

## تخمین پارامترهای نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های سکویی تحت تأثیر شرایط مختلف امواج

محمد رضا شکاری مهرآبادی<sup>۱</sup>، مهدی شفیعی‌فر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، پست الکترونیکی: shekari.2291@gmail.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، پست الکترونیکی: shafiee@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۹

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۱۴

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۳، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

### چکیده

وضعیت نیم‌رخ تغییرشکل یافته موج‌شکن‌های سکویی در فرآیند برخورد امواج نقش بسیار مهمی در پایداری این سازه‌ها دارد. در این تحقیق پارامترهای کلیدی نیم‌رخ تغییر شکل یافته از قبیل عمق پله در ناحیه ترسیب شده و عمق فرونشینی به عنوان فاصله عمودی نقطه تقاطع نیم‌رخ اولیه و تغییر شکل یافته از سطح ایستایی بررسی شده و روابطی جهت محاسبه آنها با در نظر گرفتن شرایط مختلف امواج و سازه ارائه شده است. در این راستا از نتایج آزمایشگاهی حدود ۱۸۵ آزمایش برای بررسی شرایط مختلف دریا از قبیل ارتفاع موج، پریود موج، عمق آب پای سازه، و شرایط مختلف سازه از قبیل ارتفاع سکو از سطح ایستایی با در نظر گرفتن قطرهای مختلف دانه‌بندی استفاده شده است. بررسی نشانگر آن است که روابط بدست آمده از تحقیق حاضر علاوه بر همبستگی مناسب با نتایج آزمایشگاهی، در مقایسه با روابط ارائه شده توسط PIANC نیز همبستگی مناسبی دارند. همچنین به منظور بررسی اعتبار روابط به دست آمده در این تحقیق، نتایج به دست آمده از فرمول حاضر و فرمول‌های ارائه شده توسط سایر محققین در برابر داده‌های آزمایشگاهی مقیم و همکاران نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند.

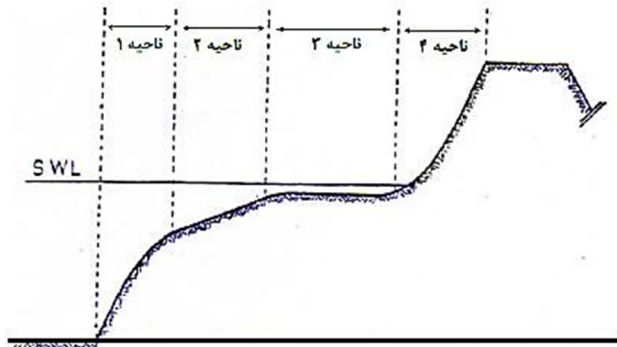
کلمات کلیدی: موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر، نیم‌رخ تغییر شکل یافته، عمق پله، عمق فرونشینی، مدل آزمایشگاهی.

### ۱. مقدمه

طرح و اجرا می‌شوند که اجازه بروز تغییرشکل در مقطع آنها وجود داشته باشد تا بدین وسیله بتوانند انرژی امواج را به خوبی مستهلک کرده و علاوه بر آن، نیم‌رخ برای سازه پدید بیاید که نیروهای هیدرودینامیکی وارده به سازه را کاهش دهد. نیم‌رخ این نوع موج‌شکن‌ها پس از برخورد امواج به صورت منحنی S در می‌آید که به نیم‌رخ تعادلی نیز معروف است (شکل ۱).

موج‌شکن‌های سکویی نوعی از موج‌شکن‌های توده‌سنگی هستند که در وجه جلویی آنها سکویی در نزدیکی سطح ایستایی آب قرار دارد، به طوری که این سکو پس از برخورد امواج دچار تغییر شکل می‌شود تا اینکه نیم‌رخ سمت دریا به حالت تعادل نسبی برسد. این نوع موج‌شکن‌ها به گونه‌ای

Moutzouris (1978) با انجام آزمایش‌هایی بر روی موج-شکن‌های شکل پذیر، نیمرخ‌های حاصله را به چهار ناحیه مجزا تفکیک نمود (شکل ۳). بر اساس نتایج تحقیقات وی در ناحیه (۱) تغییر شکل عمده‌ای ایجاد نمی‌شود.

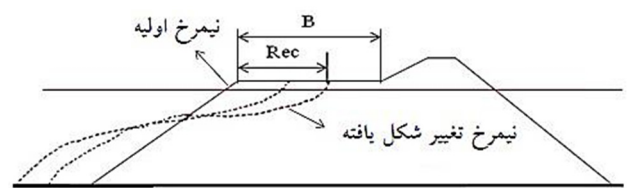


شکل ۳: نیمرخ پایدار پیشنهادی برای موج شکن توده‌سنگی (Moutzouris, 1964)

ناحیه (۲) با شیب کمتری آغاز شده و در واقع جایی است که شکست موج آغاز می‌شود. ناحیه (۳) به وسیله یک بخش افقی مستهلک می‌شود. بر اساس توضیحات وی در ناحیه اخیر یک لایه آب تشکیل می‌شود که موجب استهلاک فشارهای شوک حاصل از امواج شکن می‌شود. ناحیه (۴) در بالای سطح ایستابی و با شیب تند به وجود آمده که موجب کاهش بالاروی موج می‌شود.

Lamberti و همکاران (۱۹۹۴) با برپایی مدل آزمایشگاهی در شرایط موج آب کم عمق و آب عمیق، به بررسی تأثیر عمق آب بر روی تغییر شکل نیمرخ موج شکن‌های سکویی شکل پذیر پرداختند. نتایج کار این محققین نشان داد که رفتار موج شکن‌های شکل پذیر سکویی در شرایط موج آب کم عمق و آب عمیق متفاوت است. همچنین در شرایط آب کم عمق، شکست موج باعث کاهش ارتفاع موج و کاهش ابعاد نیمرخ تغییر شکل یافته در مقایسه با یک موج شکن با همان شرایط موج در آب عمیق می‌گردد.

Van der Meer (1988) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی روابطی برای تخمین هندسه تغییر شکل یافته موج شکن‌های شکل پذیر استخراج کرد و بر اساس این روابط نرم افزاری به نام BREAKWAT ارائه نمود. او در روابط ذکر شده از پارامتر عدد پایداری  $(H_0 T_0)$ ، پارامتر سطح آسیب  $(S)$ ، شیب وجه جلویی سازه و نفوذپذیری استفاده نمود.



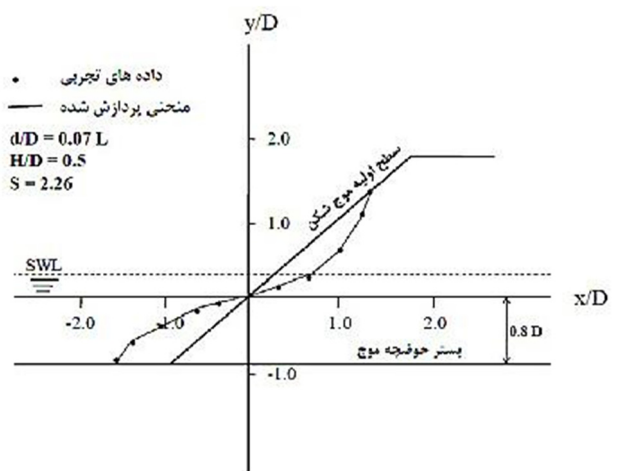
شکل ۱: نیمرخ اولیه و تغییر شکل یافته موج شکن سکویی شکل پذیر

تاکنون در زمینه پایداری هیدرولیکی لایه آرمور به سمت دریای موج شکن‌های سکویی تحقیقات زیادی انجام گرفته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که می‌توان تغییرات نیمرخ تعادلی را تا حد زیادی با توجه به شرایط دریا و خواص مصالح پیش‌بینی کرد. مهمترین مزیت این نوع موج شکن‌ها آن است که می‌توان از مصالح سبک تر با دانه بندی گسترده تر نسبت به موج-شکن‌های مرسوم استفاده نمود، به طوری که امکان طراحی سازه بر اساس خروجی واقعی سنگ معدن به جای تعیین دانه بندی خاص برای سنگ آرمور فراهم می‌شود (Andersen, 2009).

Priest و همکاران (۱۹۶۴) با استفاده از مدل سازی فیزیکی، پایداری نیمرخ تغییر یافته موج شکن‌های ساخته شده از سنگ‌های آرمور و مکعب‌های بتنی را در اثر برخورد امواج بررسی و رابطه زیر را استخراج نمودند (شکل ۲):

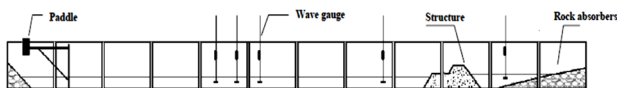
$$\frac{Y}{D} = m \left( \frac{X}{D} \right)^n \quad (1)$$

در این معادله  $X$  بعد افقی،  $Y$  بعد عمودی،  $D$  عمق آب ساکن و  $m$  و  $n$  به عنوان ضرایبی هستند که تابعی از قطر مصالح و چگالی نسبی مصالح هستند.



شکل ۲: نیمرخ پایدار برای مکعب‌های بتنی (Priest, 1964)

شده است. فلوم موجود در آزمایشگاه دارای طول ۱۶ متر و عمق و عرضی برابر با ۱ متر است که دستگاه موج ساز آن قابلیت تولید امواج منظم و نامنظم تحت طیف‌های مختلف را دارا است. تولید موج در این فلوم به صورت نامنظم با طیف انرژی JONSWAP که ضریب ۷ در آن برابر با ۳/۳ است انجام شده است. نمایی از فلوم در شکل ۴ نشان داده شده است. جهت برداشت تغییرات سطح آب در طول فلوم از ۴ حسگر استفاده شده است.



شکل ۴: نمایی از فلوم آزمایشگاه

چینش حسگرها بر اساس الگوی پیشنهادی Mansard و Funke (۱۹۸۰) است. در تمامی آزمایش‌ها، برداشت نیم‌رخ سازه در سمت پارو، قبل از شروع آزمایش و بعد از اصابت امواج توسط یک پوینت گیج که در بالای فلوم مستقر است انجام شده است. در انتخاب مقاطع برداشت نیم‌رخ فاصله مجاز تا دیواره فلوم حفظ شده است تا از اثرات دیواره بر نتایج آزمایش‌ها کاسته شود. بدین‌منظور سه مقطع جداگانه انتخاب شد که مقطع میانی در وسط فلوم و دو مقطع کناری در طرفین مقطع میانی و به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از آن هستند. موج‌شکن سکویی شکل‌پذیر مورد مطالعه در آزمایشگاه از سه لایه آرمور، فیلتر و هسته تشکیل شده است.

مشخصات مصالح تشکیل دهنده لایه‌های مختلف موج‌شکن سکویی از جمله قطر اسمی، وزن، چگالی و ضریب منحنی دانه-بندی سنگدانه‌ها در جدول ۱ آمده است. جهت تهیه مصالح مورد نیاز برای ساخت مدل موج‌شکن، ابتدا محدوده دانه‌بندی مصالح لایه آرمور، لایه فیلتر و هسته بر اساس توصیه‌های موجود در (CEM 2008) مشخص گردیده و سپس برای تهیه مصالح، حجم مصالح مورد نیاز محاسبه گردید. برای لایه آرمور و فیلتر از سنگ‌های نوع رسوبی و برای هسته از ماسه شسته شده استفاده شد.

برای لایه آرمور از سه نوع دانه‌بندی استفاده شده است و برای تعیین محدوده دانه‌بندی که هم عرض منحنی دانه‌بندی و هم قطر اسمی سنگ در آن رعایت شود از الگوی خطی دانه‌بندی Van der Meer (1988) به صورت زیر استفاده شده است:

$$W_y = W_{50} \times \left( \frac{W_{85}}{W_{15}} \right)^{\left[ \frac{y-0.5}{0.7} \right]} \quad (3)$$

(Sayao 2000) با انجام یک سری آزمایش‌های مدل فیزیکی، نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن شکل پذیر را تحلیل نمود. او نشان داد که میزان فرسایش سکو بسیار متأثر از پارامتر تشابه شکست است.

(PIANC 2003) بر اساس نتایج تحقیقات (Tørum 1998) رابطه‌ای به شکل زیر جهت تخمین عمق فرونشینی نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر ارائه کرد. بر اساس این رابطه عمق فرونشینی تنها تابعی از عمق آب پای سازه و قطر مشخصه سنگدانه‌ها است.

$$\frac{h_f}{D_{n50}} = 0.2 \left( \frac{d}{D_{n50}} \right) + 0.5 \quad 12.5 < \frac{d}{D_{n50}} < 25 \quad (2)$$

عزآباد و همکاران (۱۳۸۴) وضعیت نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های شکل‌پذیر با مقطع دوزنقه‌ای را در اثر برخورد امواج در طول زمان مورد بررسی قرار دادند. در تحقیقات آنها تاثیر کلیه پارامترها از جمله ضریب دانه‌بندی، عامل عمق، ضریب نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامتر سطح آسیب به عنوان معیار اصلی فرسایش مورد توجه بوده و شرایط امواج برخوردی، هندسه اولیه و نیز تعداد امواج برخوردی که شاخص‌های اصلی شکل‌پذیری می‌باشد نیز بررسی شده‌اند. در نهایت باتوجه به پارامترهای موثر در تخمین نیم‌رخ تغییر شکل یافته نهایی موج‌شکن شکل‌پذیر و با استفاده از تحلیل‌های آماری مختلف، نرم افزاری به نام IB در این راه توسعه داده شده است که به کمک آن می‌توان نیم‌رخ تغییر شکل یافته سازه را تخمین زد.

مروری بر نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که روابط مناسبی جهت تخمین پارامترهای کلیدی نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های سکویی ارائه نشده است و بررسی در این زمینه ضرورت دارد. هدف از انجام تحقیق حاضر مطالعه پارامتری نیم‌رخ تغییر شکل یافته این نوع سازه‌ها با در نظر گرفتن شرایط مختلف دریا از قبیل ارتفاع موج، پرپود موج، عمق آب پای سازه، و شرایط مختلف سازه از قبیل ارتفاع سکو از سطح ایستابی با در نظر گرفتن قطرهای مختلف دانه بندی است.

## ۲. برپایی مدل آزمایشگاهی و محدوده تغییرات پارامترها

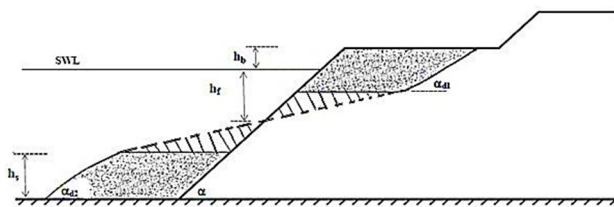
به‌منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان فرسایش، آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام

### ۳. تخمین پارامترهای نیم‌رخ‌های تغییر شکل

در این بخش بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی در خصوص نیم‌رخ‌های تغییر شکل یافته، عمق آب پای سازه، عرض سکو و ارتفاع آن از سطح ایستابی با در نظر گرفتن دانه‌بندی‌های مختلف آرمور، روابطی جهت تخمین پارامترهای نیم‌رخ تغییر شکل یافته و عرض فرسایش یافته سکو استخراج می‌شود.

#### ۳-۱. خصوصیات نیم‌رخ تغییر شکل یافته رو به دریا

عموماً نیم‌رخ تغییر شکل یافته بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی دارای خصوصیات زیر است (Andersen, 2009) (شکل ۶):



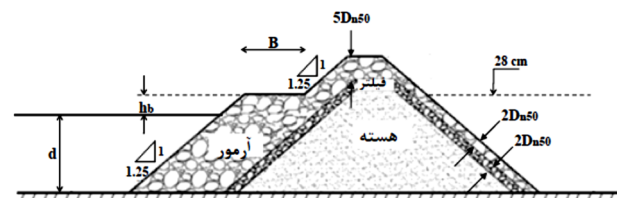
شکل ۶: نیم‌رخ تغییر شکل یافته رو به دریا

- در طول نیم‌رخ تغییر شکل یافته و زیر سطح ایستابی نهشته‌ای از مصالح تشکیل می‌شود که پله‌ای شکل است. شیب مصالح در این ناحیه ( $\alpha_{d2}$ ) به شیب طبیعی قرارگیری مصالح نزدیک است. فاصله عمودی این ناحیه از کف، عمق پله ترسیب شده نامیده می‌شود ( $h_s$ ).
- بالای تراز پله یک ناحیه منحنی شکل ایجاد می‌شود که شیب آن به سمت بالا تندتر می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهند که تغییرات نیم‌رخ در این ناحیه به صورت نمایی است. نیم‌رخ تغییر شکل یافته در نقطه‌ای زیر سطح ایستابی نیم‌رخ اولیه را قطع می‌نماید. به فاصله عمودی این نقطه از سطح آزاد آب، عمق فرونشینی گفته می‌شود ( $h_r$ ).
- بالای ناحیه منحنی شکل نقطه‌ای وجود دارد که شیب ناحیه بالای آن تا تراز سکو ( $\alpha_{d1}$ )، به شیب طبیعی قرارگیری مصالح نزدیک است.
- جهت تخمین مقادیر  $\alpha_{d1}$  و  $\alpha_{d2}$  در نیم‌رخ تغییر شکل یافته شکل ۷ نشان داده شده است. آنچه از شکل پیداست، مقادیر نشان داده شده برای هر دو ناحیه تقریباً یکسان هستند. آنچه

جدول ۱: مشخصات مصالح موج شکن مورد مطالعه

پارامترهای سازه‌ای سنگدانه‌ها	نماد	لایه آرمور ۱	لایه آرمور ۲	لایه آرمور ۳	لایه فیلتر	لایه هسته
قطر اسمی سنگدانه	$D_{n50}$ (m)	۰/۰۱۷	۰/۰۲۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳
وزن مصالح	$W_{n50}$ (kg)	۰/۰۱۴	۰/۰۲۵	۰/۰۴۲	۰/۰۰۱۴	-
عرض منحنی دانه‌بندی	$f_g = D_{n85} / D_{n15}$	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۳۲	ماسه شسته شده
چگالی مصالح	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۰۰	۲۷۵۰	۲۷۷۰	۲۸۰۰	۱۸۰۰

شمایی از مقطع سازه در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس توصیه‌های موجود، ضخامت لایه‌های فیلتر و هسته به میزان  $2D_{n50}$  در وجه جلویی و پشتی سازه برای هر سه لایه آرمور انتخاب گردید. آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر برای بررسی اثر پارامترهای ارتفاع موج، پرپود موج و تعداد امواج بر سازه‌های مختلف انجام شده است.



شکل ۵: مقطع مدل موج‌شکن سکویی در آزمایشگاه

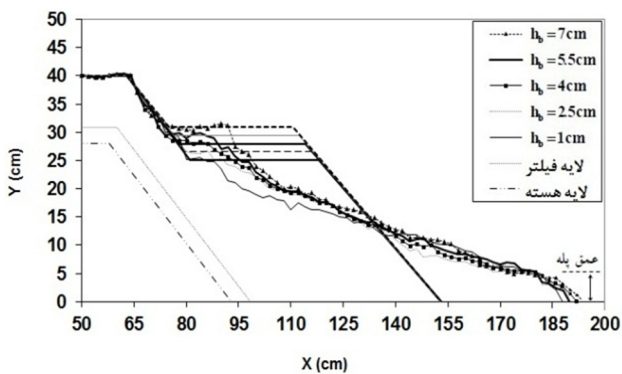
در جداول ۲ و ۳ محدوده تغییرات پارامترهای با بعد و بی‌بعد تحقیق حاضر ارائه شده است. از آنجایی که مدل‌سازی بر اساس عدد فرود صورت گرفته است، به منظور کاهش اثرات ناشی مدل‌سازی و لزجت، عدد رینولدز باید در محدوده  $10^4 < Re < 10^5$  قرار داشته باشد تا از اثرات نیروی لزجت صرف‌نظر شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، حداقل مقدار مذکور  $10^4 \times 1/14$  به دست آمده است که در محدوده مجاز توصیه شده قرار دارد.

جدول ۲: محدوده تغییرات پارامترهای امواج و سازه‌ها

پارامتر	نماد	محدود تغییرات
ارتفاع موج	$H_S$	۴/۵ تا ۱۲ سانتیمتر
پرپود موج	$T_p$	۱ تا ۱/۵۴ ثانیه
عمق آب پای سازه	$d$	۲۰ تا ۲۸ سانتیمتر
ارتفاع سکو از سطح ایستابی	$h_b$	۱ تا ۷ سانتیمتر
عرض اولیه سکوی	$B$	۴۰ سانتیمتر
تعداد امواج برخوردی	$N$	موج ۳۰۰۰

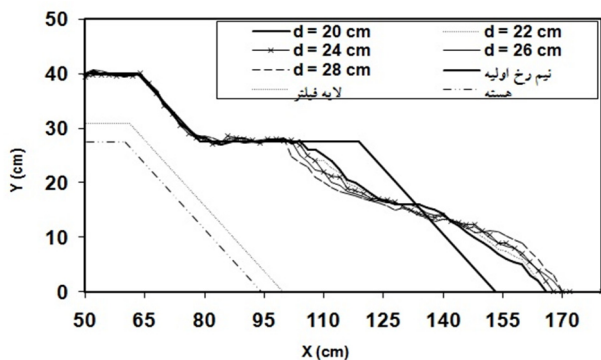
جدول ۳: محدوده تغییرات پارامترهای بی‌بعد

پارامتر	محدود تغییرات
$H_0$	۱/۵۷ تا ۳/۸۶
$H_0 T_0$	۹ تا ۱۴۳/۹
تیزی موج $S_{om}$	۰/۰۱ تا ۰/۰۷۵

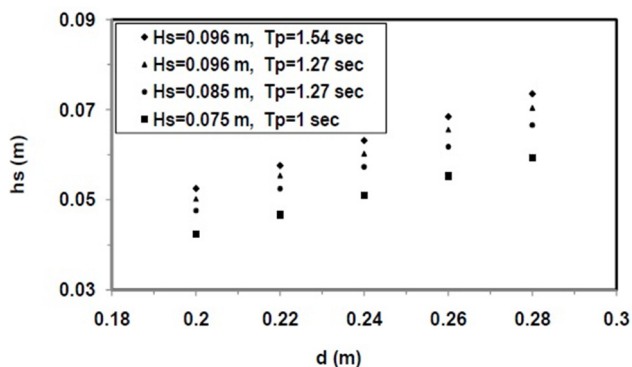


شکل ۸: نیم‌رخ‌های تغییر شکل‌یافته تحت اثر ارتفاع امواج (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۲۵ متر، ارتفاع امواج ۱۰/۵۵ سانتی‌متر و پرپود اوجی ۱/۵۴ ثانیه)

جهت بررسی عمق آب پای سازه بر نیم‌رخ تغییر شکل‌یافته و میزان فرسایش، آزمایش‌های مختلفی انجام شده که نتایج آن در شکل ۹ برای پنج عمق مختلف نشان داده شده است. مقایسه نیم‌رخ‌ها نشان می‌دهد، با افزایش عمق آب مقدار عمق پله نیز افزایش می‌یابد. جهت بررسی تأثیر عمق آب پای سازه بر عمق پله با دانه‌بندی‌های مختلف، شکل ۱۰ برای چهار ترکیب موج متفاوت نشان داده شده است.

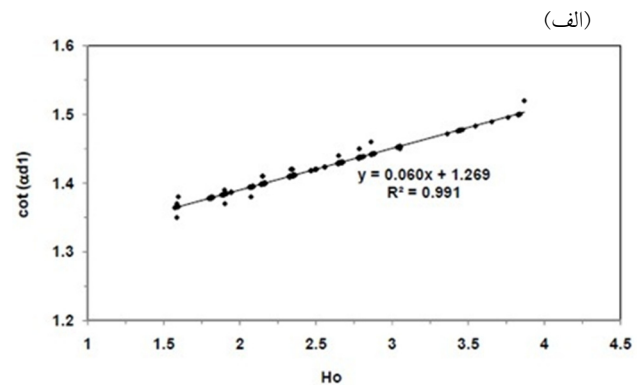


شکل ۹: مقایسه نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر عمق آب (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۲۱ متر، ارتفاع امواج ۷/۴۵ سانتی‌متر و پرپود اوجی ۱/۲۷ ثانیه و عرض سکو ۴۰ سانتی‌متر)

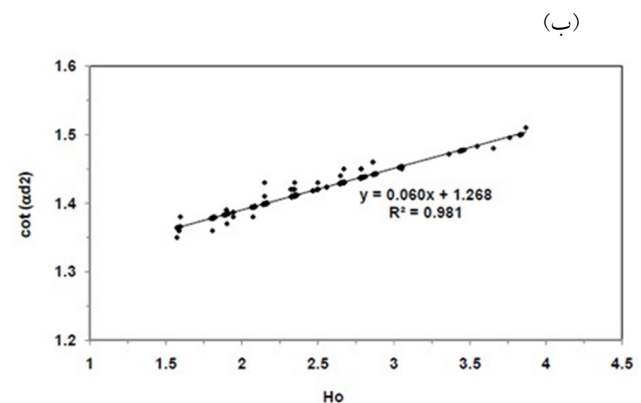


شکل ۱۰: نمودار تغییرات ارتفاع پله بر حسب عمق آب (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۲۵ متر، عرض سکو ۴۰ سانتی‌متر)

از شکل پیداست عدد پایداری پارامتر موثری در شکل‌گیری نواحی بالا و پایین نیم‌رخ تغییر شکل یافته است، به طوری که با افزایش ارتفاع امواج برخوردی و کاهش قطر مشخصه سنگدانه‌ها شیب این نواحی کمتر می‌شود.



(الف)



(ب)

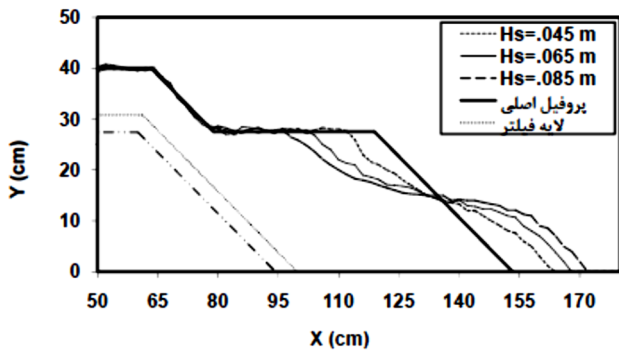
شکل ۷: شیب نیم‌رخ فرسایش یافته برای شرایط مختلف عدد پایداری (الف) شیب ناحیه بالایی نیم‌رخ (ب) شیب ناحیه پایینی نیم‌رخ

بنابراین برای تخمین شیب در این دو ناحیه ( $\alpha_{d1}$  و  $\alpha_{d2}$ ) می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

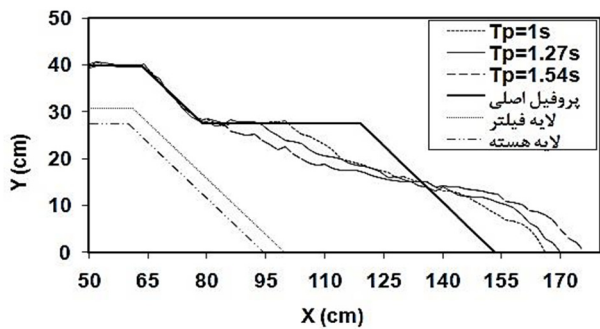
$$\cot(\alpha_d) = 1.27 + 0.06H_0 \quad (4)$$

### ۲-۳. تخمین عمق پله

به منظور تخمین عمق پله در نیم‌رخ تغییر شکل یافته، پارامترهای هیدرولیکی و سازه‌ای مؤثر بر این پارامتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۸ نیم‌رخ‌های تغییر شکل یافته موج شکن برای پنج تراز سکوی متفاوت (۱، ۲/۵، ۴، ۵/۵ و ۷ سانتی‌متر) را نشان می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهند که تغییرات ارتفاع سکو از سطح ایستایی تأثیر چندانی بر عمق پله ترسیب شده ندارند.

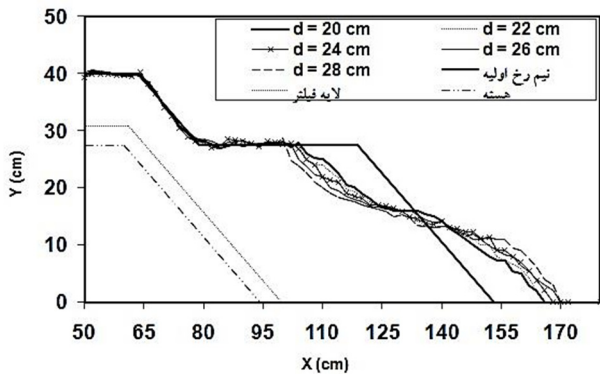


شکل ۱۲ الف: نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر ارتفاع امواج (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۱۷ متر، پریود اوجی موج ۱/۵۴ ثانیه و عرض سکو ۴۰ سانتی‌متر)



شکل ۱۲ ب: نیم‌رخ تغییر شکل یافته تحت اثر پریود امواج (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۲۱ متر و ارتفاع موج ۹/۶۵ سانتی‌متر)

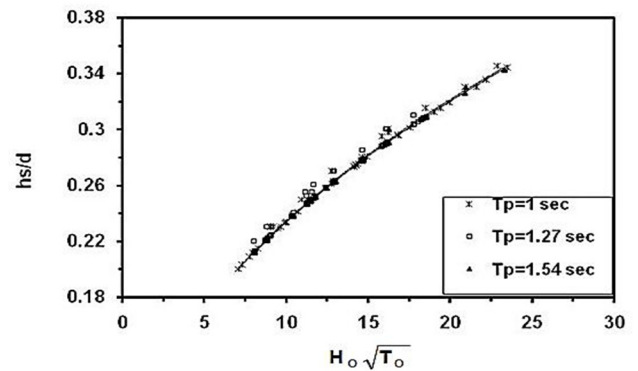
شکل (۱۳ الف) نیم‌رخ‌های تغییر شکل یافته برای عمق‌های مختلف آب و شرایط امواج برخوردی یکسان را نشان می‌دهد. آنچه مشخص است در یک قطر مشخصه از سنگدانه‌ها، با افزایش عمق آب مقدار عمق فرونشینی مصالح نیز افزایش می‌یابد. شکل (۱۳ ب) تأثیر ارتفاع سکو از سطح ایستایی را بر عمق فرونشینی نشان می‌دهد. نیم‌رخ‌های ترسیم شده نشان می‌دهد، با افزایش تراز سکو نقطه تقاطع به سمت بالا جابجا شده و عمق فرونشینی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ الف: اثر عمق آب پای سازه بر عمق فرونشینی (قطر سنگدانه‌ها ۰/۰۲۵ متر، ارتفاع امواج ۸/۵۵ سانتی‌متر و پریود اوجی ۱/۲۷ ثانیه)

آنچه مشخص است با افزایش عمق آب در یک ارتفاع و پریود ثابت موج، تکانه و نیروی موج برخوردی به سازه افزایش یافته و مقدار رسوب‌گذاری و ارتفاع پله افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ تأثیر پارامتر ارتفاع پله بدون بعد شده  $(hs/d)$  را بر پارامتر بدون بعد  $(H_0\sqrt{T_0})$  در ترکیب‌های مختلف ارتفاع و پریود موج نشان می‌دهد. افزایش مقدار پارامتر  $(hs/d)$ ، افزایش  $H_0\sqrt{T_0}$  را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر عمق آب بر ارتفاع پله، توابع مختلفی توسط نرم افزار CurveExpert مورد بررسی قرار گرفتند و از بین آنها فرم معادله توانی به شکل زیر در نظر گرفته شد:

$$h_s = 0.083 \cdot d \cdot (H_0\sqrt{T_0})^{0.45} \quad (5)$$



شکل ۱۱: نمودار تغییرات ارتفاع پله بدون بعد شده بر حسب پارامتر بدون بعد  $H_0\sqrt{T_0}$

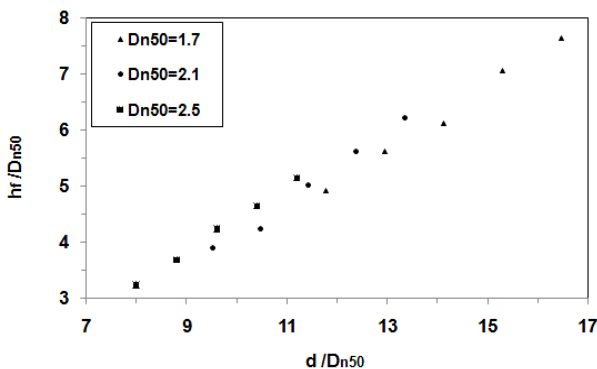
### ۳-۳. تخمین عمق فرونشینی

به‌منظور تخمین عمق فرونشینی به عنوان فاصله عمودی نقطه تقاطع نیم‌رخ اولیه و تغییر شکل یافته تا سطح آزاد آب، در سازه با دانه‌بندی‌های مختلف آزمایش‌های متعددی انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که تأثیر ارتفاع و پریود امواج در جابه‌جایی عمق فرونشینی تقریباً ناچیز است. شکل (۱۲ الف) نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن سکویی برای سه ارتفاع موج متفاوت با پریود موج یکسان را نشان می‌دهد. با توجه به نیم‌رخ‌های ترسیم شده مشاهده می‌شود که تأثیر ارتفاع امواج در جابه‌جایی نقطه تقاطع ناچیز است.

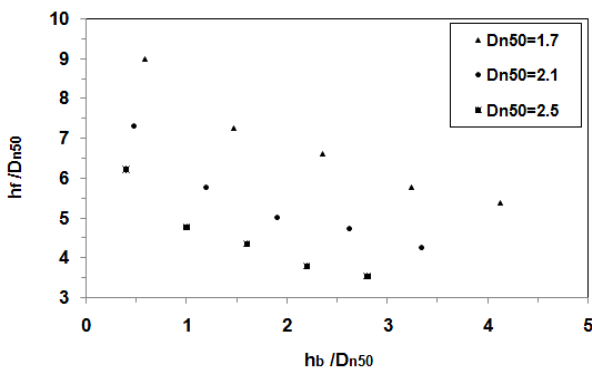
شکل (۱۲ ب) نیز نیم‌رخ تغییر شکل یافته برای امواج با سه پریود مختلف و ارتفاع یکسان را نشان می‌دهد. آنچه از نمودارهای ترسیم شده مشاهده می‌گردد، تأثیر پریود امواج در جابه‌جایی نقطه تقاطع قابل اغماض است.



$$\frac{h_f}{D_{n50}} = e \left( \frac{d}{D_{n50}} \right)^k \cdot \left( \frac{h_b}{D_{n50}} \right)^b \quad (۸)$$



شکل ۱۴ الف: تأثیر  $d/D_{n50}$  بر  $h_f/D_{n50}$

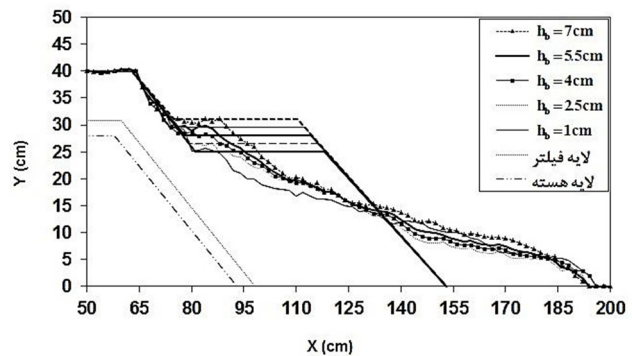


شکل ۱۴ ب: تأثیر  $h_b/D_{n50}$  بر  $h_f/D_{n50}$

با استفاده از نرم افزار اخیر و مقادیر داده‌های آزمایشگاهی حاضر مطابق جدول ۴، مقادیر  $k$  و  $b$  برای شرایط مختلف موج به دست آمده‌اند. به دلیل آنکه روند تغییرات عمق فرونشینی در برابر تغییرات عمق آب و ارتفاع سکو روند مشابهی داشته و ضرایب  $k$  و  $b$  تقریباً مقدار یکسانی را نشان می‌دهند، لذا مقدار این ضرایب برای کلیه شرایط امواج ثابت بوده ولی مقداری پراکندگی در آن‌ها مشاهده می‌شود. برای لحاظ نمودن مقدار ثابت برای این ضرایب از میانگین آنها استفاده نموده و به ترتیب مقداری در حدود  $۱/۳۷$  و  $-۰/۲۷$  برای آنها در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴: ضرایب  $k$  و  $b$

$k$	$b$	$D_{n50}$
$-۰/۲۷$	$۱/۳۷$	$۱/۷$
$-۰/۳۰$	$۱/۳۸$	$۲/۱$
$-۰/۲۹$	$۱/۴۰$	$۲/۵$



شکل ۱۳ ب: اثر ارتفاع سکو از سطح ایستایی بر عمق فرونشینی (قطر سنگدانه‌ها  $۰/۰۲۱$  متر، ارتفاع امواج  $۹/۶۵$  سانتی‌متر و پریرود اوجی  $۱/۵۴$  ثانیه)

شکل (۱۴ الف) تأثیر عمق آب بدون بعد ( $d/D_{n50}$ ) بر عمق فرونشینی بدون بعد شده ( $h_f/D_{n50}$ ) در شرایط مختلف سازه را نشان می‌دهد. افزایش مقدار  $d/D_{n50}$  مقدار  $h_f/D_{n50}$  را نشان می‌دهد. در واقع با افزایش عمق آب مقدار انرژی موج رسیده به پای سازه افزایش یافته و حجم ناحیه فرسایش یافته و به دنبال آن عمق فرونشینی بیشتر می‌شود. به منظور بررسی تأثیر عمق آب بر عمق فرونشینی، فرم معادله توانی به شکل زیر توسط نرم افزار CurveExpert در نظر گرفته شد:

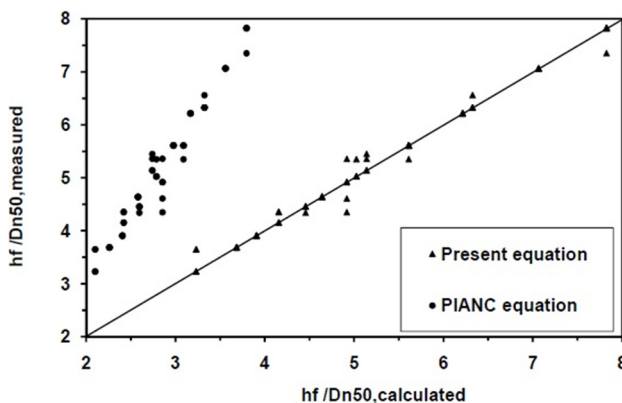
$$\frac{h_f}{D_{n50}} = a \left( \frac{d}{D_{n50}} \right)^k \quad (۶)$$

شکل ۱۴ ب تأثیر پارامتر ارتفاع سکو از سطح ایستایی بی بعد شده ( $h_b/D_{n50}$ ) نسبت به عمق فرونشینی بدون بعد شده ( $h_f/D_{n50}$ ) در قطر مشخصه سنگدانه‌های مختلف نشان می‌دهد. در واقع با افزایش ارتفاع سکو حجم سنگ‌های قرار گرفته در ناحیه سکو افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث کاهش نیروهای وارده به سازه و فرسایش می‌شود. به دنبال کاهش فرسایش نیز عمق فرونشینی کاهش می‌یابد. جهت بررسی تأثیر عمق آب بر عمق فرونشینی، فرم معادله توانی به شکل زیر در نظر گرفته شد:

$$\frac{h_f}{D_{n50}} = c \left( \frac{h_b}{D_{n50}} \right)^b \quad (۷)$$

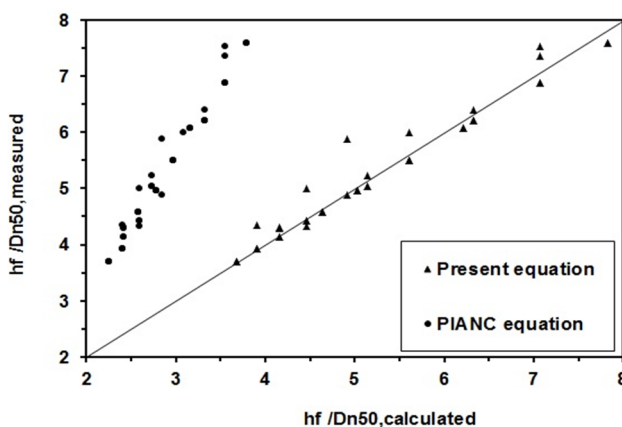
برای به دست آوردن رابطه‌ای مناسب جهت تخمین عمق فرونشینی، از نتایج روابط ۶ و ۷ استفاده نموده و رابطه زیر را به صورت حاصل ضرب توابع قسمت قبلی در نظر گرفته می‌شود:

داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است که در آنها عمق آب و ارتفاع سکو تغییر داده شده‌اند.



شکل ۱۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی برای داده‌های آزمایشگاهی حاضر

به منظور بررسی اعتبار رابطه به دست آمده در این تحقیق، نتایج به دست آمده از فرمول حاضر و فرمول ارائه شده توسط PIANC (2003) در برابر داده‌های آزمایشگاهی مقیم (۱۳۸۸) مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل ۱۷ مقایسه‌ای از نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از روابط مختلف در خصوص تخمین عمق فرونشینی به صورت بی بعد، برای نتایج آزمایشگاهی مقیم و همکاران (۱۳۸۸) نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست مقادیر به دست آمده از تحقیق حاضر نسبت به PIANC مناسب‌تر است.

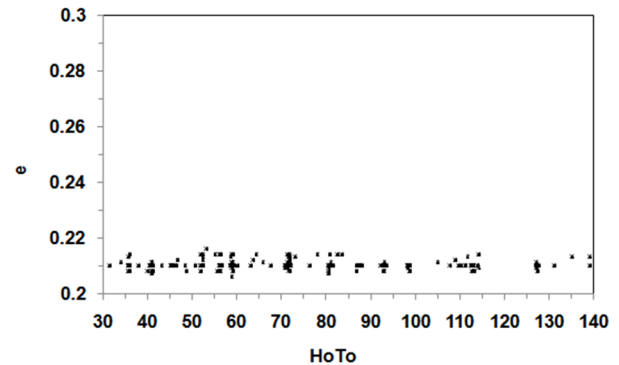


شکل ۱۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی برای داده‌های آزمایشگاهی مقیم و همکاران (۱۳۸۸)

#### ۴. نتیجه‌گیری

تحقیق آزمایشگاهی حاضر با هدف بررسی پارامترهای نیم‌رخ تغییر شکل یافته موج‌شکن‌های سکویی تحت تأثیر شرایط مختلف

به منظور استخراج ضریب  $e$  نمودار شکل ۱۵ رسم شده است. آنچه مشخص است مقادیر این ضریب برای شرایط مختلف محیطی و سازه‌ای مستقل از عدد پایداری است. بنابراین می‌توان از میانگین ضرایب که در حدود ۰/۲۱ است استفاده نمود.



شکل ۱۵: ضریب  $e$  برای اعداد پایداری مختلف

بنابراین رابطه ۹ برای تخمین عمق فرونشینی با توجه به شرایط مختلف محیطی موج و سازه به دست می‌آید.

$$\frac{h_f}{D_{n50}} = 0.21 \left( \frac{d}{D_{n50}} \right)^{38} \cdot \left( \frac{h_b}{D_{n50}} \right)^{0.29} \quad (9)$$

استفاده از روابط بالا دارای محدودیت‌های آزمایشگاهی زیر است:

$$\begin{cases} 7.1 < H_0 \sqrt{T_0} < 21.2 \\ 0.4 < \frac{h_b}{D_{n50}} < 4.11 \\ 8 < \frac{d}{D_{n50}} < 16.47 \end{cases} \quad (10)$$

در صورتی که موج‌شکن‌های سکویی موجود در طبیعت محدودیت‌های فوق را اکتفا کنند و عدد رینولدز قطعات آرمور آنها از  $1/14 \times 10^4$  کمتر نباشد، می‌توان از روابط تحقیق حاضر جهت تخمین نیم‌رخ تغییر شکل یافته آنها استفاده نمود.

#### ۳-۴. ارزیابی رابطه تخمین عمق فرونشینی بدست آمده با نتایج سایرین

نتایج عمق ته‌نشینی بدون بعد اندازه‌گیری شده بر حسب مقادیر عمق ته‌نشینی بدون بعد تخمین زده شده از رابطه ۹ و PIANC (2003) برای تمام داده‌های آزمایشگاهی حاضر در شکل ۱۶ نشان داده شده است که نشانگر مناسب بودن رابطه اخیر برای تخمین میزان فرسایش است. لازم به ذکر است فقط از آن دسته از



- Lykke Andersen, T.; Burcharth, HF, 2009. A new formula for front slope recession of berm breakwaters. *Coastal Engineering*, 57: 359-74.
- Priest, M.S.; Pugh, J.E.; Singh., R., 1964. Seaward profile for rubble mound breakwaters. 7th International Conference on Coastal Engineering, Lisbon, 9: 553-559.
- Moutzoris, C., 1978. A profile of a sloping breakwater based on recent results concerning wave propagation and breaking. 7th International Harbour Congress. 2.4/1-2.4/7, Antwerp.
- Lamberti, A.; Tomasicchio, G.R.; Guiducci, F., 1994. Reshaping breakwaters in deep and shallow water conditions. Proceeding of the 24th International Conference on Coastal Engineering. Kobe. Japan. ASCE, 24: 1343 -1358.
- Van der Meer, J.W., 1988. Rock slopes and gravel beaches under wave attack. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Also: Delft Hydraulics Communication No. 396.
- Sayao, O.J., 2000. On the profile reshaping of berm breakwaters. *Coastal Structures* 99, Losada (ed.) Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- PIANC Mar Com WG40, 2003. State of the art of the design and construction of berm breakwaters PIANC, Brussels.
- Tørum, A., 1998. On the stability of berm breakwaters in shallow and deep water. Proceeding of the 26th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen, Denmark, ASCE, 1435-1448.
- Mansard, E.P.D.; Funke, E.R., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. Proceeding of the 17th Coastal Engineering Conference of Sydney, Australia, 154-172.

امواج نامنظم با استفاده از روش مدل آزمایشگاهی دو بعدی در فلوم موج، با در نظر گرفتن دانه‌بندی‌های مختلف آرمور انجام شده است. نتایج این بررسی‌ها را می‌توان به صورت زیر شرح داد:

۱- روابط مناسبی با توجه به خصوصیات نیم‌رخ تغییر شکل یافته جهت محاسبه عمق پله و عمق فرونشینی ارائه شده است که در مقایسه با رابطه ارائه شده توسط (PIANC (2003) از دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی حاضر و حتی داده‌های مقیم و همکاران (۱۳۸۸) برخوردار است. بر اساس رابطه ارائه شده توسط (PIANC (2003) عمق فرونشینی فقط تابعی از عمق آب و قطر مشخصه سنگدانه‌ها است، در حالی که بر اساس رابطه حاصل شده از تحقیق حاضر ارتفاع سکو نیز در تغییرات عمق فرونشینی تاثیر به‌سزایی دارد.

۲- با افزایش عمق آب پای سازه، عمق پله و عمق فرونشینی در نیم‌رخ تغییر شکل یافته افزایش پیدا می‌کنند، چون با افزایش عمق آب مقدار انرژی موج رسیده به پای سازه افزایش یافته و حجم ناحیه فرسایش یافته بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع سکو حجم سنگ‌های قرار گرفته در ناحیه سکو افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث کاهش نیروهای وارده به سازه و فرسایش می‌شود. به دنبال کاهش فرسایش نیز عمق فرونشینی کاهش می‌یابد.

۳- نتایج نشان می‌دهند که تاثیر ارتفاع سکو از سطح ایستایی بر تغییرات عمق پله ناچیز است.

## منابع

- عزآباد، پ؛ شفیعی فر، م؛ شیریان، ن، ۱۳۸۶. بررسی پایداری موج-شکن‌های شکل‌پذیر بر اساس نتایج آزمایشگاهی. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی دریا، شماره ۶، صفحات ۴۹-۶۰.
- مقیم، م. ن؛ شفیعی فر، م؛ چگینی، و؛ آق تومان، پ، ۱۳۸۸. تاثیر شرایط امواج نامنظم بر عرض فرسایش یافته موج‌شکن‌های سکویی شکل‌پذیر. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی دریا، شماره ۹، صفحات ۳۵-۵۱.