

پیش بینی حرکات سواش امواج فرائقلی بر روی سواحل طبیعی با استفاده از مدل های درختی M5' و MARS

عباس یگانه بختیاری*، سید محمود حمزه ضیابری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ اسفند ۱۳۹۲
بازنگری: ۲۵ بهمن ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۶ شهریور ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

سواحل طبیعی
حرکات سواش
بالاروی موج
مدل درختی

چکیده: وقوع امواج طوفانی حدی، زمینه را برای فرسایش سواحل طبیعی فراهم میکنند. در حین وقوع این امواج طوفانی، انرژی سواش فرائقلی نقش مهمی را در میزان فرسایش ایجاد شده، ایفا می کند. فرمول موجود برای سواش فرائقلی تنها براساس پارامترهای ارتفاع موج و طول موج است و دارای دقت پایینی است. اخیراً، مدل های درختی به عنوان یکی از روش های جدید داده کاوی معرفی شده اند. بطوریکه تمام روابط ممکن بین پارامترهای درگیر را در نظر می گیرند. در این مطالعه با استفاده از مدل های درختی M5' و MARS، مدلی براساس پارامترهای هیدرودینامیکی شامل تشابه شکست، شار مومنتوم و پارامتر جدید بی-بعد سرعت مشخصه ارائه شده است. جهت ساخت و ارزیابی مدل از ۵۷۹ داده میدانی جمع آوری شده از منابع موجود استفاده شده است. عملکرد مدل های توسعه داده شده و موجود برای سواش فرائقلی با استفاده از شاخص های خطای آماری مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که مدل MARS توسعه داده شده بترتیب مقادیر RMSE و R را به میزان ۴۲ و ۲۶ درصد و مدل M5' نیز به میزان ۱۶ و ۱۲ درصد این مقادیر را نسبت به رایج ترین مدل تجربی موجود بهبود دادند. طبق آنالیز حساسیت انجام شده توسط روش MARS و همچنین نتایج مدل M5'، پارامتر بی-بعد سرعت مشخصه بیشترین وابستگی و پارامتر تشابه شکست کمترین وابستگی را به سواش فرائقلی از خود نشان دادند. عملکرد مدل های توسعه داده شده همچنین با یک مطالعه عددی انجام گرفته بر روی سواحل تیزمین در مکزیک مقایسه شده است.

نحوه استهلاك انرژی متفاوت است. حرکت سواش فرائقلی معمولاً بر روی سواحل استهلاکی^۴ غالب است، درحالیکه برای سواحل انعکاسی، حرکت سواش برخوردی غالب است [۲].

از نخستین کارهای انجام شده برای پیش بینی حرکت سواش می توان به مطالعه هانت^۵ (۱۹۵۹) اشاره نمود. او، ارتفاع سواش را بصورت تابعی از ارتفاع موج، تیزی موج و شیب ساحل بیان نمود [۳]. گازا و تورنتون^۶ (۱۹۸۲)، بالاروی موج مشخصه (R_s) شامل هر دو مولفه خیزآب موج و سواش را بصورت تابعی خطی از ارتفاع موج شاخص (H_0) در آب عمیق بیان نمودند.

$$R_s = 3.48 + 0.71H_0 \quad (1)$$

گازا و تورنتون همچنین خیزآب موج را با عبارت $0.17H_0$ تخمین زده اند. بنابراین بر طبق رابطه ۱، کل بالاروی موج تقریباً چهار برابر خیزآب موج است یا به عبارتی دیگر، مولفه سواش بالاروی موج بخش قابل توجهی از بالاروی موج را تشکیل می دهد [۴].

هاجس^۷ (۲۰۰۴) فرمول جدیدی برای بالاروی موج براساس پارامتر فلاکس مومنتوم موج (m) ارائه نمود. این پارامتر در معادله ۲ نشان داده شده است.

$$m = \frac{M_f}{\rho gh^2} \quad (2)$$

۱- مقدمه

سواحل طبیعی به عنوان اولین مانع حفاظتی در مقابل امواج و جریان های ساحلی نقش مهمی را در حفاظت ساحل ایفا می کنند. شناخت شرایطی که منجر به پدیده روگذری موج بر روی سواحل گردد، برای مدیریت ساحلی و همچنین تخمین احتمال سیلاب در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. بالاروی موج یکی از پارامترهای مهم برای تعیین میزان روگذری موج بر روی سواحل طبیعی است. بالاروی موج بصورت فاصله قائم بین تراز آب ساکن و بالاترین نقطه ای که موج به ساحل می رسد، تعریف می گردد. بالاروی موج معمولاً از دو مولفه خیزآب^۱ موج (ارتفاع تراز متوسط سطح آب در خط ساحلی) و حرکت سواش تشکیل شده است.

حرکات سواش بصورت تغییرات آنی سطح آب پیرامون تراز متوسط سطح آب تعریف می گردند. حرکت سواش امواج معمولاً براساس فرکانس به دو محدوده، سواش فرائقلی^۲ ($f < 0.05$ Hz) و سواش برخوردی^۳ ($f \geq 0.05$ Hz) تقسیم بندی شده است [۱]. هر یک از این مولفه ها براساس سه پارامتر شیب ساحل، ارتفاع موج در آب عمیق و طول موج آب عمیق فرمول بندی شده اند. نحوه مشارکت هر یک از این پارامترها با توجه به

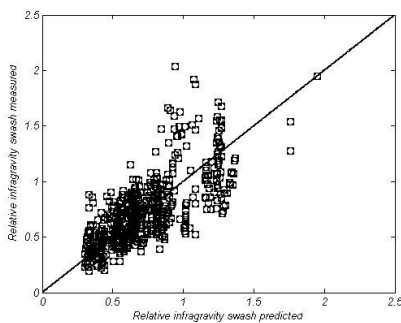
* نویسنده عهده دار مکاتبات: yeganeh@iust.ac.ir

- 4 Dissipative beaches
- 5 Hunt
- 6 Guza and Thornton
- 7 Hughes

- 1 Setup
- 2 Infragravity swash
- 3 Incident swash

هدف اصلی این مطالعه ارائه مدلی دقیقتر و صحیحتر برای پیش‌بینی حرکات سواش فرائقلی با استفاده از الگوریتم مدل‌های درختی است. در مدل‌سازی از مجموعه داده‌های استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) و سنچال و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است. پارامترهای هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده شامل پارامترهای تشابه شکست، فلاکس مومنتوم و پارامتر جدید سرعت مشخصه هستند. مدل‌های درختی اخیراً در حوزه مهندسی آب معرفی شده‌اند [۸] و تاکنون بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. مدل‌های درختی نسبت به درخت‌های رگرسیونی دارای صحت بیشتر، قابل فهم‌تر نسبت به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و مرحله آموزش آن‌ها سریع‌تر است [۹].

هدف اصلی این مطالعه، ارائه فرمولی جدید برای پیش‌بینی حرکت سواش فرائقلی بر روی سواحل طبیعی است. این مقاله از پنج بخش تشکیل شده است. در بخش ۲، مدل‌های درختی $M5'$ و MARS به طور مختصر شرح داده شده‌اند. در بخش ۳، پارامترهای هیدرودینامیکی موثر در نظر گرفته شده، توصیف شده‌اند و در بخش ۴، نتایج مدل‌های MARS و $M5'$ ارائه و بحث شده‌اند. در نهایت در بخش ۵، خلاصه‌ای از مهمترین نتایج ارائه شده است.



شکل ۱: مقایسه بین مقادیر سواش فرائقلی نسبی (S_{ig}/H) پیش‌بینی شده توسط رابطه استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) و اندازه‌گیری شده

Fig. 1. Comparison between measured relative infra-gravity swash (S_{ig}/H) with the prediction of Stockdon et al. formula (2006)

۲- مدل‌های درختی

مدل درختی از تکنیک‌های جدید داده کاوی است که در دو دهه اخیر توسعه یافته است. مدل‌های درختی معمولاً بسیار کوچکتر و دقیقتر از درخت‌های رگرسیونی هستند. این مدل‌ها همانند درخت‌های رگرسیونی برای داده‌های زیاد موثرتر هستند. مزایای استفاده از ماشین یادگیری درخت تصمیم این است که تمام روابط ممکن بین تمام پارامترهای موجود در مدل را ارائه میکند و نتایج آن قابل فهم‌تر نسبت به روش شبکه عصبی و دارای صحت بیشتر نسبت به درخت‌های رگرسیونی است [۱۰]. مدل درخت $M5$ یکی از روش‌های محاسباتی نرم است که اولین بار توسط کوئیلان^۱ (۱۹۹۲)

که M_f ماکزیمم مومنتوم موج در پنجه سازه، h عمق آب در پنجه، g شتاب ثقل و ρ چگالی آب هستند. پارامتر فلاکس مومنتوم در واقع خصوصیات موج و سطح آب را به پاسخ سازه در برابر بارگذاری‌های موج مرتبط می‌سازد [۵].

در سال‌های اخیر با توجه به تحقیقات انجام گرفته بر روی بالاروی موج بر روی سواحل طبیعی نشان داده شده است که پیش‌بینی مولفه‌های بالاروی موج شامل سواش و خیز آب بطور جداگانه منجر به پراکندگی بسیار کمتری نسبت به پیش‌بینی مستقیم بالاروی موج براساس پارامترهای درگیر می‌شود [۱ و ۶]. بنابراین امروزه تلاش در جهت بهبود پیش‌بینی مولفه‌های بالاروی موج صورت می‌گیرد. از طرفی یکی از مولفه‌های بسیار تاثیرگذار بر بالاروی موج، سواش فرائقلی است. این مولفه سواش در برگیرنده فرکانس‌های موج کمتر از 0.05 هرتز یا پریودهای موج بزرگتر از 20 ثانیه است. این محدوده فرکانسی امواج، بخش قابل توجهی از فرایندهای مهم ساحلی بویژه پدیده فرسایش سواحل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین با توجه به اهمیت این محدوده فرکانسی، نیاز به ارائه یک مدل مناسب با توجه به عدم شناخت کافی از این پدیده الزامی است.

اخیراً، استاکدون و همکاران^۱ (۲۰۰۶) فرمولی تجربی براساس داده‌های میدانی از نه منطقه مختلف جهان برای حرکت سواش فرائقلی ارائه نمودند. آن‌ها سواش فرائقلی مشخصه (S_{ig}) برای کل مجموعه داده‌ها را از رابطه ۳ محاسبه نمودند.

$$S_{ig} = 4 \sqrt{\sum_{f=0.05}^{0.05} PSD(f) df} \quad (3)$$

که $PSD(f)$ تابع چگالی طیفی توان سواش است. تابع چگالی طیفی توان سواش در واقع براساس تابع چگالی طیفی بدست آمده از سری زمانی تراز سطح آب که پارامتر خیز آب موج از آن حذف شده، محاسبه شده است. عبارت زیر رادیکال در معادله ۳ درواقع ممان طیفی مرتبه صفر، m_0 ، در آنالیز طیفی است. عبارت S_{ig} به این علت با عنوان سواش فرائقلی مشخصه نامگذاری شده است.

استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از پارامترهای طول موج و ارتفاع موج در آب عمیق رابطه ۴ را برای سواش امواج فرائقلی پیشنهاد نمودند.

$$S_{ig} = 0.06(H_0 L_0)^{0.5} \quad (4)$$

سواش فرائقلی پیش‌بینی شده توسط رابطه ۴ در مقابل مقادیر میدانی اندازه‌گیری شده برای داده‌های استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) و سنچال و همکاران^۲ [۷] در شکل ۱ رسم شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پیش‌بینی‌های انجام شده توسط رابطه ۴ پراکندگی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند و دارای دقت پایینی هستند.

1 Stockdon et al.

2 Senechal

که پاسخ غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم را به وسیله مجموعه‌ای از اسپیلاین‌های خطی تکه‌ای مجزا (توابع چندجمله‌ای ساده) مدل می‌کند. هیچ فرض اولیه‌ای برای ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی نیاز نیست. نقطه انتهایی هر اسپیلاین، گره نامیده می‌شود. گره در واقع انتهای محدوده‌ای از داده‌ها و ابتدا محدوده دیگر را مشخص می‌کند. منحنی‌های تکه‌ای حاصل، که به عنوان توابع پایه شناخته می‌شوند، انعطاف‌پذیری بیشتری به مدل می‌دهند.

مدل MARS توابع پایه را به وسیله جستجوی گام به گام ایجاد می‌کند و از یک الگوریتم تطبیقی برای انتخاب محل گره‌ها استفاده می‌کند. مدل MARS در یک روند دو مرحله‌ای ساخته می‌شود. در مرحله پیش‌رو تمام توابع پایه ممکن وارد مدل می‌گردند و گره‌های احتمالی برای بهبود عملکرد تعیین می‌گردد. در مرحله پس‌رو عملیات هرس کردن برای حذف کم اثرترین ترم‌ها اجرا می‌گردد.

فرض کنیم y متغیر هدف و $X=(X_1, \dots, X_p)$ ماتریسی از P متغیر ورودی باشد. فرض می‌شود داده‌ها از یک مدل واقعی ناشناخته شده حاصل شده‌اند. در حالتیکه که پاسخ پیوسته باشد، رابطه زیر را برای مدل خواهیم داشت:

$$y = f(X_1, \dots, X_p) + e = f(X) + e \quad (6)$$

که e خطای موجود در مدل است. مدل MARS تابع f را به وسیله توابع پایه تقریب می‌زند. توابع پایه شامل چند جمله‌ای‌های ساده‌ای نظیر توابع خطی درجه اول و توابع درجه سوم هستند. توابع خطی تکه‌ای به صورت $\text{MAX}(0, x-t)$ نمایش داده می‌شوند. که در آن، t محل یک گره را نشان می‌دهد. عبارت (\cdot) MAX به این معنا است که تنها مقادیر مثبت تابع پایه در محاسبه در نظر گرفته می‌شود و برای مقادیر منفی تابع پایه مربوطه، صفر در نظر گرفته می‌شود. فرم کلی توابع پایه به فرم زیر است:

$$\text{MAX}(0, X-t) = \begin{cases} X-t & \text{if } X \geq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$f(x)$ مدل MARS، بصورت ترکیب خطی از توابع پایه و ترکیب این توابع به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$f(X) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m \lambda_m(X) \quad (8)$$

که هر λ_m یک تابع پایه است که می‌تواند یک تابع چند جمله‌ای ساده و یا حاصل از دو یا چند تابع چند جمله‌ای ساده، که قبلاً در مدل وجود داشته‌اند، باشد. ضرایب β ثابت‌هایی هستند که با استفاده از روش حداقل مربعات محاسبه می‌گردند.

روش مدل کردن MARS یک فرایند داده محور است. برای برازش مناسب مدل در معادله ۸، ابتدا یک روش انتخاب پیش‌رو بر روی داده‌های آموزشی اجرا می‌گردد. توابع پایه به فضای مدل اضافه می‌گردند و همچنین تداخل بین توابع پایه در نظر گرفته می‌شود. توابع به مدل تا زمانی اضافه می‌گردند تا مدل به مرحله Overfit برسد. برای کاهش تعداد ترم‌ها از یک

معرفی شده است [۱۱] و سپس ایده او توسط ونگ و ویتن^۱ (۱۹۹۷) در غالب روشی که $M5'$ نامیده می‌شود، بهبود یافت. در ادامه الگوریتم $M5'$ ارائه شده است:

۲-۱- الگوریتم $M5'$

- تقسیم فضای نمونه به زیرمجموعه‌های درونی کوچکتر (این تقسیم‌بندی بگونه‌ای انجام می‌گیرد که تغییرات زیرمجموعه‌های درونی کمینه گردد).

- اندازه‌گیری تغییرات زیرمجموعه‌ها بوسیله انحراف معیار مقادیری که از ریشه به گره رسیده‌اند با محاسبه کاهش خطای مورد انتظار که از آزمایش هر صفت در آن گره حاصل می‌شود.

- تعیین صفتی که میزان کاهش خطای مورد انتظار را بیشینه کند (تعیین صفت جدا کننده).

- توقف فرایند جداسازی در صورتیکه مقادیر خروجی تمامی نمونه‌هایی که به گره می‌رسند تغییرات ناچیزی داشته باشند و یا تعداد کمی از نمونه‌ها باقی بمانند.

- محاسبه کاهش انحراف معیار با استفاده از رابطه ۵:

$$SDR = sd(T) - \sum_i \frac{|T_i|}{|T|} \times sd(T_i) \quad (5)$$

در رابطه ۵، T شامل نمونه‌هایی است که به گره رسیده‌اند و T_i ها مجموعه‌هایی هستند که از تقسیم کردن گره براساس صفت انتخابی به دست آمده‌اند. Sd نیز انحراف معیار است.

- ایجاد یک مدل رگرسیون خطی چندگانه پس از ایجاد درخت برای هر گره داخلی.

- ساده‌سازی مدل‌های رگرسیون خطی با کنار گذاشتن صفاتی که حذف آن‌ها باعث کاهش میانگین خطا می‌شود.

- بعد از ساده‌سازی هر زیر درخت برای انجام عملیات هرس کردن مورد بررسی قرار می‌گیرد (اگر خطای تخمین زده شده برای مدل خطی در ریشه زیر درخت کوچکتر یا مساوی میانگین خطای درخت باشد زیر درخت هرس می‌شود).

بعد از عملیات هرس کردن، ناپیوستگی زیادی بین مدل‌های خطی مجاور در برگ‌های درخت هرس شده، ایجاد می‌شود. در فرایند هموارسازی مدل نهایی در یک برگ از ترکیب کردن مدل به دست آمده در آن برگ با مدل‌های موجود در مسیر ریشه تا برگ مربوطه، بدست می‌آید.

۲-۲- MARS الگوریتم

مدل MARS یک روش رگرسیون غیرخطی و غیرپارامتریک است

1 Wang and Witten

2 Multivariate Adaptive Regression Splines

با استفاده از تئوری جریان پتانسیل برای امواج بر روی بسترهای مسطح هاجس (۲۰۰۴)، تخمینی برای فلاکس مومنتوم موج غیر خطی بصورت زیر ارائه نمود:

$$m = \left(\frac{M_F}{\rho g h_b^2} \right)_{\max} = A_0 \left(\frac{h_b}{g T_p^2} \right)^{-4} \quad (11)$$

$$A_0 = 0.639 \left(\frac{H_b}{h_b} \right)^{2.026} \quad (12)$$

$$A_1 = 0.180 \left(\frac{H_b}{h_b} \right)^{-0.391} \quad (13)$$

در این روابط H_b ، ارتفاع موج شکست و h_b ، عمق شکست براساس رابطه نیمه-تجربی کومار و گوان^۲ (۱۹۷۳) برای شاخص ارتفاع شکست (Ω_b) و رابطه ویگل^۳ (۱۹۷۲) برای شاخص عمق شکست (λ_b) تقریب زده شده‌اند [۱۳ و ۱۵]. در این مقاله از روابط فوق برای محاسبه پارامتر مومنتوم استفاده شده است.

در سواحل انتقالی^۴ که بخش قابل توجهی از سواحل مورد مطالعه را شامل می‌شوند، امواج ایستا فرائقلی، جریان‌های کرانه‌ای و موارد دیگر پدیده‌های رایج هستند اما سرعت اوربیتالی امواج برخوردی پدیده غالب در چنین سواحلی است. در این مقاله پارامتر جدیدی که نشان دهنده اثرات سرعت ذرات موج بر سواحل فرائقلی است، معرفی شده است. در ادامه، این پارامتر با عنوان پارامتر بی‌بعد سرعت مشخصه نامگذاری شده است. این پارامتر بوسیله ساده‌سازی سرعت افقی ذرات موج در نقطه شکست، با فرض‌های ساده کننده زیر حاصل شده است:

۱- شرایط و فرض‌های تئوری موج خطی حاکم است.

۲- موج نشکسته است و در شرایط آب کم عمق قرار دارد.

۳- از اثرات انکسار صرف نظر می‌شود.

با توجه به فرضیات ذکر شده، سرعت مشخصه بی بعد براساس آنالیز ابعادی توسط معادلات زیر تقریب زده شده است:

$$\hat{u}_s = \frac{u}{\sqrt{g H_b}} = \frac{\sqrt{g H_b} T_p}{4 \pi h_b} \quad (14)$$

$$u = \frac{\pi H_b}{T_p} \frac{\cosh(k(h_b + z))}{\sinh(k h_b)} = \frac{\pi H_b}{T_p} \frac{1}{k h_b} \quad \text{at } z=0 \quad (15)$$

$$k = \frac{2\pi}{L_0} \quad (16)$$

روند پس‌رو استفاده می‌گردد. هدف این روند پیدا کردن بهینه‌ترین مدل با حذف توابع پایه اضافی است. روش پس‌رو، مدل را با هرس کردن توابع پایه‌ای که کمترین مشارکت را در ساخت مدل ایفا می‌کنند، بهینه می‌کند. بنابراین توابع پایه باقیمانده در مدل بهینه نهایی از تمام توابع پایه ممکن در مرحله پیش‌رو انتخاب شده‌اند. زیرمجموعه‌های مدل با استفاده از روش محاسباتی کم هزینه Cross-Validation عمومی (GCV) ایجاد شده‌اند. معادله GCV معیاری برای چگونگی برازش داده‌ها است و تعداد زیادی از توابع پایه را حذف می‌کند و احتمال Overfit شدن را کاهش می‌دهد. برای داده‌های آموزشی با N مشاهده، GCV مدل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$GCV = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(X_i)]^2}{\left(1 - \frac{M + d \times \frac{(m-1)}{2}}{N} \right)^2} \quad (9)$$

که M تعداد توابع پایه، d پارامتر حذف کننده، N تعداد مشاهدات، $f(x_i)$ مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل MARS است. مقدار GCV علاوه بر تعداد توابع پایه، تعداد گره‌ها را نیز تعیین می‌کند. در هر مرحله حذف، یک تابع پایه برای مینیمم کردن معادله ۸ حذف می‌گردد و این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که مدل کاملاً بهینه حاصل شود. مدل MARS یک روش تطبیقی است زیرا انتخاب توابع پایه و مکان گره‌ها براساس مجموعه داده و نوع مساله تعیین می‌گردد. پس از تعیین مدل بهینه MARS از روشی که به عنوان آنالیز تجزیه واریانس^۱ (ANOVA) شناخته می‌شود، برای تخمین میزان مشارکت هر یک از متغیرهای ورودی و توابع پایه می‌توان استفاده نمود [۱۲].

۳- مدل‌سازی

برای مدل کردن سواحل امواج فرائقلی، از مجموعه داده‌های استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) و سنچال و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است. پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده برای ایجاد مدل نهایی شامل پارامترهای مومنتوم، تشابه شکست و سرعت مشخصه هستند.

پارامتر تشابه شکست نشان‌دهنده اثر ارتفاع موج، پریود موج و شیب بستر است و یا به عبارتی نشان‌دهنده اثر اندرکنش بین موج و بستر است. این پارامتر برای مجموعه داده‌های استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\xi_{0p} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_{0p}}}} \quad (10)$$

که در آن، α شیب ساحل، H_0 ارتفاع موج در آب عمیق و L_{0p} طول موج آب عمیق بر حسب پریود مشخصه است.

2 Komar and Gaughan

3 Weggel

4 Intermediate beaches

1 Analysis Of Variance

براساس روش MARS با در نظر گرفتن سه پارامتر ورودی m ، \hat{u}_s و ξ ایجاد شده است. در جدول ۲، آنالیز تجزیه واریانس (ANOVA) مدل MARS ایجاد شده براساس سه پارامتر m ، \hat{u}_s و ξ را نشان می‌دهد. ستون اول جدول، شماره تابع را نشان می‌دهد. ستون دوم انحراف معیار استاندارد را نشان می‌دهد. انحراف معیار استاندارد می‌تواند نشان دهنده اهمیت نسبی تابع ورودی برای کل مدل باشد. رفتار این پارامتر در مدل می‌تواند مانند رفتار رگرسیون استاندارد شده در یک مدل خطی تفسیر گردد. ستون سوم پارامتر مهم دیگر یعنی GCV را نشان می‌دهد. این پارامتر جهت قضاوت میان میزان مشارکت این تابع در ساخت مدل و میزان کمک آن برای بهبود GCV کل مدل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ستون چهارم تعداد توابع پایه‌ای که شامل تابع ANOVA مربوطه هستند را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، توابع شامل پارامتر بی-بعد سرعت مشخصه از مقادیر GCV بیشتری در مقایسه با توابع شامل پارامتر مومنتوم و تشابه شکست برخوردار است و همچنین پارامتر مومنتوم در مقایسه با پارامتر تشابه شکست توابع بیشتری را در ساخت مدل نهایی در بر گرفته است. در شکل ۲ درصد میزان مشارکت نسبی هر یک از پارامترهای ورودی مدل برحسب GCV نشان داده شده است. پارامتر بی-بعد سرعت مشخصه با ۹۰/۴ درصد میزان مشارکت نسبی، پارامتر مومنتوم با ۴۹/۶ درصد میزان مشارکت نسبی و پارامتر تشابه شکست با ۱۵/۳۷ درصد میزان مشارکت نسبی به ترتیب دارای بیشترین مشارکت در ساخت مدل نهایی هستند.

در نهایت برای ارائه فرمولی جهت پیش‌بینی سواش فرائقلی از مدل $M5'$ مدل درختی استفاده شده است. مدل ایجاد شده تنها از یک رابطه تشکیل شده است. این رابطه در زیر ارائه شده است:

$$\frac{S_{ig}}{H} = 0.2609m^{0.4302}\hat{u}_s^{0.6563}\xi \quad (22)$$

که در آن S_{ig} ، سواش فرائقلی است. همانطور که در این رابطه مشاهده می‌شود، مدل $M5'$ از پارامتر تشابه شکست در مقابل دو پارامتر دیگر صرفنظر نموده است. علت این امر وجود ترم شیب ساحل در پارامتر تشابه شکست است زیرا در مطالعات انجام شده توسط استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) و گازا و تورنتون (۱۹۸۲) مشاهده شده است که حرکات سواش فرائقلی مستقل از شیب ساحل است. بنابراین نتایج حاصل از مدل‌های درختی مشابه کارهای قبلی از ترم شیب صرفنظر نموده است. همچنین در این رابطه پارامتر بی-بعد سرعت مشخصه از توان بالاتری نسبت به پارامتر مومنتوم برخوردار است، بنابراین دارای تاثیرگذاری بیشتری است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌های MARS و $M5'$ یکدیگر را و همچنین نتایج مطالعات قبلی را تصدیق می‌کنند.

در شکل‌های ۳ و ۴، مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده سواش فرائقلی نسبی توسط مدل‌های ساخته شده $M5'$ و MARS و مقادیر اندازه‌گیری شده سواش فرائقلی نشان داده شده است.

در این روابط، \hat{u}_s سرعت مشخصه بی‌بعد، g شتاب ثقل و L_0 طول آب موج عمیق براساس پریود پیک موج است. محدوده هر یک از پارامترهای ورودی و خروجی در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل درختی $M5'$ تنها روابط خطی بین پارامترهای ورودی و خروجی مدل را در نظر می‌گیرد. برای غلبه بر این محدودیت، مدل براساس لگاریتم پارامترهای ورودی و خروجی ایجاد شده است. مدل نهایی توه داده شده بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{S_{ig}}{H_{m0}} = a\xi^b\hat{u}_s^c m^d \quad (17)$$

که در آن a ، b ، c و d ضرایب ثابت هستند. از پارامترهای خطای آماری بایاس (Bias)، ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE)، شاخص پراکندگی (SI) و فاکتور همبستگی (R) برای ارزیابی دقت مدل‌های ایجاد شده، استفاده شده است.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (19)$$

$$SI(\%) = \frac{RMSE}{\bar{O}_m} \times 100 \quad (20)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)(P_i - \bar{P}_m)}{\left(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)^2\right)^{0.5} \left(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_m)^2\right)^{0.5}} \quad (21)$$

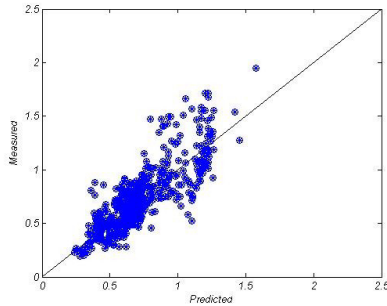
در این روابط O_i مقدار مشاهده شده، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، N تعداد مشاهدات، \bar{O}_m میانگین مقادیر مشاهده شده و \bar{P}_m میانگین مقادیر پیش‌بینی شده هستند.

جدول ۱: محدوده پارامترهای ورودی و خروجی مدل
Table 1. Range of the input and output model parameters

پارامتر	محدوده
m	۱/۱۲-۴/۴۳
\hat{u}_s	۰/۸-۵/۹
ξ	۰/۰۵-۲/۱۵
S_{ig}/H	۰/۲-۲/۴۹

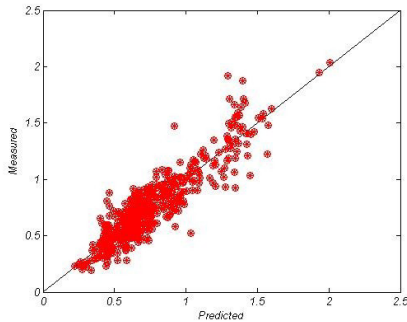
۴- نتایج و تفسیر مدل سازی

برای درک اولیه از نحوه تاثیرگذاری هر یک از این پارامترها، مدلی



شکل ۳: مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده سواش فراثقلی نسبی (S_{ig}/H) برای مدل $M5'$ ساخته شده براساس \hat{u}_s ، ξ و m

Fig. 3. Comparison between measured relative infra-gravity swash (S_{ig}/H) with the prediction of $M5'$ model, based on \hat{u}_s ، ξ and m



شکل ۴: مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده سواش فراثقلی نسبی (S_{ig}/H) برای مدل $MARS$ ساخته شده براساس \hat{u}_s ، ξ و m

Fig. 4. Comparison between measured relative infra-gravity swash (S_{ig}/H) with the prediction of $MARS$ model, based on \hat{u}_s ، ξ and m

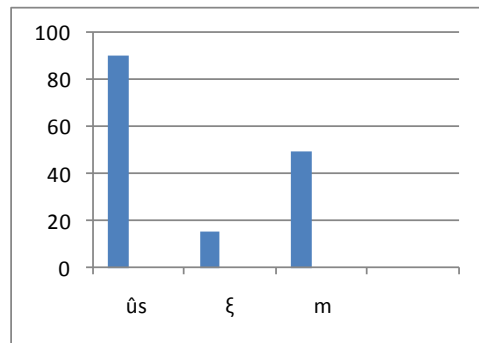
مدل $MARS$ ، مقدار $RMSE$ را به میزان ۴۲ درصد، همچنین مقدار SI را به میزان ۴۲ درصد و مقدار R را به میزان ۲۶ درصد نسبت به فرمول تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) بهبود بخشیده است. مقدار $RMSE$ و SI را به میزان ۱۶ درصد و مقدار R را به میزان ۱۲ درصد بهبود بخشیده است.

برای ارزیابی دقیق‌تر مدل $M5'$ آنالیز پارامتریک انجام شده است. آنالیز پارامتریک برای فهم این مساله که آیا مدل $M5'$ رابطه غیرخطی بین پارامترهای ورودی و خروجی را به درستی در نظر گرفته است، در واقع انجام می‌گیرد. در این آنالیز ابتدا یکی از پارامترهای ورودی را در محدوده بین مینیمم و ماکزیمم آن پارامتر در مجموعه داده مورد استفاده بتدریج تغییر داده در حالیکه پارامترهای ورودی دیگر ثابت هستند و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه داده شده محاسبه می‌گردد. سپس مقادیر پیش‌بینی

جدول ۲: آنالیز تجزیه واریانس (ANOVA) مدل $MARS$ ساخته شده براساس \hat{u}_s ، ξ و m

تابع	STD	GCV	basis	variable
۱	۳/۵۰۹	۲۱/۴۷۷	۲	m
۲	۳۴/۶۲۲	۲۰۹۹/۷۴۵	۳	\hat{u}_s
۳	۱۰/۹۴۳	۲۳۹/۱۲۵	۲	ξ
۴	۳۵/۴۸۳	۱۸۷۶/۲	۱۲	$m \hat{u}_s$
۵	۱۰/۳۵۴	۱۹۳/۰۲	۶	$m \xi$
۶	۴/۸۷۴	۳۷/۹۱۸	۳	$\hat{u}_s \xi$
۷	۱۳/۸۷۲	۲۵۶/۲۰۸	۲۰	$m \hat{u}_s \xi$

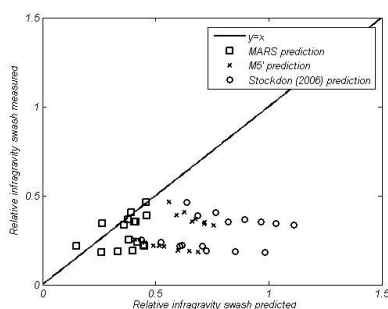
همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، پیش‌بینی مدل‌های $M5'$ و $MARS$ نسبت به فرمول تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) شکل ۱ دارای پراکندگی کمتری نسبت به خط بهینه است. همچنین در جدول ۳، نتایج مربوط به خطاهای آماری مدل‌های $MARS$ و $M5'$ ساخته شده براساس پارامترهای \hat{u}_s ، m و ξ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مدل ایجاد شده از لحاظ شاخص‌های آماری از دقت قابل قبول‌تری نسبت به فرمول تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) برخوردار است.



شکل ۲: درصد میزان مشارکت نسبی پارامترهای ورودی در ساخت مدل $MARS$ براساس \hat{u}_s ، m و ξ

Fig. 2. Relative importance of the input variables selected in $MARS$ model, based on \hat{u}_s ، ξ and m

در شکل ۶، مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده سواش فرائقلی نسبی بوسیله‌ی مدل‌های MARS، M5' و استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، مدل MARS از دقت قابل قبول‌تری نسبت به مدل‌های M5' و استاکدون و همکاران برخوردار است. مدل‌های M5' و استاکدون و همکاران سواش فرائقلی را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند. با این وجود، مدل M5' نسبت به مدل استاکدون و همکاران از دقت بالاتری برخوردار است. پیش‌بینی مدل M5' دارای بایاس ۰/۳۰ و جذر میانگین مربع خطاهای ۰/۳۲ است در حالیکه مدل استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) دارای بایاس ۰/۴۷ و جذر میانگین مربع خطاهای ۰/۵۱ است. در مقابل مدل MARS از دقت بسیار بالاتری نسبت به مدل M5' برخوردار بوده و دارای بایاسی برابر با ۰/۰۷ و جذر میانگین مربع خطا برابر ۰/۱۲ است. بنابراین دو مدل ایجاد شده براساس شاخص‌های آماری ذکر شده نسبت به فرمول تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶)، نتایج قابل قبول‌تری را ارائه می‌دهند.



شکل ۶: مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده سواش فرائقلی نسبی (S_{ig}/H) برای مجموعه داده‌های تست
Fig. 6. Comparison between measured with the predicted of relative infra-gravity swash (S_{ig}/H) for all data

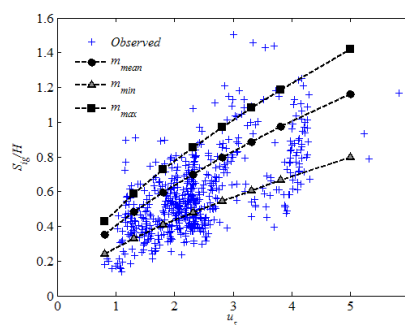
جدول ۳: شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های درختی ساخته شده و فرمول تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶)

Table 5. Statistical parameters of M5' models based Stockdon et al. formula (2006)

مدل	Bias	RMSE	SI (%)	R
MARS	-4×10^{-4}	۰/۱۲	۱۷/۵	۰/۹۰۸
M5'	$-۰/۰۱۹۳$	۰/۱۸	۲۵/۲	۰/۸۰۱
استاکدون و همکاران (۲۰۰۶)	$۹/۶ \times 10^{-4}$	۰/۲۲	۳۰/۳	۰/۷۱۵

شده توسط مدل برای مقادیر فرضی پارمتر ورودی بصورت تابعی از آن پارمتر رسم می‌شود. وابستگی و رفتار مدل توسعه داده شده به هر یک از پارامترهای ورودی باید با مقادیر میدانی مشاهده شده و همچنین فهم فیزیکی پدیده سازگار باشد.

در شکل ۵، سواش فرائقلی نسبی (S_{ig}/H) بصورت تابعی از پارامتر سرعت مشخصه برای مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر پارامتر فلاکس مومنتوم به همراه مقادیر میدانی اندازه‌گیری شده رسم شده است. همانطور مشاهده می‌گردد، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر مشاهداتی سازگار است. همچنین بر طبق این شکل سواش فرائقلی با افزایش پارامترهای فلاکس مومنتوم و بی‌بعد سرعت مشخصه افزایش پیدا می‌کند که این رفتارها نیز با فهم فیزیکی مساله سازگار است. از طرفی نتایج آنالیز پارامتری همچنین با نتایج آنالیز حساسیت انجام گرفته شده توسط روش MARS سازگار است. طبق شکل ۵، حساسیت سواش فرائقلی نسبی به تغییرات سرعت مشخصه بین مینیمم و ماکزیمم خود بیشتر از تغییرات پارامتر مومنتوم است.



شکل ۵: آنالیز پارامتریک مدل M5'
Fig. 5. Parametric analysis of infra-gravity swash in M5' model

۴-۱- تست مدل‌های درختی

در این بخش، مدل‌های درختی M5' و MARS ایجاد شده در بخش قبلی برای پیش‌بینی حرکت سواش فرائقلی بر روی سواحل تیزمین^۱ در مکزیک با چهار شیب مختلف ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۱۰ و ۰/۱۲ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برینکمپر^۲ و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه عددی را برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر بالاروی موج در سواحل یوکاتان مکزیک انجام دادند. آن‌ها با استفاده از ترکیب مدل‌های سوان^۳ و سواش^۴، اثرات تراز جزر و مدی و مورفولوژی را بر بالاروی موج مورد ارزیابی قرار دادند [۱۵] از نتایج این مطالعه، برای بررسی صحت مدل‌های ساخته شده استفاده شده است. محدوده هر یک از پارامترهای ورودی در جدول ۴ نشان داده شده است

- 1 Tizmin
- 2 Brinkkemper
- 3 SWAN
- 4 SWASH

- A.H., Sallenger, Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coast Engineering*, 53(7) (2006) 573-588.
- [2] B.G., Ruessink, M.G., Kleinbans, P.G.L., Van den Beukel, Observations of swash under highly dissipative conditions, *Geophysical Research*, 103 (C2) (1998) 3111-3118.
- [3] I.A., Hunt, Design of seawalls and breakwaters, *Waterways, Harbors, Coastal Engineering*, 85(3) (1959) 123-152.
- [4] R.T., Guza, E.B., Thornton, Swash oscillations on a natural beach, *Geophysical Research*, 87 (C1) (1982) 483-491.
- [5] Hughes, S.A., Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, *Coastal Engineering*, 51 (2004) 1085-1104.
- [6] N., Senechal, G., Coco, K.R., Bryan, R., Holman, Wave runup during extreme storm conditions, *Geophysical Research*, 116 (C7) (2011) 1-13.
- [7] Y., Wang, I.H., Witten, Inducing model trees for continuous classes, *Proceedings 9th European Conference on Machine Learning*, (1997) 128-137.
- [8] I.H., Witten, E., Frank, *Data mining-practical machine learning tools and techniques*, Morgan Kaufmann publisher (2005) 621.
- [9] J.R., Quinlan, Learning with continuous classes, *Proceeding 5th Australian joint Conference on Artificial Intelligence*, (1992) 343-348.
- [10] J.H., Friedman, Multivariate adaptive regression splines, *Annals Statistics*, 19(1) (1991) 1-141.
- [11] P.D., Komar, M.K., Gaughan, Airy Wave Theory and Breaker Height Prediction". *Proceeding 13th International Conference of Coastal Engineering, ASCE* (1973) 405-418.
- [12] J.R., Weggel, Maximum Breaker Height, *Waterways, Harbors, Coastal Engineering*, 98 (WW4) (1972) 529-548.
- [13] J.A., Brinkkemper, A., Torres-Freyermuth, E.T., Mendoza, B.G., Ruessink, Parameterization of wave run-up on beaches in Yucatan, Mexico: a numerical study, *Coastal Dynamics*, 25 (2013) 225-233.

جدول ۴: محدوده پارامترهای ورودی و خروجی مدل
Table 4. Range of the input and output parameters in both models

پارامتر	محدوده
m	۳/۳ - ۱/۹
\hat{u}_s	۲/۴ - ۱/۲
ξ	۱/۲۶ - ۰/۴
S_{ig}/H	۰/۴۶ - ۰/۱۸

۵- جمع بندی

در این مقاله، با استفاده از مدل‌های درختی M5' و MARS مدلی برای پیش‌بینی سواش فرائقلی بر روی سواحل طبیعی ارائه شد. برای مدل‌سازی از مجموعه داده‌های استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) و سنچال و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شد. پارامترهای هیدرودینامیکی مومنتوم، تشابه شکست و همچنین پارامتر جدیدی با عنوان سرعت مشخصه که بیانگر سرعت اوریبتای امواج است، به عنوان ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شدند. نتایج شاخص‌های خطای آماری نشان دادند که مدل MARS، مقدار RMSE را به میزان ۴۲ درصد، همچنین مقدار SI را به میزان ۴۲ درصد و مقدار R را به میزان ۲۶ درصد و مدل M5'، مقدار RMSE و SI را به میزان ۱۶ درصد و مقدار R را به میزان ۱۲ درصد نسبت به فرمول تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) بهبود بخشیدند.

در هر دو مدل پارامتر بی‌بعد سرعت مشخصه نسبت به دو پارامتر دیگر دارای تاثیر گذاری بیشتری بر روی سواش فرائقلی است. پارامتر تشابه شکست در هر دو مدل M5' و MARS، بدلیل حضور ترم شیب ساحل کمترین مشارکت را در ساخت مدل از خود نشان داد.

در نهایت با استفاده از نتایج مطالعه عددی برینکمپر و همکاران (۲۰۱۳)، صحت نتایج مدل‌های درختی و مدل تجربی استاکدون و همکاران (۲۰۰۶) با یکدیگر مقایسه شد. مدل MARS از دقت بسیار بالاتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار بود. مدل‌های M5' و استاکدون و همکاران، سواش فرائقلی را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی کردند، با این وجود مدل M5' دارای دقت بالاتری نسبت به استاکدون و همکاران بود.

مراجع

- [1] H.F., Stockdon, R.A., Holman, P.A., Howd, H., Asbury,

Please cite this article using:

A. Yeganeh-Bakhtiary, S.M. Hamze-Ziabari, Prediction of Infra-gravity Swash Motions on Natural Beaches using Model Treess, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 445-452.
DOI: 10.22060/ceej.2017.8712.4640

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

