می‌باشد این است که افزایش نفوذپذیری صفحه، باعث کاهش ضریب انعکاس و افزایش ضریب گذر خواهد شد [۱۱و۱۲]. مطابق با آنچه گفته شد برای افزایش کارآمدی در شرایط طراحی متفاوت، اصلاحاتی در طرح اولیه این موج‌شکن‌ها به مرور زمان انجام گرفته است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

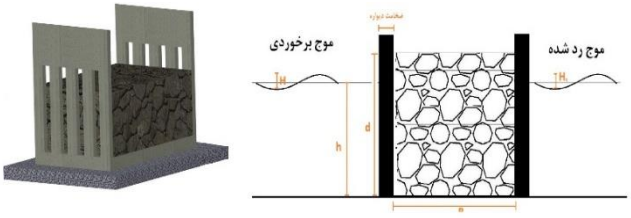


شکل ۲- (a) موج‌شکن تک‌صفحه‌ای معلق (دید از مقابل) (b) موج‌شکن پرده‌ای-شمعی ساخته‌شده بر کف دریا (دید از مقابل) (c) موج‌شکن چندلایه‌ای معلق پرده‌ای شیاردار با تخلخل‌های دلخواه (دید از کنار) [۶].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

در تحقیق پیش‌رو سعی شده است تا رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن نفوذپذیر ابتکاری معرفی شده، به‌عنوان راه‌حلی برای بهبود عملکرد این نسل از موج‌شکن‌ها مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گیرد. موج‌شکن نفوذپذیر معرفی شده، از نوع نفوذپذیر قائم دو صفحه‌ای می‌باشد که با مصالح سنگ‌ریزه‌ای با تخلخل بالا پرشده است (شکل ۳). این مصالح، رژیم حرکت جریان را تغییر می‌دهد و در صورت به‌کارگیری صحیح می‌تواند سهم عمده‌ای در جذب انرژی و کاهش ضریب انتقال ایفا کند. صفحات جلویی و عقبی سازه مطابق شکل ۳ از دو بخش نفوذپذیر و صلب تشکیل شده است. بخش نفوذپذیر دارای نفوذپذیری ۵۰ درصد است و بخش صلب از ۲ متر بالای سطح آب به بالا امتداد می‌یابد. با توجه به اینکه واژه متخلخل گاهاً به‌منظور توصیف موج‌شکن‌های شیبدار توده سنگی و بطور کل محیط دارای مصالح سنگ‌ریزه‌ای و بتنی نیز به‌کار می‌رود، به‌منظور عدم تداخل با موارد مشابه درادبیات فنی، از واژه موج‌شکن نفوذپذیر قائم با هسته متخلخل برای توصیف این نوع موج‌شکن‌ها استفاده خواهد شد.

همانطور که گفته شد پارامتر ضریب گذر و انعکاس، مهمترین پارامترهای شناخته شده موثر بر عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن نفوذپذیر قائم می‌باشند که می‌توانند مبنای تحلیل رفتار موج‌شکن قرار گیرند. این المان‌های کلیدی می‌توانند از طریق روش‌های متفاوتی مانند مدل‌سازی فیزیکی[۷] و بررسی در محل[۸] به‌دست آیند.



شکل ۳: هندسه موج شکن مورد مطالعه

با اینحال پیاده‌سازی این روش‌ها غالباً گران و پرهزینه و در بیشترموارد غیر ممکن است [۱۳]. رویکرد دیگر استفاده از روابط ریاضی و تحلیلی می‌باشد، هرچند در عمل به دلیل پیچیدگی‌های زیاد و غیرخطی بودن مساله، به‌دست آوردن روابط تحلیلی امری بسیار مشکل است. از طرف دیگر در صورت وجود چنین روابطی، می‌بایست در عمل با داده‌های واقعی صحت‌سنجی شوند.

محاسبات نرم، به‌طور گسترده برای حل انواع مسائل طبقه‌بندی و پیش‌بینی در علوم، پزشکی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. شبکه عصبی مصنوعی[۹] (ANN) به‌عنوان یک تکنیک مرسوم پیش‌بینی در محاسبات نرم، با تقلید از ساختار مغز انسان در مسائل مربوط به پیش‌بینی و طبقه‌بندی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. این ابزار مدل‌سازی، توانایی بالایی در یادگیری تطبیقی از تجربیات مبتنی بر داده‌های مشاهداتی داشته و همبستگی‌های مختلف را استخراج می‌نماید. این تکنیک محاسبات نرم، در دهه‌های اخیر به‌طور گسترده در مدل‌سازی مربوط به مهندسی سازه‌های ساحلی مورد استفاده قرار گرفته است (به عنوان نمونه به این مراجع مراجعه شود [۱۸،۱۷،۱۶،۱۵]) و اخیراً برای پیشبینی رفتار موج‌شکن‌ها نیز به‌کار گرفته شده است [۲۱، ۲۰،۱۹].

یکی دیگر از ابزارهای قدرتمند در محاسبات نرم، ماشین بردار پشتیبان[۱۰] (SVM) است که در آن خطای پیش بینی و پیچیدگی مدل به طور همزمان به حداقل می‌رسد. برخلاف مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی، که بر اساس الگوریتم الهام گرفته از بیولوژیک است، ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر نظریه یادگیری آماری است. ماشین بردار پشتیبانی با توجه به توانایی تعمیم آن، محبوبیت روز افزونی پیدا کرده است [۲۲]. نمونه‌هایی از بکارگیری ماشین بردار پشتیبان در مهندسی ساحل وجود دارد که می‌توان به مطالعه محجوب و مسبب [۲۳] اشاره نمود که در سال ۲۰۰۹ برای پیشبینی ارتفاع موج شاخص از ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند، همچنین در مطالعه‌ای دیگر کیم و همکاران (۲۰۱۰) [۲۴] بمنظور پیشبینی عدد پایداری آرمورهای بلوکی موج‌شکن، از تکنیک ماشین بردار پشتیبان بهره بردند.

در این مطالعه، از دو تکنینک شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه یا به اختصار شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان برای به دست آوردن تقریب ریاضی تابع ضریب انعکاس وگذر، بر اساس پارامترهای‌های مرتبط با موج‌شکن و متغیرهای موج استفاده شده است. مدل معرفی شده با از ۱۸۰ داده آزمایشگاهی آموزش و صحت‌سنجی گردیده است.

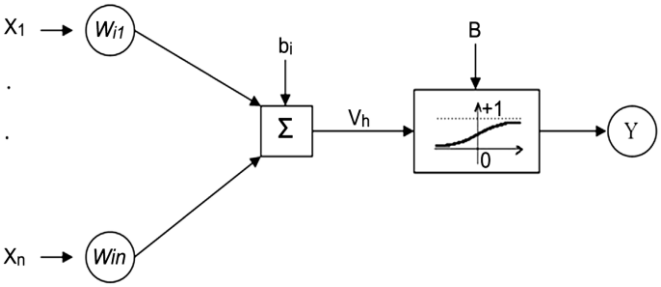
۲-روش

۲-۱- شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه

مک کالوک و همکاران در اوایل دهه ۱۹۴۰ روش شبکه عصبی را پایه‌گذاری نمودند [۲۵]. به‌طور کلی، شبکه عصبی یک ابزار پیش‌بینی برای ساخت یک مدل ریاضی از یک سیستم ناشناخته است. یکی از شناخته شده‌ترین یا شاید بتوان گفت شناخته شده‌ترین این مدل، شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه[۱۱] یا به اختصار MLP است که معمولاً معماری پیشخور[۱۲] دارند. نحوه آموزش شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه، غالباً از طریق الگوریتم پس انتشار[۱۳] است. شبکه MLP شامل یک لایه ورودی و خروجی و حداقل دارای یک لایه مخفی می‌باشد. هر کدام از این لایه‌ها دارای تعدادی نورون و شامل واحد(ها)ی پردازش است و هر واحد بطور کامل با اتصال وزن‌دار (Wij) به واحدهای لایه بعدی متصل شده است [۲۶]. خروجی Y با انتقال مجموع خروجی‌های قبلی و با نگاشت توسط یک تابع فعال‌سازی به‌دست می‌آید. شکل ۴ به‌طور پایه‌ای، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه را نمایش می-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

دهد. در این شکل Xi نمایانگر ورودی‌ها و b/B بیانگر اریب[۱۴] مابین لایه‌های متفاوت است. برای مسائل پیچیده و غیرخطی، از تابع تانژانت هیپربولیک یا تابع سیگموئید (یا لوگ-سیگموئید) می‌توان استفاده نمود.



شکل ۴- نمایش پایه‌ای از یک شبکه‌عصبی پرسپترون چند لایه

یک شبکه عصبی توسط مجموعه‌ای از داده‌ها به نام داده‌های آموزش، آموزش داده می‌شود. طی فرآیند آموزش، وزن‌های شبکه تا رسیدن به معیار توقف بهینه‌سازی می‌شوند. فرآیند آموزش دارای دو گام اساسی است، گام اول مقداردهی اولیه و گام دوم بهینه‌سازی است [۱۳]. در گام مقداردهی اولیه، مقادیر اولیه وزن‌ها و اریب به نرون‌های شبکه اختصاص داده می‌شود. مقادیر اولیه وزن و اریب‌ها می‌تواند بطور تصادفی یا با استفاده از یک روش بهینه‌سازی سراسری[۱۵] مانند تبرید شبیه‌سازی‌شده[۱۶] حاصل می‌شود.

۲-۲- ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان که نخست توسط بوسر و همکاران در سال ۱۹۹۲ ارائه شد [۲۷]، از مفهوم نظریه یادگیری آماری[۱۷] الهام گرفته شده است. برای مدلسازی رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن مورد مطالعه، ماشین بردار پشتیبان با معرفی یک تابع زیان غیرحساس-ε[۱۸] بعنوان یک روش رگرسیون بکار گرفته خواهد شد. در ادامه شرح مختصری در مورد بکارگیری ماشین بردار پشتیبان در مسائل رگرسیون ارائه شده است. برای دریافت اطلاعات بیشتر می‌توانید به مراجع [۲۷، ۲۸] رجوع کنید. مجموعه‌ای از داده‌ها برای آموزش مدل را در نظر بگیرید؛ $\{(x_1,y_1),\ldots(x_n,y_n)\}$، $x \in R^n$، $y \in r$، بطوریکه x ورودی، y خروجی، R^n فضای بردار n بعدی و r فضای بردار یک بعدی است. تابع زیان غیرحساس-ε بصورت زیر می‌تواند بیان شود:

$$L_\varepsilon(y) = 0 \text{ برای } |f(x) - y| < \varepsilon$$
$$\text{یا } L_\varepsilon(y) = |f(x) - y| - \varepsilon \qquad (۱)$$

این عبارت یک حیطه ε را تعریف می کند به طوری که اگر مقدار پیش بینی شده در حیطه باشد، زیان صفر است، در حالی که اگر مقدار پیش بینی شده خارج از حیطه باشد، از زیان برابر با مقدار مطلق انحراف معیار منهای ε خواهد بود. هدف اصلی در ماشین بردار پشتیبان یافتن یک تابع f (x) است که انحراف ε ازمقدار خروجی واقعی را به دست می دهد و یک‌دست باشد.

معادله نهایی در ماشین بردار پشتیبان را می توان به صورت زیر نوشت [۲۹].

$$f(x) = \sum_{i=1}^{nsv}(\alpha_i - \alpha_i^*)K(x_i.x_j) + b \qquad (۲)$$

در رابطه بالا α_i و α_i^* مضارب لاگرانژی، nsv تعداد بردارهای پشتیبان و $K(x_i.x_j)$ تابع هسته‌ای[۱۹] می‌باشند. برخی از هسته های رایج از قبیل چندجمله ای (همگن)، چندجمله ای (غیرهمگن)، تابع پایه شعاعی، تابع گاوسی و غیره برای موارد غیر خطی استفاده شده اند. در تحقیق حاضر از تابع هسته‌ای گوسی، خطی، درجه دو و سه برای بررسی مدل، استفاده شده است.

۳-مدلسازی ضرایب گذر و انعکاس

مطابق با آنچه گفته شد، پارامترهای ضرایب انعکاس وگذر نقش کلیدی در تعیین رفتار موج‌شکن‌های نفوذپذیر قائم دارند. ضرایب انعکاس و گذر در مطالعات زیادی تابع متغیرهای موج مانند عدد موج و تیزی بیان شده‌اند [۳۱،۳۰]. از طرف دیگر این مطالعات نشان‌دهنده تأثیر مستقیم مشخصه‌های اصلی موج‌شکن مانند عرض محفظه و میزان نفوذپذیری دیواره‌ها بر رفتار ضرایب انعکاس و گذر و تأثیر ثانویه یا عدم تأثیر مشخص پارامترهایی مانند ضخامت صفحات، شکل شمع‌های تشکیل‌دهنده صفحات و زبری آن‌ها است. پارامتر ارتفاع مصالح سنگی در بین صفحات نیز که بطور مشهود، سهم بسزایی در رفتار ضرایب انعکاس و گذر دارد، با توجه به اینکه موج‌شکن مورد مطالعه پیشتر مورد مطالعه قرار نگرفته، مد نظر قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با بهره‌گیری از دو تکنیک یادگیری ماشین؛ شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبان، رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن معرفی شده توسط ضرایب انعکاس و گذر مدل‌سازی می‌شود. مهمترین پارامترهای اثرگذار در رفتار ضرایب انعکاس و گذر با مرور ادبیات فنی موج‌شکن‌های نفوذپذیر و نیز مطالعه آزمایشگاهی انجام شده، انتخاب شده‌اند. بنابر آنچه بیان شد، رابطه ضریب انعکاس و گذر می‌تواند به‌صورت زیر باشد:

$$C_t, C_r = f(B, \frac{d}{h}, \frac{B}{L_p}, H_s, Kh, \frac{H_s}{L_p}) \qquad (۳)$$

بطوری‌که

C_t: ضریب گذر

C_r: ضریب انتقال

B (m): عرض محفظه موج‌شکن (فاصله صفحات جلویی و پشتی)

h (m): ارتفاع آب

d (m): ارتفاع مصالح سنگ‌ریزه‌ای

L_p (m): طول موج مرتبط با پریود پیک (T_p) طیف موج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

H_s (m): ارتفاع موج شاخص برخوردی، طیف موج

K (m^{-1}): عدد موج یا بسامد زاویه‌ای (که برابر $\frac{2\pi}{L_p}$ است)

همانطور که در رابطه بیان‌شده مشاهده می‌شود، سه پارامتر اول شامل عرض محفظه موج‌شکن B، نسبت ارتفاع مصالح سنگریزه‌ای به عمق آب $\frac{d}{h}$ و نسبت عرض محفظه موج‌شکن به طول موج $\frac{B}{L_p}$، پارامترهای مربوط به موج‌شکن و ارتفاع موج شاخص برخوردی H_s، عددموج در عمق آب Kh و تیزی موج $\frac{H_s}{L_p}$، پارامترهای مربوط به طیف موج یا شرایط بارگذاری می‌باشند.

۳-۱-داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌پردازش آن‌ها

داده‌های استفاده شده در این تحقیق، از نتایج آزمایش بر روی مدل فیزیکی موج‌شکن مورد اشاره به‌دست آمده است. برای سازگاری مقیاس مدل از تساوی عدد فرود که اجازه باز تولید صحیح نیروهای گرانشی و اینرسی جریان را می‌دهد، استفاده شده است و مقیاس شبیه‌سازی نیز ۱:۲۵ می‌باشد. در نتیجه، مقیاس کمیت‌های طول و زمان برابر ۱:۲۵ و ۱:۵ خواهد بود. فلوم مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها، در آزمایشگاه مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی واقع شده است. فلوم دارای طول ۳۲/۵ متر، ۵/۵ متر عرض و ۱ متر عمق است که به یک سامانه موج ساز مدرن DHI[۲۰] تجهیز شده است. موج‌ساز پدالی در یک انتهای فلوم و جاذب موج غیرفعال[۲۱] به شکل ساحل متخلخل متشکل از یک رمپ سنگی با شیب ۱:۱۲ برای جلوگیری از انعکاس و جذب انرژی در انتهای دیگر فلوم قرار دارد. پاروی مولد پیستونی، امکان تولید امواج منظم و نامنظم عمود بر سازه با مشخصه‌های تیزی و پریود متفاوت را به مدل موج‌شکن می‌دهد. برای رسیدن به شرایط دریا از امواج نامنظم بهره گرفته شده است و طیف موج برخوردی در آزمایشات، طیف موج اصلاح‌شده جان سوآپ[۲۲] می‌باشد. شکل ۵ تصویر موج‌شکن در فلوم مورد آزمایش را نمایش می‌دهد.

در تحقیق حاضر، میزان نفوذپذیری صفحات جلویی و عقبی برابر با میزان ۵۰ درصد و ثابت در نظر گرفته شده است و بخش صلب صفحات از ۸ سانتیمتر در مقیاس آزمایشگاهی (۲ متر در واقعیت) مطابق شکل ۵ آغاز می‌شود. در مجموع، ۱۸۰ داده از آزمایش مدل فیزیکی به‌دست آمده است. مشخصات آماری داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

شکل ۵- فلوم آزمایشگاه و جانمایی مدل فیزیکی مورد آزمایش

به‌منظور مدل‌سازی، داده‌ها بطور تصادفی به سه دسته داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش و با لحاظ عدم برون‌یابی تقسیم می‌شوند. داده‌های آموزش، مطابق آنچه گفته شد طی آموزش شبکه به‌کار گرفته می‌شوند و شبکه با توجه به خطای آن‌ها تنظیم می‌شود.

داده‌های اعتبارسنجی، به منظور اندازه‌گیری میزان تعمیم و عمومیت استفاده می‌شوند و زمانیکه تعمیم و عمومیت مدل بهبود پیدا نکند و بیش‌برازش[۲۳] رخ دهد باعث توقف آموزش می‌شوند. داده‌های آزمایش، داده‌هایی هستند که اثری روی فرآیند آموزش ندارند و ارزیابی مستقلی از عملکرد شبکه حین و پس از آموزش انجام می‌دهند. از میان مجموع ۱۸۰ داده، ۱۲۶ داده (۷۰٪) برای فرآیند آموزش و ۲۷ داده (۱۵٪) برای اعتبارسنجی و مابقی ۲۷ داده (۱۵٪) نیز برای آزمایش مدل‌ها به‌کار گرفته شده است.

فرانک و تادشینی (۱۹۹۴) پیشنهاد کردند که حداقل نسبت قابل قبول تعداد داده‌ها روی پارامترها برابر ۳ است، همچنین توصیه کردند که این نسبت بیش از ۳ باشد [۳۲].

در تحقیق حاضر این نسبت برای سری داده‌های آزمایش، اعتبارسنجی و آزمایش بترتیب برابر $\frac{126}{6}$=21، $\frac{27}{6} = 4.5$ و $\frac{27}{6} = 4.5$ می‌باشد.

جدول ۱-خصوصیات آماری پایه پارامترهای مورد استفاده در توسعه مدل

پارامترها	B	$\frac{d}{h}$	$\frac{B}{L_p}$	H_s	Kh	$\frac{H_s}{L_p}$	C_r	C_t
حداقل	۱۶	۰/۵۰	۰/۰۲	۲/۳۲	۰/۳۸	۰/۰۱	۰/۲	۰/۲۱
میانگین	۴۸	۰/۸۶	۰/۱۷	۷/۶۱	۰/۹۰	۰/۰۳	۰/۴۱	۰/۵۸
حداکثر	۸۰	۱/۲۰	۰/۶۰	۱۴/۳۶	۳/۵۶	۰/۰۸	۰/۶	۰/۹۴
انحراف استاندارد	۲۲/۶۳	۰/۲۶	۰/۱	۳/۲۸	۰/۵	۰/۰۱۵	۰/۹۰	۰/۱۸۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

۳-۲-تنظیمات پارامترهای شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه و ماشین بردار پشتیبان

برای حصول تنظیمات موثر پارامترها، چندین اجرا با پارامترهای متفاوت انجام گرفته است و بهترین پارامترها بر اساس رویکرد آزمون و خطا و مقادیر توصیه‌شده در مطالعات پیشین انتخاب شده است [۳۳]. پارامترهای شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. عملکرد شبکه عصبی پرسپترون چند لایه اساساً وابسته به معماری شبکه است. بر اساس یک قاعده کلی تقریبی، یک تک‌لایه مخفی شبکه عصبی برای تقریب هر تابع پیوسته و غیرخطی کافی می‌باشد [۳۴]. انتخاب تعداد نرون‌های مخفی، نقش مهمی در ساخت مدل دارد. هت-نلسون (۱۹۸۷)پیشنهاد کرد، حداکثر تعداد نورون‌های مخفی بر اساس قضیه کولموگوروف $n_h \leq 2ni + 1$ می‌تواند باشد، بطوریکه n_h تعداد نورون‌های لایه مخفی و ni تعداد ورودی‌هاست. با توجه به اینکه در مساله حاضر، تعداد ورودی‌ها ۶ عدد است، مرز بالایی $2 \times 6 + 1 = 13$ برای جلوگیری از بیش‌برازش، مناسب خواهد بود. بنابراین تعداد نورون‌های لایه مخفی از ۱ تا ۱۳ متغیر بوده و نهایتاً در اینجا برای ۸ نرون بهترین جواب برای مدل حاصل شده است. از دو الگوریتم لونبرگ-مارکوارت[۲۴] و شیب توام مقیاس‌شده[۲۵] به منظور مقایسه کارایی، برای آموزش استفاده شده است و نهایتاً الگوریتم شیب توام مقیاس‌شده با توجه به خطای کمتر انتخاب گردیده است.

در مورد ماشین بردار پشتیبان همانطور که پیشتر گفته شد، مهمترین پارامتر مربوط به نوع تابع هسته‌ای می‌باشد که نوع ساختار کلی مدل را مشخص میکند.

جدول ۲- پارامترهای شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

پارامتر	مقدار
تابع فعال‌سازی	tan-hyperbolic, Purelin
روش بهینه‌سازی	Scaled Conjugate-Gradient, Levenberge-Marquardt
تعداد نورون‌های لایه مخفی	متغییر از ۱ تا ۱۳
Epochs	۱۰۰۰-۵۰۰

از چهار تابع هسته‌ای گوسی[۲۶]، خطی، درجه دو[۲۷] و سه[۲۸] بمنظور تحقیق بهترین تابع هسته‌ای استفاده شده است. در جدول ۳ پارامترهای دخیل در ساخت مدل بردار پشتیبان نمایش داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای ماشین بردار پشتیبان

پارامتر	مقدار
تابع هسته‌ای	Cubic, linear, quadratic, Gaussian
مقیاس هسته	متغییر
ε	متغییر از ۰/۰۰۱ تا ۰/۱
محدودیت باکس	متغییر از ۰/۱ تا ۰/۹

پس از ارزیابی مدل‌های مختلف، بهترین مدل ضریب گذر برای تابع هسته‌ای گوسی حاصل شد و پارامترهای مقایس هسته ۲/۴، محدودیت باکس ۰/۲۹۱ و ε برابر ۰/۰۱۹ بدست آمده است و بهترین مدل برای ضریب انعکاس نیز دارای تابع هسته‌ای از نوع درجه دو بوده که در آن مقایس هسته ۲، محدودیت باکس ۰/۰۹۶ و ε برابر ۰/۰۵ می‌باشد.

۴-نتایج و بحث

۴-۱-مدل به‌دست آمده ضرایب انعکاس و گذر

یکی از ابزارهای مهم در صحت‌سنجی مدل‌های حاصل از محاسبات نرم، ارزیابی ضریب همبستگی خروجی مدل با نتایج واقعی می‌باشد. هر چقدر این ضریب به یک نزدیک باشد مدل با نتایج واقعی همبسته‌تر خواهد بود. بر اساس یک قاعده عقلی اسمیت بیان داشت اگر یک مدل ضریب همبستگی بیش از ۰/۸ داشته باشد (R>0.8) بین خروجی مدل با نتایج واقعی همبستگی قوی برقرار است.

جدول ۴ ضریب همبستگی مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه و ماشین بردار پشتیبان را نمایش می‌دهد. اگرچه تفاوت معناداری در نتایج مشخص نیست، با وجود این به دلیل نتایج بهتر مدل شبکه عصبی پرسپترون، این مدل بعنوان مدل برتر انتخاب شده و جزئیات مربوط به مدل در ادامه ارائه خواهد شد.

جدول ۴- ضریب همبستگی مدل‌های مورد بررسی

پارامتر	ضریب گذر C_t	ضریب انعکاس C_r
شبکه عصبی پرسپترون چندلایه	۰/۹۶۶۲۹	۰/۸۶۸۹
ماشین بردار پشتیبان	۰/۹۴۵۴	۰/۸۵۴۴

۴-۱- مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به‌دست آمده همانطور که گفته شد از یک لایه وردی با شش پارامتر، یک لایه مخفی با هشت نورون و لایه خروجی با دو پارامتر هدف تشکیل شده است. تمامی وزن‌ها و مقادیر اریب در جدول ۴ خلاصه شده است.

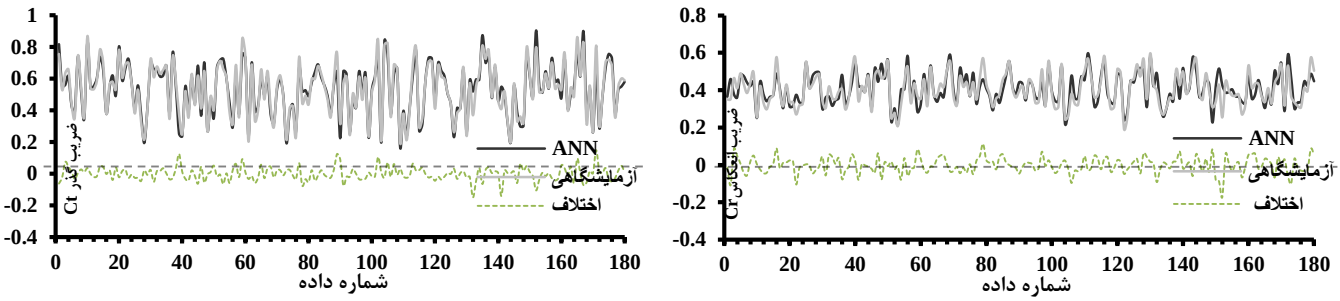
در جدول ۴، W وزن، *Bias* اریب و h نشانگر نورون لایه مخفی و o مربوط به لایه خروجی است. در **شکل ۶**شکل ۷ مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه نمایش داده شده است. با مشاهده شکل ۶ پیداست مقادیر واقعی تطبیق قابل قبولی با مقادیر پیشبینی مدل دارند و اختلاف این مقادیر در حدود صفر نوسان می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود این اختلاف تقریبا در بین داده‌ها پراکنده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

جدول ۵- مقادیر وزن‌ها و اریب‌ها

شماره نورون	وزن‌ها								اریب‌ها	
	W_{1h}	W_{2h}	W_{3h}	W_{4h}	W_{5h}	W_{6h}	W_{1O}	W_{2O}	$Bias_h$	$Bias_O$
۱	۰/۸۷	-۱/۹۷۵	۰/۹۶۳	-۰/۸۳۱	-۰/۱۶۶	-۰/۵۶۳	-۰/۰۴۸	۰/۰۷۶	-۰/۹۶۳	-۰/۱۹۹
۲	۰/۶۴	۰/۲۵۸	-۱/۰۶۵	۰/۰۴۵	۱/۰۵۶	۱/۷۳	-۰/۶۵۷	-۰/۴۲۹	-۱/۲۵۳	-۰/۲۴۰
۳	۰/۱۰۱	-۰/۹۳۴	-۰/۴۸۵	-۰/۷۲۰	۱/۳۹	۰/۷۳۸	-۰/۱۲۶	۰/۴۷۵	-۰/۳۵۸	
۴	۰/۰۷۲	۱/۰۶۳	۰/۵۵۵	۰/۵۳۰	۰/۱۱۴	-۰/۱۷۹	۰/۱۸۴	-۰/۶۴۴	-۰/۳۳۷	
۵	-۰/۴۲۴	۱/۰۵۶	-۰/۱۶۳	۰/۸۰۰	۰/۴۵۹	-۰/۰۹۴	۰/۶۳۶	۰/۰۳۳	-۰/۶۸۷	
۶	۱/۵۴	-۰/۷۶۱	-۰/۲۲	-۰/۳۵۵	-۰/۹۴۳	۰/۲۶۲	۰/۵۹۶	-۰/۲۹۱	۰/۹۷۳	
۷	۰/۷۹۱	-۰/۶۹	-۰/۲۹۱	۰/۸۹۷	-۱/۲۱۲	-۰/۵۵	-۰/۸۴۱	۰/۰۴۴	۱/۴۳۰	
۸	-۰/۲۴۲	۰/۷۶۸	۰/۲۱۳	-۰/۶۷۸	۰/۳۹۷	۱/۲۷۹	-۰/۲۷۱	-۰/۱۵۲	-۲/۲۶۹	



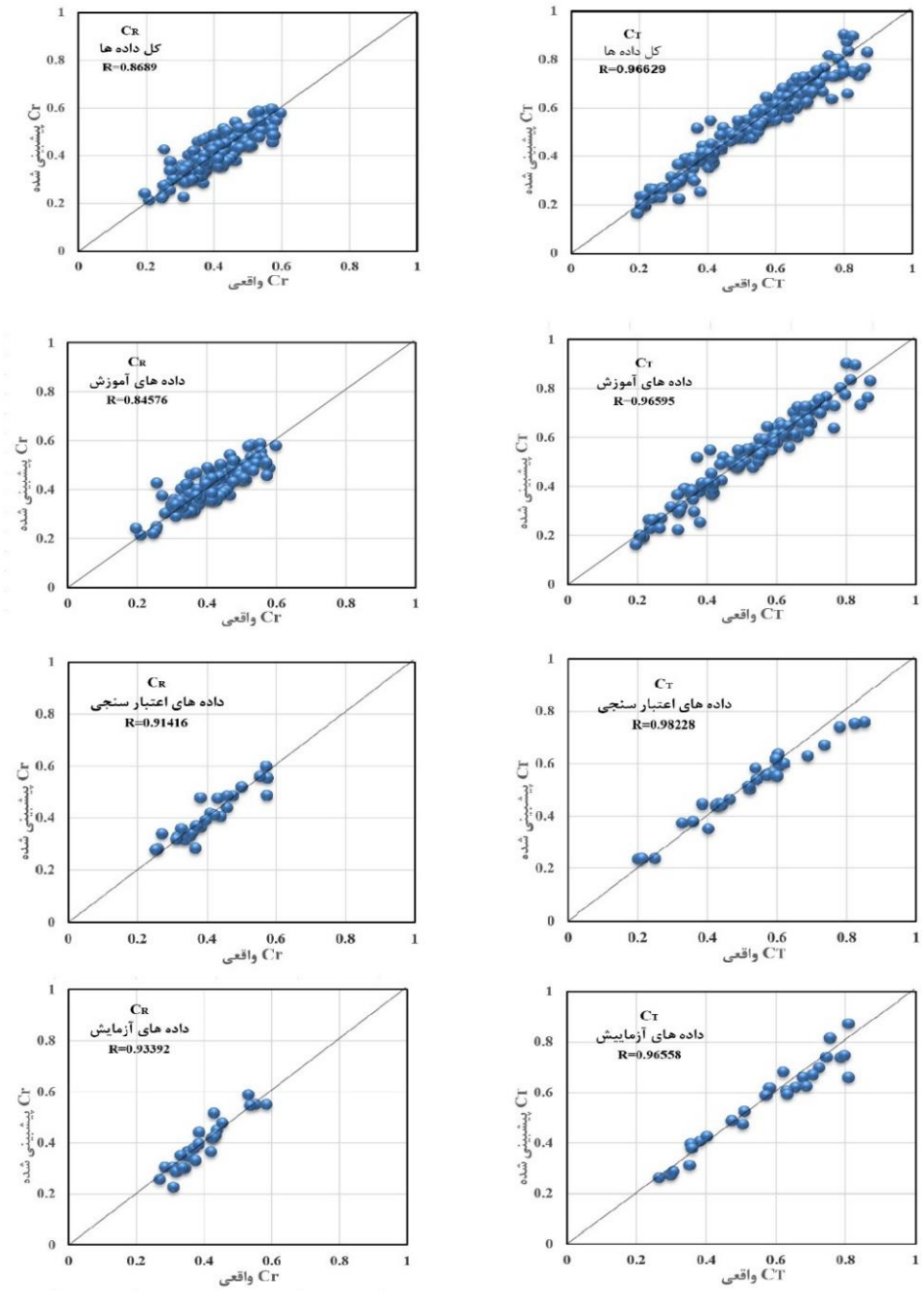
شکل ۶- مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه در برابر پیشبینی مدل شبکه عصبی و نمایش اختلاف آنها

همچنین نتایج پیش‌بینی مدل نیز در چهار گروه تمامی داده‌ها، داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به‌صورت بصری در شکل ۷ ارائه شده است. یکی از مهمترین عوامل در سنجش اعتبار مدل، پراکندگی مناسب هر دسته از داده‌ها در طول بازه پارامتر هدف است. بعنوان مثال اگر داده‌های آموزش تنها در بخشی از بازه قابل قبول پارامتر متراکم شوند شبکه عصبی تنها متمرکز بر مدل‌سازی رفتار آن بخش از داده‌ها شده و ممکن است تعمیم و عمومیت مدل دچار تردید شود. با استدلال مشابه داده‌های اعتبارسنجی و آزمایش هم به منظور سنجش مناسب از عملکرد مدل می‌بایست در طول بازه پارامتر هدف به نحو مناسبی پراکنده شوند. همانطور که مشخص است پراکندگی داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش بسیار خوب بوده و درطول بازه ضرایب انعکاس (C_r) و گذر (C_t) پراکنده شده اند.

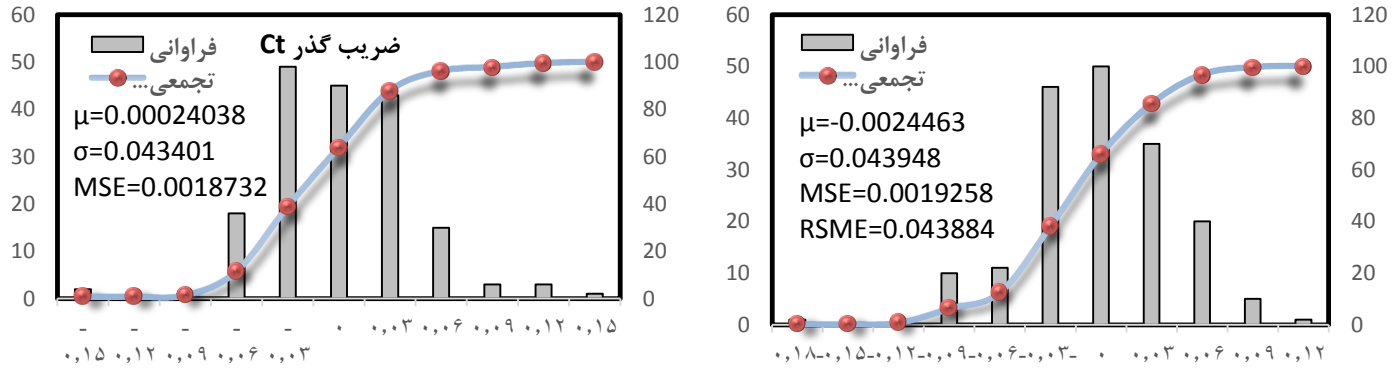
توزیع خطای مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی در شکل ۸، نمایش داده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود نویز تقریباً گوسی بوده (توزیع نرمال با میانگین صفر) و در حدود صفر دارای حداکثر خود است و بسمت خاصی انحراف ندارد. همچنین میانه (برآمد دارای توزیع تجمعی ۰/۵) نیز در محدوده صفر می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]



شکل ۷- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ضریب انعکاس و گذر با مدل شبکه عصبی به تفکیک کل داده‌ها و داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش



شکل ۸- توزیع خطای مقادیر پیش‌بینی و واقعی توسط مدل معرفی شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

۴-۲-مطالعه پارامتریک و آنالیز حساسیت

در این تحقیق، به‌منظور تایید بیشتر اعتبار مدل پیش‌بینی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، یک تحلیل پارامتریک نیز انجام گرفته است. تحلیل پارامتریک به دنبال بررسی پاسخ ضریب انعکاس و گذر پیش‌بینی شده مدل، توسط مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی است. میزان توانایی و قوام یک مدل، با بررسی میزان تطابق مقادیر هدف پیش‌بینی‌شده با رفتار فیزیکی سیستم مورد تحقیق، تعیین می‌شود. شکل ۹ گرایش ضرایب انعکاس و گذر پیش‌بینی‌شده را نسبت به پارامترهای ورودی $B, \frac{d}{h}, \frac{B}{L_p}, H_s, Kh, \frac{H_s}{L_p}$ نمایش می‌دهد.

مطابق شکل برای عرض محفظه موج‌شکن، با افزایش عرض محفظه ضریب گذر کاهشی بوده که ناشی از اتلاف انرژی امواج مابین مصالح سنگی است، همچنین مشخص است ضریب انعکاس تاثیر چندانی از افزایش عرض محفظه نمی‌گیرد و در محدوده ۰/۳۵ تا ۰/۴ در حرکت است.

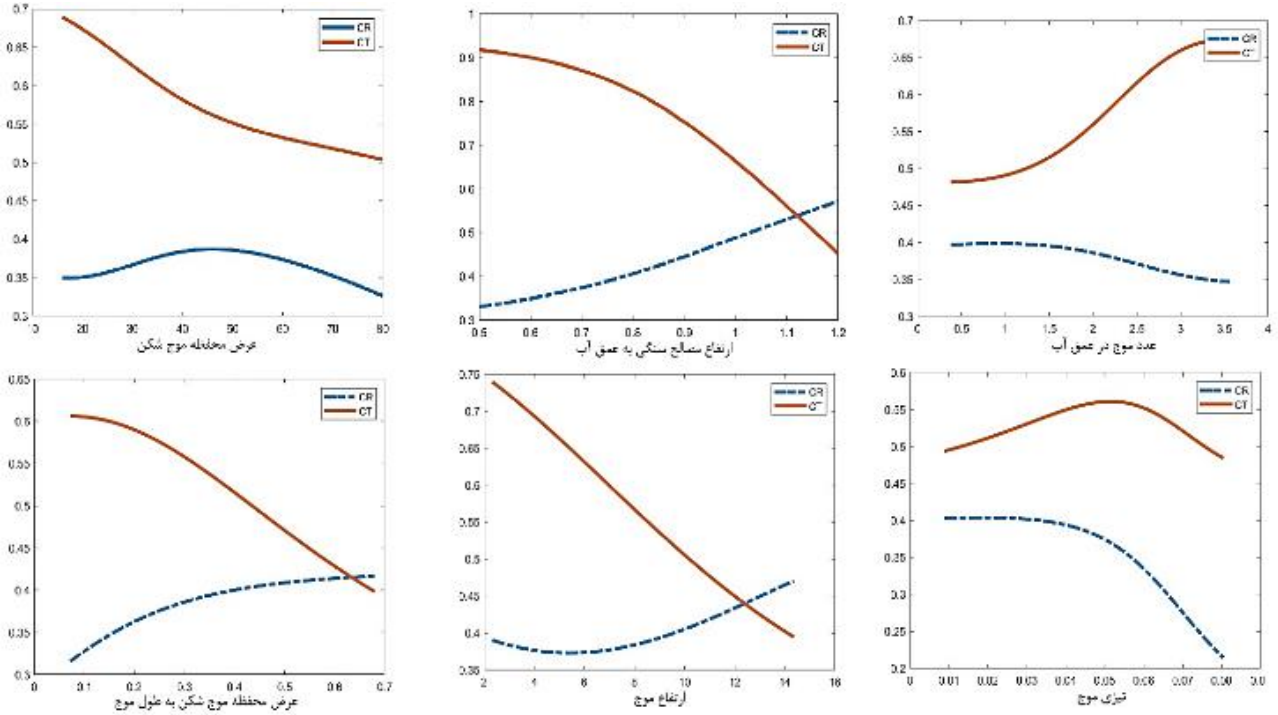
در مورد ارتفاع مصالح سنگی با افزایش ارتفاع این مصالح و ایجاد مانع در برابر بخش بزرگ‌تری از انرژی امواج، ضریب گذر کاهشی و ضریب انعکاس افزایش خواهد بود.

بنا بر آنچه در ادبیات آمده است، سازه در مواجه با اعداد موج در عمق (Kh) بالاتر می‌بایست عملکرد بهتری داشته باشد، بدین معنی که ضرایب گذر کاهش و انعکاس با افزایش آن افزایش یابند (مراجعه شود به [۳۵])، لیکن در اینجا نتایج عملکرد متفاوتی را نشان می‌دهد که مهمترین عامل آن می‌تواند رفتار متفاوت سازه نسبت به ارتفاع متفاوت مصالح سنگی باشد. زمانیکه مصالح سنگی در زیر سطح آب قرار دارد امواج با طول موج بالاتر (اعداد موج در عمق کمتر) اندرکنش بالاتری نسبت به امواج با طول موج کمتر با مصالح سنگی و بستر دارند در نتیجه عملا وجود مصالح سنگی در برخی اعماق باعث پاسخ بیشتر سازه به اعداد موج در عمق کمتر می‌شود که در شکل ۹ قابل رویت می‌باشد.

در مورد موج‌شکن‌های نوع جارلن حداقل انعکاس در $0.2 < \frac{B}{L} < 0.25$ و حداکثر آن به دلیل پدیده تشدید در $\frac{B}{L} \approx 0.5$ رخ خواهد داد [۳۷،۳۶]، حال آنکه برای امواج با باند وسیع[۳۰] و/یا وجود مصالح سنگی در محفظه موج‌شکن، این اثرات قابل مشاهده نخواهد بود [۳۹،۳۸] و روند ضریب انعکاس دارای نوسان نیست.

همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، ضریب گذر در برابر افزایش ارتفاع شاخص کاهشی بوده که می‌تواند ناشی از برخورد امواج بلندتر به بخش صلب سازه و پاسخ قوی‌تر سازه نسبت به امواج تیزتر باشد. بطور عکس ضریب انعکاس با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد که دلایل بالا برای توجیه آن نیز صدق می‌کند.

در مورد تیزی موج نیز به مانند پارامتر عدد موج در عمق با مرور ادبیات فنی انتظار داریم با افزایش تیزی پاسخ سازه قوی‌تر باشد [۴۰] حال آنکه مشابه آنچه برای عملکرد سازه نسبت به عدد موج در عمق نیز ذکر شده امواج تیزتر که دارای طول موج کمتر و ارتفاع بیشتر هستند، اندرکنش کمتری با مصالح سنگی وقتی مصالح سنگی زیر سطح آب هستند، دارند و نتیجتا پاسخ سازه به امواج بلندتر (تیزی کمتر) مخصوصا در انعکاس بیشتر است. در مورد ضریب گذر رفتار دارای دو بخش متفاوت بوده در تیزی های



شکل ۹- مطالعه پارامتریک ضرایب انعکاس و گذر در مدل شبکه عصبی پیشنهاد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

معمول با افزایش تیزی موج بنابر توضیحات بالا عملکرد سازه بدتر شده، منتها در تیزی‌های بسیار شدید مجددا ضریب گذر کم شده و عملکرد سازه بهبود می‌یابد که می‌تواند ناشی از برخورد امواج بسیار بلند با بخش صلب سازه باشد.

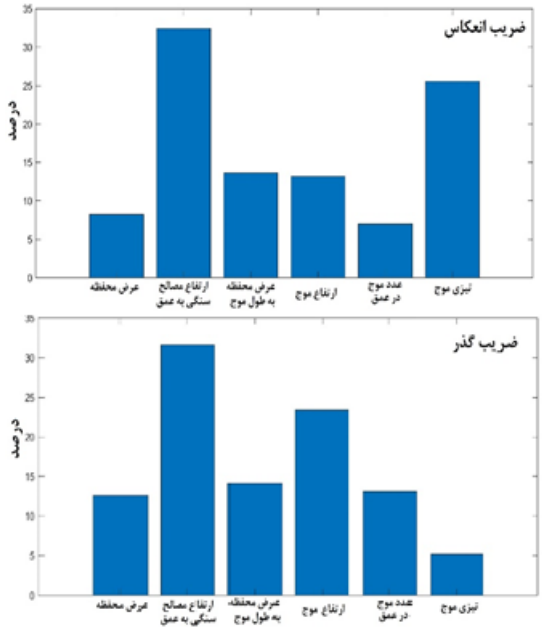
نتایج تحلیل پارامتری فوق به طور کلی از منظر مهندسی سازه‌های دریایی مورد انتظار و قابل قبول است، بطور مثال با افزایش نسبت ارتفاع مصالح سنگی، طبق انتظار با ایجاد مانع بیشتر توسط مصالح سنگی در برابر انرژی موج، ضریب انعکاس زیاد و ضریب گذر کم می‌شود. می‌توان گفت نتایج حاکی از آن است که مدل پیشنهاد شده قادر به تخمین مناسب ویژگی‌های مهم دخیل در رفتار ضرایب انعکاس و گذر می‌باشد.

آنالیز حساسیت میزان مشارکت پارامترهای ورودی در پیش‌بینی خروجی‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهد. به‌منظور انجام آنالیز حساسیت از یک فرآیند ساده استفاده شده است. درصد حساسیت یک خروجی به هر پارامتر ورودی با استفاده از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$N_i = f_{max}(x_i) - f_{min}(x_i) \quad (۴)$$

$$S_i = \frac{N_i}{\sum_{j=1}^{i} N_j} \times 100 \quad (۵)$$

در معادلات بالا، $f_{max}(x_i)$ و $f_{min}(x_i)$ به‌ترتیب مقادیر بیشترین و کمترین مقدار پیش‌بینی‌شده خروجی روی دامنه iامین ورودی است، به‌طوری‌که مقادیردیگر پارامترها برابر میانگین مقدار خود باشند. نتایج آنالیز حساسیت مدل معرفی شده در **شکل ۱۰** نمایش داده شده است.



شکل ۱۰-آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی در مدل شبکه عصبی معرفی شده

می‌توان فهمید که در خصوص ضریب انعکاس، بیشترین مشارکت به‌ترتیب مربوط به پارامتر نسبت ارتفاع مصالح سنگی به عمق آب و پارامتر تیزی موج است. در ضریب گذر نیز، پارامتر نسبت ارتفاع مصالح سنگی به عمق آب به همراه پارامتر ارتفاع موج است که بیشترین حساسیت را داراست. در نهایت می‌توان گفت بخش پرشده با مصالح سنگی موج‌شکن نفوذپذیر قائم معرفی شده، دارای بیشترین تأثیر در رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن می‌باشد.

۵-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، به‌منظور ساخت مدل پیش‌بینی ضریب انعکاس و گذر موج‌شکن ابتکاری معرفی شده، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به‌عنوان یکی از کاراترین روش‌های محاسبات نرم پیشنهاد شده است. مدل پیشنهاد شده براساس داده‌های آزمایشگاهی شامل ۱۸۰ داده ساخته شده است. نتایج مدل نشان‌دهنده ضریب همبستگی برابر ۰/۸۶۸۹ برای ضریب انعکاس و ۰/۹۶۶۲۹ برای ضریب گذر فیمابین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشد که قابل قبول می‌باشد. آنالیز حساسیت و مطالعه پارامتریک نیز نشان‌دهنده نقش مهم پارامتر نسبت ارتفاع سنگ به عمق آب است و رفتار فیزیکی مناسب مدل را تایید کردند. همچنین بنابر آنچه بعنوان حد پایین ضریب گذر در **جدول ۱** با مقدار ۰/۲۱ آورده شده است می‌توان گفت این موج‌شکن در بهترین عملکرد خود در کاهش ضریب گذر قادر است تا جلوی بیش از ۹۵٪ انرژی موج برخوردی را بگیرد (انرژی موج متناسب با مجذور ارتفاع موج است $\left(\left(1-\frac{0.21^2}{1}\right)\times 100 \approx 95\%\right)$) و می‌تواند مناسب برای بسیاری از اهداف مهندسی باشد.

کلید واژگان

1- Scouring
2- Littoral drift
3- Near shore circulation
4- The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan
5- Longshore sediment
6- Wiegel
7- Physical modeling
8- On-site investigation
9- Artificial neural network
10- Support vector machine
11- Multilayer Perceptron Neural Network
12- Feed-forward architectures
13- Back-propagation algorithm
14- Bias
15- Global optimization
16- Simulated Annealing
17- Statistical learning theory
18- ε-insensitive loss function

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

19- kernel function
20- Denmark hydraulic institute
21- Passive wave absorber
22- Modified JOHSWAP
23- Overfitting
24- Levenberg-Marquardt
25- Scaled Conjugate Gradient
26- Gaussian
27- Quadratic
28- Cubic
29- Correlation coefficient
30- Broad Banded Waves

۶ - مراجع

1- Fugazza, M., & Natale, L., (1992), *Hydraulic design of perforated breakwaters*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 118(1), 1-14.

2- Chen, X., Li, Y., & Sun, D., (2002), *Regular waves acting on double-layered perforated caissons*. In The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.

3- Twu, S. W., & Lin, D. T., (1991), *On a highly effective wave absorber*. Coastal Engineering, 15(4), 389-405.

4- Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N., & Cowdell, S., (2000), *Wave interactions with perforated breakwater*. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 126(5), 229-235.

5- Liu, Y., & Li, Y., (2006), *Wave interaction with a modified Jarlan-type perforated breakwater*. In The Seventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. International Society of Offshore and Polar Engineers

6- Mani, J. S., & Jayakumar, S., (1995), *Wave transmission by suspended pipe breakwater*. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 121(6), 335-338.

7- Chiang, C. M., (1983), *The applied dynamics of ocean surface waves.*

8- Gardner, J. D., Townend, I. H., & Fleming, C. A., (1987), *The design of a slotted vertical screen breakwater*. In Coastal Engineering 1986 (pp. 1881-1893).

9- Hutchinson, P. S., & Raudkivi, A. J., (1985), *Case History of a Spaced Pile Breakwater at Half Moon Bay Marina Auckland*, New Zealand. In Coastal Engineering 1984 (pp. 2530-2535).

10- Mei, C. C., Liu, P. L., & Ippen, A. T., (1974), *Quadratic loss and scattering of long waves*. Journal of Waterways, Harbors & Coast EngDiv, 100(ASCE Paper# 10754).

11- Isaacson, M., Premasiri, S., & Yang, G., (1998), *Wave interactions with vertical slotted barrier*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 124(3), 118-126.

12- Huang, Z., (2007), *An experimental study of wave scattering by a vertical slotted barrier in the presence of a current.* Ocean Engineering, 34(5), 717-723.

13- Alavi, A.H., Gandomi, A.H., (2011), *Prediction of principal ground-motion parameters using a hybrid method coupling artificial neural networks and simulated annealing.* Computers and Structures 89 (23e24), 2176e2194.

14- Yaghouby, F., Ayatollahi, A., Yaghouby, M., (2010a). *An arrhythmia classification method based on selected features of heart rate variability signal and support vector machine-based classifier.* In: IFMBE Proceeding, vol. 25/4. Springer SCI, pp. 1928e1931.

15- Deo, M.C., (2010), *Artificial neural networks in coastal and ocean engineering.* Indian Journal of Marine Science 39 (4), 589–596.

16- Van Gent, M.R.A., van den Boogaard, H.F.P., Pozueta, B., Medina, J.R., (2007), *Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures.* Coastal Engineering 54,586–593.

17- Verhaeghe, H., (2005), *Neural network prediction of wave overtopping at coastal structures* PhD thesis. Universite it Gent, Gent, BE.

18- CLASH, (2004), *Crest Level Assessment of coastal Structures by full scale monitoring*, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping.EC-contract EVK3-CT-2001-00058. ⟨www.clash-eu.org⟩

19- Formentin, S., Zanuttigh, B., & van der Meer, J., (2017), *The New EurOtop Neural Network Tool for an Improved Prediction of Wave Overtopping*. Proc. of ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters.

20- Garrido, J.M., Medina, J.R., (2012), *New neural network-derived empirical formulas for estimating wave reflection on Jarlan-type breakwaters.* Coast.Eng.62, p. 9–18.

21- Zanuttigh, B., Formentin, S. M., & van der Meer, J. W., (2016), *Prediction of extreme and tolerable wave overtopping discharges through an advanced neural network.* Ocean Engineering, 127, 7-22.

22- Vapnik, V., (1998), *Statistical learning theory*. Wiley, New York.

23- Mahjoobi, J. and Mosabbeb, E.A., (2009),

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]

Prediction of significant wave height using regressive support vector machines. J.Ocean Engineering, 36(5), pp.339-347.

24- Kim, D.K., Kim, D.H., Chang, S.K., Lee, J.J. and Lee, D.H., (2010), *Stability Number Prediction for Breakwater Armor Blocks USing Support Vector Regression.* KSCE Journal of Civil Engineering, 15(2), pp.225-230.

25- Perlovsky, L.I., (2001), *Neural Networks and Intellect*. Oxford University Press.

26- Alavi, A.H., Gandomi, A.H., Mollahasani, A., Heshmati, A.A.R., Rashed, A., (2010), *Modeling of maximum dry density and optimum moisture content of stabilized soil using artificial neural networks*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173 (3), 368e379.

27- Boser, B. E., Guyon, I. M., and Vapnik, V. N., (1992), *A training algorithm for optimal margin classifiers.* Proceedings 5th Annual ACM Workshop on COLT, Pittsburgh, PA, 144–152.

28- Cortes, C., and Vapnik, V. N., (1995), *Support vector networks.* Machine Learning, 20, 273–297.

29- Smola, A. J., and Scholkopf, B., (2004), *A tutorial on support vector regression*. Statistics and Computing, 14, 199–222.

30- Ahmed, H., Schlenkhoff, A., & Oertel, M., (2013), *Stokes second-order wave interaction with vertical slotted wall breakwater*. In Coastal Structures 2011: (In 2 Volumes) (pp. 691-703).

31- Elbisy, M. S., Mlybari, E. M., & Helal, M. M., (2016), *Hydrodynamic performance of multiple-row slotted breakwaters*. Journal of Marine Science and Application, 15(2), 123-135.

32- Frank, I.E., Todeschini, R., (1994), *The Data Analysis Handbook*. Elsevier, Amsterdam.

33- Gandomi, A.H., Alavi, A.H., (2011), *Applications of computational intelligence in behavior simulation of concrete materials*. (Chapter 9). In: Yang, X.S., Koziel, S. (Eds.), Computational Optimization and Applications in Engineering and Industry, vol. 359. Springer SCI, pp. 221e243.

34- Cybenko, J., (1989), *Approximations by superpositions of a sigmoidal function*. Mathematics of Control Signals and Systems 2, 303e314.

35- KIRCA, V. Ö., & KABDAŞLI, M. S., (2009), *Reduction of non-breaking wave loads on caisson type breakwaters using a modified perforated configuration*. Ocean Engineering, 36(17), 1316-1331.

36- Ou-Yang, H.T., Huang, L.H., Hwang, W.S., (1997), *The interference of a semi-submerged obstacle on the porous breakwater.* Applied Ocean Research. 19: p. 263-273.

37- Zhu, S., Chwang, A.T., (2001), *Investigation on the reflection behavior of a slotted wall*. Coastal Engineering, 43: p. 93-104.

38- Tanimoto, K., Yoshimoto, Y., (1982), *Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall.* Report of the Port and Harbour Research Institute, 21(3): p. 44-77 (in Japanese with English abstract).

39- Liu, Y., Li, Y.C., Teng, B., (2007), *Wave interaction with a new type perforated breakwater*. Acta Mechanica Sinica, 23: p. 351-358.

40- Chegini, V., (1994*). Design of Upright Perforated Energy Dissipators for Use in Wave Basins.* University of New South Wales.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.17.5]