

بررسی ابعاد هندسی ریپل‌های رسوبی با استفاده از مدل فیزیکی و اصلاح ضرایب روابط تجربی موجود

حمیده دقیق^۱، علی کرمی خانیکی^۲، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳

hamidehdaghigh@yahoo.com

۱- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

۲- عضو هیات علمی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

۳- عضو هیات علمی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

چکیده

در این تحقیق تشکیل و توسعه ریپل‌های رسوبی تحت تاثیر امواج به روش مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات تحقیق حاضر در فلوم آزمایشگاهی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام شده است. این فلوم امواج، دارای ۲۰ متر طول، ۵/۵ متر عرض و ۲ متر ارتفاع است که با احداث دو دیوار به سه بخش مجزا با شیب‌های متفاوت ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ تقسیم شده است. آزمایشات مدل فیزیکی در دو سری مختلف با هدف بررسی تغییرات بستر با گذشت زمان (در طی ۴ اجرا) و همچنین بررسی اثرات تغییر ارتفاع و پریرود موج روی ریپل (در طی ۸ اجرا) انجام گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و پریرود موج، بر ارتفاع و طول موج ریپل‌ها افزوده شده است. همچنین با افزایش ارتفاع موج، بخش بیشتری از رسوبات ناحیه عمیق به ناحیه کم عمق منتقل شده است. افزایش پریرود موج می‌تواند موجب نامنظم شدن ریپل‌های بستر نیز گردد. هدف این تحقیق، ارائه روابطی کاربردی جهت پیش بینی ابعاد هندسی ریپل‌ها می‌باشد. به این منظور با استفاده از داده‌های مدل فیزیکی و مجموعه ای بزرگ از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی موجود، روابطی جهت پیش بینی ارتفاع بدون بعد ریپل و طول موج بدون بعد ریپل ارائه گردید. محاسبه شاخص‌های آماری بیانگر دقت بیشتر این روابط نسبت به روابط موجود قبلی، در پیش بینی ابعاد ریپل‌ها می‌باشد.

واژگان کلیدی: تغییر شکل بستر، ریپل، مدل فیزیکی، امواج.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۵/۰۵/۰۶

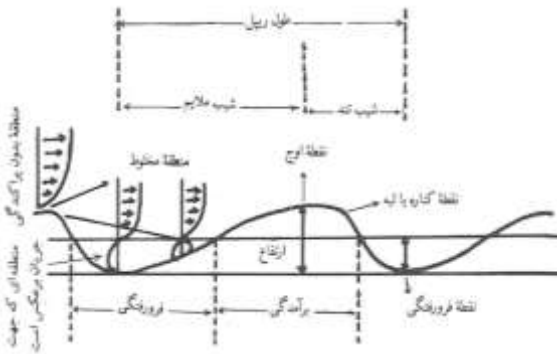
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۸/۲۸

۱- مقدمه

شبیه‌سازی تغییر شکل بستر سواحل به دلیل پیچیده بودن فرآیندهای این ناحیه از اهمیت خاصی برخوردار است. در این میان تغییر دندانه‌ای شکل بستر سواحل ماسه‌ای (ریپل)، به دلیل تاثیر قابل ملاحظه‌ای که بر زبری و تنش برشی بستر دارد و همچنین باعث ایجاد تاخیر فاز در تعلیق ذرات رسوب در بستر می‌شوند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

ریپل مارک‌ها ساختمان‌های موجی شکلی هستند که در اثر حرکت امواج آب یا حرکت باد روی سطوح ماسه‌ای- در محیط‌های خشکی، حدواسط و دریایی- تشکیل می‌گردند. ریپل‌ها معمولاً به دو صورت دیده می‌شوند:

۱- ریپل‌های نامتقارن^۱ یا ریپل‌های جریانی که در اثر حرکت جریان آب یا باد بطور یک جهتی درست شده‌اند و شیب دوطرف آن‌ها به یک اندازه نمی‌باشد. ۲- ریپل‌های متقارن^۲ یا ریپل‌های موجی که شیب در دو طرف ریپل به یک اندازه است. ریپل‌های متقارن به صورت دیواره‌هایی هستند که با فرورفتگی‌هایی از یکدیگر جدا شده و در اثر حرکت امواج تشکیل گردیده‌اند. ریپل از دو قسمت تشکیل شده است (شکل ۱): اول قسمتی که دارای شیب ملایم^۳ بوده و در خلاف جهت جریان قرار دارد و دوم قسمتی که دارای شیب تند^۴ بوده و در جهت جریان قرار می‌گیرد. نصف ارتفاع یک ریپل را برای جداکردن بخش فرورفته از برآمده در نظر می‌گیرند. پایین‌ترین نقطه در بخش فرورفته را نقطه فرورفته^۵ و بالاترین نقطه در بخش برآمده را نقطه اوج یا قله^۶ می‌نامند. ضمناً نقطه‌ای که باعث جدایی قسمت فوقانی یک ریپل از بخش با شیب زیاد آن می‌گردد را نقطه لبه یا کناره^۷ می‌نامند. طول ریپل عبارت از پایین‌ترین نقطه یک ریپل تا ریپل بعدی است که شامل یک بخش با شیب کم و یک بخش با شیب زیاد می‌باشد. تیزی ریپل^۸ عبارت از نسبت ارتفاع ریپل بر طول آن می‌باشد که می‌توان توسط آن ریپل‌های تشکیل شده در محیط‌های آبی را از بادی جدا کرد. ابتدا قبل از جداسدن جریان در قله اختلال، جریان جت به سمت پایین تمایل به ایجاد یک فرورفتگی در مقابل خود و بلند کردن ماسه در یک برآمدگی در آن سوییچ دارد.



شکل (۱) شکل هندسی ریپل مارک‌ها همراه با پراکندگی انرژی (سرعت) در رابطه با حرکت ذرات معلق در روی آن‌ها.

وقتی جریان در قله جدا می‌شود، گردابه‌ای در سمت پرشیب ریپل شکل می‌گیرد که در جهت دنبال کردن ماسه عمل کرده و در حالی که فرورفتگی را عمیق‌تر می‌کند، قله اصلی را می‌سازد. این مکانیسم که در هر دو سمت ریپل اصلی وجود دارد، دو ریپل جدید را به وجود می‌آورد که به نوبه خود به عنوان ریپل‌های "تولید کننده" عمل می‌کنند. تا زمانی که تکه‌های ریپل‌های شکل گرفته به سمت بیرون پخش می‌شوند، طول موج و ارتفاع ریپل‌ها خود را تطبیق می‌دهند تا به یک تعادل برسند.

در مورد مشخصات ریپل‌ها و ابعاد آن‌ها مطالعات و آزمایشات متعددی صورت گرفته است که حاصل این مطالعات روابط تجربی است که برای تعیین ابعاد و ویژگی ریپل‌ها ارائه شده‌اند. از جمله افرادی که برای پیش‌بینی ابعاد ریپل‌ها روابطی ارائه کرده‌اند می‌توان به (Nielsen (1981) [۱]، Grant & Wiberg & Van Rijn (1993) [۲]، Madsen (1982) [۳]، Harris (1994) [۴]، Grasmeyer & Kleinhans (2004) [۵]، Soulsby & Whitehouse (2005) [۶]، Benoît، Camenen (2009) [۷] اشاره کرد.

در تحقیق حاضر مدلسازی تغییرات بستر یک ساحل ماسه‌ای و محاسبه ارتفاع ریپل‌ها به روش آزمایشگاهی انجام گرفته و سپس ابعاد ریپل بدست آمده از مدل فیزیکی با روابط تجربی موجود مقایسه شده است. از طریق بررسی ابعاد هندسی ریپل‌های بستر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی و همچنین استفاده از مجموعه داده بزرگی شامل داده‌های آزمایشگاهی و میدانی دیگر محققین، و با بهره‌گیری از

⁵ Trough Point

⁶ Summit Point

⁷ Brink Point

⁸ Ripple Steepness

¹ Asymmetrical Ripple Mark

² Symmetrical Ripple Mark

³ Stoss Side

⁴ Lee side

کمتر از ۰/۷ میلیمتر باشد (ویلیام و کمپ^۲ ۱۹۷۲). لذا دانه بندی رسوبات مورد استفاده در این آزمایش دارای قطر میانگین رسوبات برابر $d_{50}=0/2$ میلیمتر می‌باشد. شکل (۳) نیز نمایی از فلوم در حال انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

۲-۲- آزمون‌های مدل فیزیکی

برای بررسی اثر ارتفاع موج بر روی انتقال رسوب در مدل فیزیکی، پارامترهای موثر به صورت پارامتر ارتفاع موج تابشی H و پرپود موج T در نظر گرفته شده است. ارتفاع آزاد آب ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به طور متوسط ۱۰۰۰ عدد موج برای انجام آزمون‌ها بکار رفته است، که جدول (۱) برنامه آزمون‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل‌سازی فیزیکی

جهت بررسی اثر امواج بر روی ریپل‌های بستر، مقادیر تراز بستر در هر مرحله از آزمایش با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی گردید.



شکل (۲) فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده به همراه مولد موج.



شکل (۳) فلوم آزمایشگاهی در حال آزمایش.

نرم‌افزار SPSS روابطی را برای پیش بینی ابعاد ریپل‌ها به دست آوردیم. محاسبه شاخص‌های آماری برای این روابط ارائه شده مشخص کرد که این روابط در تمام شاخص‌های آماری نتایج بهتری نسبت به سایر روابط موجود دارند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- برپایی مدل فیزیکی

آزمایشات تحقیق حاضر در فلوم آزمایشگاهی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام شده است. فلوم امواج دارای ۲۰ متر طول، ۵/۵ متر عرض و ۲ متر ارتفاع است که با احداث دو دیوار از انتهای فلوم به ارتفاع یک متر از بستر و به فاصله یک متر از یکدیگر به سه بخش مجزا تقسیم شده است. شکل (۲) نمایی از فلوم امواج و مولد موج را نشان می‌دهد. مدل مورد استفاده در بخش میانی با شیب سه درصد برپا شده و آزمون‌های مختلف مربوط به تغییر پارامترهای موج انجام شد. پاروهای تولید موج در دورترین فاصله ممکن نسبت به شیب بستر و سازه مدل شده استقرار یافته است تا شرایط ایجاد امواج در آب کم عمق مهیا شود.

مصالح مورد نیاز حدود یک تن ماسه با متوسط قطر دانه ماسه ۰/۲ میلی متر است. به منظور تامین رسوبات با مشخصات مورد نظر ابتدا از ۲ دیوی رسوبی نمونه‌هایی برداشت و در آزمایشگاه مکانیک خاک با استفاده از الک‌های استاندارد و در موارد ریزدانه، رسوبات با روش هیدرومتری، منحنی دانه‌بندی هر یک از نمونه‌ها مشخص شد.

برای آزمایش‌های مربوط به تعیین فاصله و ارتفاع ریپل‌ها لازم است که پروفیل بستر در سراسر منطقه ساحلی برداشت شود. برای این منظور از یک دستگاه برداشت پروفیل بستر^۱ استفاده گردید. این دستگاه از یک جفت ریل ثابت در امتداد فلوم، یک ریل متحرک (عمود بر ریل ثابت و به موازات عرض فلوم) یک ارابه و یک دستگاه پوینت گیج تشکیل شده که به سیستم قابلیت حرکت دو بعدی می‌دهد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه که مانند یک کولیس عمل می‌کند، در حد دهم میلی متر است. این اندازه‌گیری‌ها در فواصل ۲/۵ سانتی متری در عرض و ۲ سانتی متری در طول فلوم انجام می‌گیرد. در آزمایشاتی که توسط دیگر محققین انجام شده، دیده شده است که برای تشکیل ریپل‌ها، قطر متوسط رسوبات بایستی

² Williams & Kemp

¹ Bed Profiler

بررسی تغییرات توپوگرافی بستر در اجراهای مختلف مرحله اول مدل فیزیکی در ساحل مسطح نشان می‌دهد، ریپل‌های شکل گرفته در اجرای اول هنوز کاملاً رشد نیافته اند. در قسمت ابتدایی فلوم، بستر هنوز صاف است یعنی فرصت کافی برای ایجاد ریپل نبوده است. همچنین در قسمت ابتدایی محل تشکیل ریپل‌ها دو کانال مشاهده می‌شود. با افزایش زمان، ریپل‌های بستر فرصت کافی برای رسیدن به تعادل را بدست می‌آورند. مقایسه پروفیل اولیه و نهایی بعد از اجرای اول نیز نشان می‌دهد که در این زمان عمدتاً رسوبات از قسمت عمیق فلوم به کم عمق منتقل شده اند، اما با افزایش زمان اجرا، شاهد رسوبگذاری در این منطقه می‌باشیم.

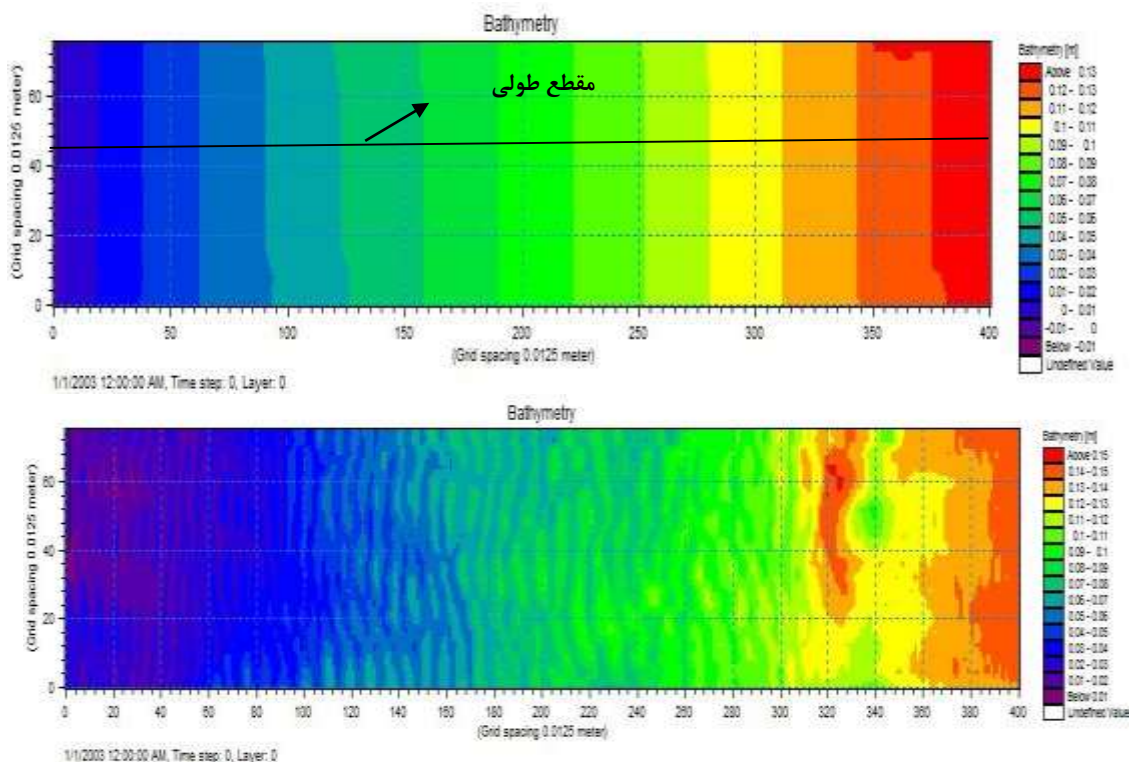
جدول (۲) نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی.

مشخصات موج	ارتفاع ریپل (سانتی متر)	طول موج ریپل (سانتی متر)
$H_0 = 0.11 \text{ m}$ $T = 1.2 \text{ s}$	۰/۵۴	۶/۸
$H_0 = 0.11 \text{ m}$ $T = 1.8 \text{ s}$	۰/۷۵	۷/۹۲
$H_0 = 0.11 \text{ m}$ $T = 2.2 \text{ s}$	۱	۹/۱۳
$H_0 = 0.05 \text{ m}$ $T = 1.8 \text{ s}$	۰/۶۱	۶/۵۴
$H_0 = 0.075 \text{ m}$ $T = 1.8 \text{ s}$	۰/۷۲	۷/۷

جدول (۱) خصوصیات کلی امواج در آزمایشات انجام شده.

شماره اجرا	H_0 (m)	T (S)	Duration	Water level(m)	Tan θ
۱	۰/۰۷۵	۱/۸	۳ دقیقه	۰/۲	۰/۰۳
۲	۰/۰۷۵	۱/۸	۳۵ دقیقه	۰/۲	۰/۰۳
۳	۰/۰۷۵	۱/۸	۷۲ دقیقه	۰/۲	۰/۰۳
۴	۰/۰۷۵	۱/۸	۵/۵ ساعت	۰/۲	۰/۰۳
۵	۰/۱۱	۱/۸	۳۰ دقیقه	۰/۲	۰/۰۳
۶	۰/۰۵	۱/۸	۳۰ دقیقه	۰/۲	۰/۰۳
۷	۰/۱۱	۱/۲	۳۰ دقیقه	۰/۲	۰/۰۲
۸	۰/۱۱	۲/۲	۳۰ دقیقه	۰/۲	۰/۰۲

شکل (۴) نمونه ای از توپوگرافی بستر قبل و بعد از موج را نشان می‌دهد. مقطع طولی مورد استفاده جهت بررسی ارتفاع و طول موج ریپل‌ها نیز در شکل مشخص شده است. با استفاده از این مقطع در هر یک از مراحل آزمایش، ابعاد ریپل‌ها در نقاط مختلف بستر مورد بررسی قرار گرفت و میانگین این نتایج در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل (۴) الف) پروفیل بستر قبل از موج و ب) پروفیل بستر بعد از موج با ارتفاع ۰/۱۱ متر و پریود ۲/۲ ثانیه.

در این تحقیق به منظور بدست آوردن روابطی کاربردی جهت پیش بینی ابعاد ریپل‌ها، از یک مجموعه داده بزرگ استفاده شده است که این مجموعه داده شامل ۲۰۰ داده آزمایشگاهی و ۳۱۰ داده میدانی و مجموعاً ۵۱۰ داده است.

داده‌های ریپل مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های امواج منظم و نامنظم آزمایشگاهی و نیز اندازه‌گیری‌های میدانی به ترتیب در جداول (۳) و (۴) به طور خلاصه آورده شده اند. در این جداول d_{50} اندازه میانه ذره رسوبی، H ارتفاع موج، T پریود موج، η ارتفاع ریپل، λ طول موج ریپل می‌باشد.

بررسی‌های اولیه نشان داد که تفاوت قابل ملاحظه ای بین داده‌های بدست آمده از فلوم موج و تونل موج وجود ندارد. لازم به ذکر است که تست‌های آزمایشگاهی در محدوده مشابهی از اندازه ذرات رسوبی مشاهده شده در اندازه گیری‌های میدانی انجام گرفته‌اند.

هندسه ریپل‌های ماسه ای ناشی از موج توسط افراد مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در اغلب این بررسی‌ها، هدف پیدا کردن پارامتر بدون بعدی بوده است که بهترین همبستگی را با داده‌های پارامترهای ریپل داشته باشد و به همین منظور یک منحنی به عنوان یک رابطه پیش‌بینی کننده به داده‌ها برازش شده است.

برای جریان‌های با شدت کم، بستر به صورت یک مجموعه ریپل دوبعدی منظم با قله‌های تیز است، اگرچه ممکن است به دلیل اینکه شدت جریان کم است بخش ابتدایی بستر ماسه ای تحت تاثیر قرار نگیرد و به صورت مسطح باقی بماند. وقتی شدت جریان افزایش می‌یابد، ارتفاع و طول موج ریپل‌ها افزایش می‌یابد در صورتی که تیزی ریپل در مقدار اولیه اش ثابت می‌ماند. در جریان‌های با شدت بازهم بیشتر، تیزی ریپل کاهش می‌یابد. در واقع طول موج ریپل در مقداری مشابه باقی می‌ماند درحالی که ارتفاع ریپل کاهش یافته، قله‌ها گردتر شده و ریپل‌ها سه بعدی می‌شوند.

ارتفاع و طول موج ریپل‌های بستر با افزایش ارتفاع و پریود موج، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع موج، بخش بیشتری از رسوبات ناحیه عمیق برداشته شده و به ناحیه کم عمق منتقل شده است. افزایش پریود موج می‌تواند موجب نامنظم شدن ریپل‌های بستر نیز گردد. اغلب مشاهده می‌شود که ریپل‌های شکل گرفته در مناطق عمیق فلوم، مرتب‌تر و کوچک‌تر از ریپل‌های مناطق کم عمق می‌باشند.

از طریق بررسی ابعاد هندسی ریپل‌های بستر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی و همچنین استفاده از مجموعه داده بزرگی شامل داده‌های آزمایشگاهی و میدانی محققین دیگر، و با بهره گیری از نرم افزار SPSS رابطه ای را برای پیش‌بینی ارتفاع ریپل‌ها به دست آوردیم.

جدول (۳) خلاصه داده‌های ریپل موجود از تست‌های آزمایشگاهی با امواج منظم و نامنظم.

منبع داده	نوع جریان	تعداد داده	$d_{50} (mm)$	$H (cm)$	$T (s)$	$\eta (cm)$	$\lambda (cm)$
Lofquist (1978)	تونل موج	۱۳	۰/۱۸-۰/۲۶	۴۰	۲/۷-۱۵	۰-۱۹	۱۱-۱۲۰
Sleath (1982)	تونل موج	۱۳	۰/۲۰-۰/۴۱	۱۵	۲/۹-۵/۱	۲-۵	۱۲-۳۲
Faraci & Foti (2002)	فلوم موج	۳۸	۰/۲۵	۵-۱۴	۱/۲-۴/۲	۰/۷-۲/۱	۴-۱۱
Williams et al. (2004)	فلوم موج بزرگ	۶۴	۰/۱۶-۰/۳۵	۳۰-۱۶۰	۴-۶	۰/۳-۷	۲۰-۱۰۴
Davis et al. (2004)	فلوم موج	۴۰	۰/۲۴-۰/۳۷	۵-۱۰	۰/۸-۱/۲	۰/۵-۱	۲۸-۶۷
O'Donoghue et al. (2006)	فلوم موج بزرگ	۲۷	۰/۲۲-۰/۴۴	۱۳-۴۰	۳-۱۲/۵	۰/۶-۳/۵	۱۱-۱۱۰
Daghigh at al. (2014)	فلوم موج	۵	۰/۲	۵-۱۱	۱/۲-۲/۲	۰/۲-۱	۶-۹

جدول (۴) خلاصه داده‌های ریپل موجود از اندازه گیری‌های میدانی.

منبع داده	تعداد داده	$d_{50} (mm)$	$H (m)$	$T (s)$	$\eta (cm)$	$\lambda (cm)$
Inman (1957)	۴۱	۰/۱-۰/۹	۰/۵-۲	۵-۱۳	۰/۵-۱۹	۶-۱۰۵
Li & Amos (1998)	۳۵	۰/۳۴	۰/۲۸-۱/۷	۸-۱۲/۲	۰/۸-۲/۲	۸-۱۵
Hume et al. (1999)	۹	۰/۴	۲۵	۱۱	۳-۱۳	۴۰-۹۰
Hanes et al. (2001)	۲۰۱	۰/۱۲-۱/۷	۱/۴-۷	۳-۱۶	۰-۱۳	۰-۲۷۰
Doucette (2002)	۲۴	۰/۳۵-۰/۶۲	۶-۲۶	۲/۲-۱۲/۲	۲-۱۴	۸-۹۰

۳-۲- آنالیز ارتفاع ریپل

نیلسن (۱۹۷۹) [۸] پیشنهاد داد که ارتفاع بدون بعد ریپل وابسته به پارامتر موبیلیتی است و روابط زیر را برای پیش بینی ارتفاع ریپل ارائه داد:

- برای داده‌های آزمایشگاهی:

$$\frac{2\eta}{d_0} = 0.275 - 0.022\sqrt{\psi} \quad (1)$$

- برای داده‌های میدانی:

$$\frac{2\eta}{d_0} = 21\psi^{-1.85} \quad (2)$$

که d_0 قطر مسیر مداری و $\psi = U_0^2 / (S-1)gd_{50}$ عدد موبیلیتی است. یک پارامتر بدون بعد مناسب دیگر، عدد سیال-رسوب S_* است که ویسکوزیته را نیز در بر می‌گیرد. این پارامتر توسط مدسن و گرت^۱ (۱۹۷۶) به صورت زیر بیان شد:

$$S_* = \frac{d_{50}}{4\nu} \sqrt{(S-1)gd_{50}} \quad (3)$$

از آنجا که اکثر تست‌های آزمایشگاهی در دمای اتاق انجام شده اند، می‌توان نتیجه گرفت که ویسکوزیته در محدوده بزرگی تغییر نکرده است. ویکرامانایاک و مدسن (۱۹۹۴) [۹] پیشنهاد دادند که ارتفاع ریپل وابسته به نسبت این دو پارامتر یعنی ψ/S_* است. آن‌ها از داده‌های میدانی اینمن (۱۹۵۷) [۱۰]، کومار و میلر^۲ (۱۹۸۰) [۱۱] و نیلسن (۱۹۸۴) استفاده کرده و رابطه دو ضابطه ای زیر را برای پیش بینی ارتفاع ریپل‌های میدانی ارائه کردند:

$$\frac{\eta}{A} = 0.27 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-0.5} \quad ; \quad \frac{\psi}{S_*} \leq 3.0 \quad (4)$$

$$\frac{\eta}{A} = 0.52 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-1.1} \quad ; \quad \frac{\psi}{S_*} > 3.0 \quad (5)$$

در این تحقیق به منظور اصلاح ضرایب رابطه ارائه شده توسط ویکرامانایاک و مدسن (۱۹۹۴)، از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی جدول‌های (۳) و (۴) استفاده کردیم. بدین ترتیب که داده‌های ارتفاع بدون بعد ریپل مربوط به داده‌های آزمایشگاهی و میدانی را در مقابل ψ/S_* در شکل (۵) رسم کردیم.

جهت ارزیابی دقت روابط و مقایسه آماری بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده، از چهار شاخص آماری شاخص

توافق^۳ (I_a)، ضریب همبستگی^۴ (CC)، شاخص پراکندگی^۵ (SI) و شاخص اریبی ($BIAS$) شده است.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (6)$$

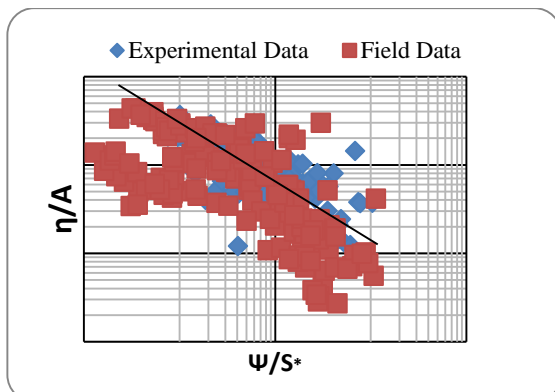
$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

$$SI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2} / \bar{X}_i \quad (8)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (Y_i - X_i) \quad (9)$$

که در روابط فوق N تعداد داده‌ها، Y_i مقدار پیش‌بینی و X_i مقدار اندازه‌گیری شده است. \bar{X} و \bar{Y} به ترتیب میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است. نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف ارائه شده جهت پیش بینی ارتفاع ریپل، در جدول (۵) آورده شده اند.

در مرحله بعد به منظور بدست آوردن رابطه ای با دقت بیشتر جهت پیش بینی ارتفاع ریپل، ضرایب روابط ارائه شده قبلی با استفاده از مجموعه ای بزرگ از داده‌ها اصلاح گردید. به این ترتیب که مجدداً برای بدست آوردن ضرایب اصلاح شده، یک بار فقط از داده‌های آزمایشگاهی و بار دیگر فقط از داده‌های میدانی و نهایتاً از کل مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی باهم استفاده و سپس شاخص‌های آماری مجدداً برای هر سه رابطه بدست آمده محاسبه شدند.



شکل (۵) ارتفاع بدون بعد ریپل داده‌های آزمایشگاهی و میدانی.

⁴ Correlation Coefficient

⁵ Scatter Index

¹ Madsen & Grant

² Komar & Miller

³ Agreement Index

جدول (۵) نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف ارائه شده جهت پیش بینی ارتفاع ریپل.

رابطه	Bias	SI	CC	I _a
Nielsen (1981)	۱۴/۸۳	۱/۲۹	۰/۴۸	۰/۶۸
Grant & Madsen (1982)	۱۲/۸۷	۱/۳۳	۰/۴۴	۰/۶۶
Van Rijn (1993)	۸/۴۲	۱/۷۱	۰/۴۹	۰/۶۴
Wikramanayake & Madsen (1994)	۹/۶۳	۱/۲۱	۰/۴۹	۰/۷۰
Mogridge et al. (1994)	۴۴/۴۰	۲/۴۴	۰/۳۸	۰/۵۰
Wiberg & Harris (1994)	۶۲/۸۵	۲/۸۷	۰/۵۵	۰/۵۲
Raudkivi (1997)	-۱۳/۴۷	۱/۹۳	-۰/۱۴	۰/۳۳
Li & Amos (1998)	-۱۲/۳۳	۱/۲۷	۰/۵۷	۰/۳۲
Faraci & Foti (2002)	-۱۴/۳۲	۱/۴۰	-۰/۱۱	۰/۳۲
Grasmeijer & Kleinhans (2004)	-۲/۰۶	۱/۰۳	۰/۵۴	۰/۷۰
Williams et al. (2004)	-۷/۶۶	۱/۱۸	۰/۳۴	۰/۵۱
Soulsby & Whitehouse (2005)	۲۰/۶۶	۱/۴۸	۰/۴۶	۰/۶۴
O' Donoghue et al. (2006)	۱۸/۰۲	۱/۱۵	۰/۶۹	۰/۷۸
Camenen (2009)	۲۶/۲۳	۱/۳۶	۰/۷۱	۰/۷۵

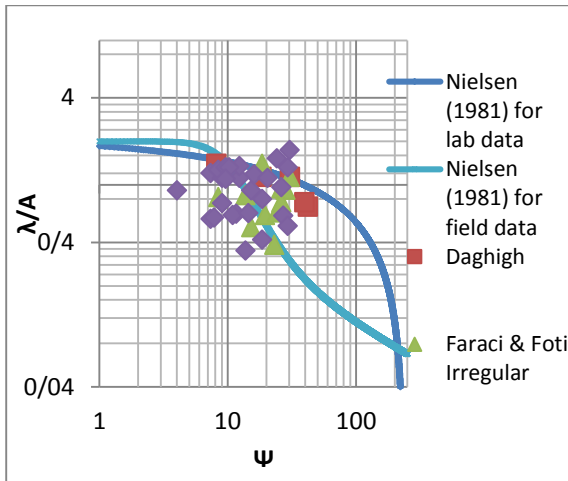
جدول (۶) نتایج شاخص‌های آماری برای روابط پیشنهادی جهت پیش بینی ارتفاع بدون بعد ریپل.

نوع داده	رابطه	Bias	SI	CC	I _a
آزمایشگاهی	$\frac{\eta}{A} = 0.176 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-0.235}$	۰/۱۱	۰/۵۴	۰/۸۵	۰/۹۱
میدانی	$\frac{\eta}{A} = 0.125 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-0.062}$	۰/۷۷	۱/۰۳	۰/۵۷	۰/۶۷
آزمایشگاهی و میدانی	$\frac{\eta}{A} = 0.137 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-0.297}$	-۰/۰۲	۰/۹۲	۰/۸۴	۰/۹۵

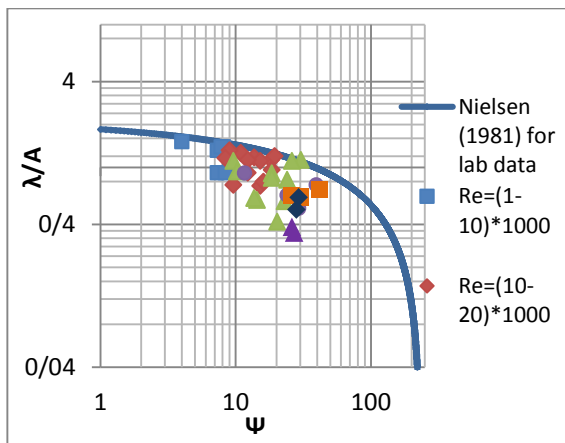
با توجه به جدول (۶) مشخص می شود که این رابطه ارائه شده، در تمام شاخص‌های آماری نتایج بهتری نسبت به سایر روابط دارد. برای این رابطه مقدار شاخص آریبی به صفر میل می کند که نشان می دهد اختلاف میانگین داده‌های پیش‌بینی شده از میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده صفر است و این مسئله در جهت بهبود پیش‌بینی است. شاخص پراکندگی، میزان انحراف داده‌ها از خط بهینه، نیز برای رابطه پیشنهاد شده به مقدار قابل توجهی از سایر روابط کمتر است و این مسئله نیز در جهت بهبود پیش‌بینی است. مقدار ضریب همبستگی که شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می دهد، برای این رابطه بیش از سایر روابط بدست آمده است. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. مقدار ضریب توافق نیز بیش از سایر روابط است و این بدان معنا

در میان این روابط، رابطه اصلاح شده ویکرامانایاک و مدسن (۱۹۹۴)، در هر سه حالت کمترین خطا را دارد. در جدول (۶) شاخص‌های آماری این روابط آورده شده است. همانطور که نتایج نشان می دهند رابطه اصلاح شده با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی باهم، که در واقع به سبک رابطه ارائه شده توسط ویکرامانایاک و مدسن (۱۹۹۴) است، در تمام شاخص‌ها بهترین نتیجه را دارد. هر سه رابطه پیشنهادی نتایج بهتری را نسبت به رابطه ارائه شده توسط ویکرامانایاک و مدسن (۱۹۹۴) نشان می دهند. از آنجاکه هدف این تحقیق، ارائه رابطه‌ای کاربردی برای هر دو داده‌های آزمایشگاهی و میدانی می باشد، رابطه زیر که با استفاده از مجموع داده‌های آزمایشگاهی و میدانی بدست آمده است، جهت پیش بینی ارتفاع بدون بعد ریپل پیشنهاد می گردد:

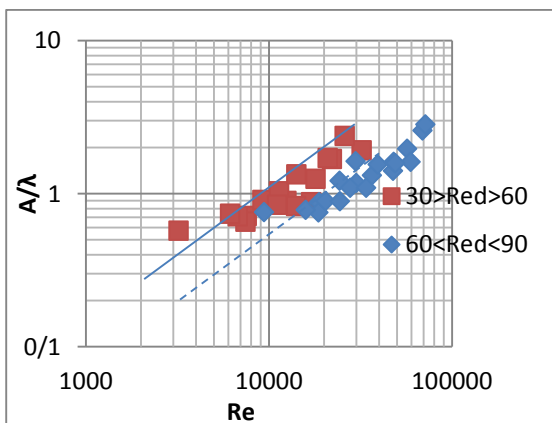
$$\frac{\eta}{A} = 0.137 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-0.297} \quad (10)$$



شکل (۶) طول موج بدون بعد ریپل اندازه گیری شده روی منحنی‌های نیلسن (۱۹۸۱) برای داده‌های آزمایشگاهی و میدانی.



شکل (۷) مقایسه داده‌های آزمایشگاهی طول موج بدون بعد ریپل برحسب اعداد رینولدز مختلف با منحنی نیلسن (۱۹۸۱) برای داده‌های آزمایشگاهی.



شکل (۸) رابطه دو پارامتری پیشنهادی برای طول موج بدون بعد ریپل.

است که تا چه اندازه رابطه ارائه شده در پیش بینی ارتفاع ریپل با مقادیر اندازه‌گیری شده توافق دارد.

۳-۳- آنالیز طول موج ریپل

در هنگام مطالعه طول موج ریپل، بگنولد (۱۹۴۶) و سپس کارستنز و همکارانش (۱۹۶۹)، موربیچ و کمفیوس^۱ (۱۹۷۲)، دینگلر^۲ (۱۹۷۴) و بربنر^۳ (۱۹۸۰) تنها وابستگی به عدد موبیلیتی را پیشنهاد دادند. به ویژه آن‌ها پیشنهاد دادند که برای $20 < \psi$ ، نسبت بین طول موج ریپل و دامنه مسیر مداری به صورت مقدار ثابت $\lambda/A = 1.3$ در نظر گرفته شود. با وجود اینکه در اغلب کارهای میدانی مقدار ψ بزرگتر از ۲۰ است و در محدوده بین $2 < \psi < 200$ قرار می‌گیرد، نیلسن (۱۹۸۱) روابط زیر را پیشنهاد داد:

- برای داده‌های آزمایشگاهی:

$$\frac{\lambda}{A} = 2.2 - 0.345\psi^{0.34} \quad (11)$$

- برای داده‌های میدانی:

$$\frac{\lambda}{A} = \exp\left(\frac{693 - 0.37 \ln^8 \psi}{1000 + 0.75 \ln^7 \psi}\right) \quad (12)$$

به منظور داشتن محدوده بزرگی از اعداد رینولدز، از داده‌های آزمایشگاهی فارسی و فوتی (۲۰۰۲) به همراه داده‌های این تحقیق استفاده کردیم. داده‌های آزمایشگاهی، محدوده بین $8 < \psi < 40$ را در بر می‌گیرند که مطابق شکل (۶) روی منحنی نیلسن (۱۹۸۱) قرار می‌گیرند. در این شکل، حد بالایی مقادیر ψ به خاطر تجهیزات آزمایشگاهی محدود شده است. در شکل (۷) داده‌ها برحسب عدد رینولدز پارامتری شده و به همراه داده‌های این تحقیق و داده‌های فارسی و فوتی (۲۰۰۲) و منحنی نیلسن (۱۹۸۱) برای داده‌های آزمایشگاهی رسم شده اند. همان طور که در شکل مشخص است، در هر مقدار از عدد موبیلیتی، نقاط آزمایشگاهی تمایل به طبقه بندی برای اعداد رینولدز مختلف دارند.

همچنین پیش از این به طور آشکار وابستگی به R_e توسط بلاندکس^۴ (۱۹۹۰) پیشنهاد شده بود که با آنالیز پایداری خطی برای ریپل‌های کوچک نشان داده بود که یک وابستگی بین نسبت مسیر مداری سیال A و طول موج ریپل λ ، به دو پارامتر R_{ed} و $R_{e\delta}$ وجود دارد که $R_{e\delta}$ برابر با $\sqrt{2R_e}$ می‌باشد.

³ Brebner

² Blondeaux

¹ Mogridge & Kamphuis

² Dingler

در مرحله بعد به منظور بدست آوردن رابطه ای با دقت بیشتر جهت پیش بینی طول موج ریپل، ضرایب روابط ارائه شده قبلی یک بار فقط با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و بار دیگر فقط با استفاده از داده‌های میدانی و نهایتاً با استفاده از کل مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی باهم اصلاح شدند. سپس مجدداً شاخص‌های آماری برای هر سه رابطه بدست آمده محاسبه شدند. در این حالت، از بین تمام روابط اصلاح شده پیشنهادی، رابطه اصلاح شده فاراسی و فوتی (۲۰۰۲) برای پیش بینی طول موج ریپل کمترین خطا را داشت. این رابطه در هر سه حالت استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تنها، داده‌های میدانی تنها و همچنین داده‌های آزمایشگاهی و میدانی باهم، در تمام شاخص‌ها بهترین نتیجه را نسبت به سایر روابط پیشنهادی دارد.

روابط بدست آمده در هر حالت و شاخص آماری آن‌ها در جدول (۸) آمده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند رابطه اصلاح شده با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی باهم، که در واقع به سبک رابطه ارائه شده توسط فاراسی و فوتی (۲۰۰۲) است، در تمام شاخص‌ها بهترین نتیجه را دارد. هر سه رابطه پیشنهادی نتایج بهتری را نسبت به رابطه ارائه شده توسط فاراسی و فوتی (۲۰۰۲) نشان می‌دهند.

در شکل (۸) داده‌های طبقه بندی شده برحسب R_{ed} های مختلف به صورت تابعی از R_e رسم شده است. همانطور که در شکل (۸) مشخص است برای دو محدوده مجزای R_{ed} بین ۳۰ تا ۶۰ و بین ۶۰ تا ۹۰، داده‌ها به طور آشکار تمایل به طبقه بندی بر حسب مقادیر R_e در دو منحنی دارند. فاراسی و فوتی (۲۰۰۲) نیز بیان کرده بودند که طول موج ریپل‌ها به R_e و R_{ed} بستگی دارد و با استفاده از داده‌های امواج منظم و نامنظم آزمایشگاهی خودشان و هم چنین داده‌های استفاده شده در منحنی نیلسن و داده‌های بوسمن^۱ (۱۹۸۱) رابطه ای را به صورت زیر برای پیش بینی طول موج ریپل ارائه کردند:

$$\frac{A}{\lambda} = \frac{0.08291}{R_{ed}} R_e^{0.68} \quad (13)$$

در ادامه با به کارگیری یک مجموعه داده بزرگ، رابطه ارائه شده توسط فاراسی و فوتی (۲۰۰۲) به روشی که در بخش قبلی بیان شد، مورد اصلاح قرار گرفت.

نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف ارائه شده تاکنون جهت پیش بینی طول موج ریپل، در جدول (۷) آورده شده اند. در محاسبه این شاخص‌های آماری از مجموع داده‌های آزمایشگاهی و میدانی استفاده شده است.

جدول (۷) نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف ارائه شده جهت پیش بینی طول موج ریپل.

رابطه	Bias	SI	CC	I _a
Nielsen (1981)	۷۷/۲۵	۱/۰۲	۰/۴۵	-۰/۶۷
Grant & Madsen (1982)	۸۴/۱۴	۱/۰۵	۰/۴۵	-۰/۶۷
Van Rijn (1993)	۱۰/۵۲	۱/۳۲	۰/۳۶	۰/۵۹
Wikramanayake & Madsen (1994)	۲۲/۲۹	۰/۹۸	۰/۴۰	۰/۶۵
Mogridge et al. (1994)	۷۴/۷۱	۱/۳۴	۰/۵۲	۰/۶۶
Wiberg & Harris (1994)	۶۹/۳۹	۰/۸۷	۰/۶۰	۰/۷۵
Raudkivi (1997)	-۸۴/۸۵	۱/۳۵	-۰/۲۰	-۰/۴۲
Li & Amos (1998)	۹۶/۸۷	۱/۰۲	۰/۴۱	۰/۳۹
Faraci & Foti (2002)	-۱۱/۵۷	۰/۹۱	۰/۶۲	-۰/۶۲
Grasmeijer & Kleinhans (2004)	-۷۶/۸۳	۰/۹۸	۰/۳۹	۰/۶۲
Williams et al. (2004)	۸۶/۶۷	۰/۹۸	۰/۵۳	-۰/۷۲
Soulsby & Whitehouse (2005)	۹۱/۹۱	۱/۰۶	۰/۵۲	۰/۷۱
O' Donoghue et al. (2006)	۵۵/۰۴	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۷۷
Camenen (2009)	۳۰۳/۴۲	۱/۸۷	۰/۵۲	۰/۵۸

^۱ Bosman

جدول (۸) نتایج شاخص‌های آماری برای روابط پیشنهادی جهت پیش بینی طول موج ریبیل.

نوع داده	رابطه	Bias	SI	CC	I _a
آزمایشگاهی	$\frac{\lambda}{A} = 2596.362R_{ed}^{-0.222}R_e^{0.004}$	۰/۳۲	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۹۵
میدانی	$\frac{\lambda}{A} = 25899.362R_{ed}^{0.691}R_e^{-0.580}$	۳/۳۶	۰/۸۳	۰/۶۰	۰/۷۰
آزمایشگاهی و میدانی	$\frac{\lambda}{A} = 7490.281R_{ed}^{0.608}R_e^{-0.432}$	-۰/۹۷	۰/۷۱	۰/۸۹	۰/۹۰

- [7] Camenen, B., "Estimation of the Wave-Related Ripple Characteristics and Induced Bed Shear. Estuarine", Coastal and Shelf Science, Vol. 84, pp. 553-564, 2009.
- [8] Nielsen, P., "Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport", World Scientific, River Edge, N. J. 1979.
- [9] Wikramanayake P. N., Madsen O. S. "Calculation of Movable Bed Friction Factors", Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge Ralph M Parsons Lab for Water Resources and Hydrodynamics, Aug. 1994.
- [10] Inman, D. L., "Wave Generated Ripples in Near Shore Sands", U.S. Army Beach Erosion Board, Technical Memo 100, 1957.
- [11] Miller, M. C., and P. D. Komar, "A Field Investigation of the Relationship between Oscillations Ripple Spacing and the Near-Bottom Water Orbital Motions", Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 50, pp.183-191, 1980.
- [12] Hanes, D. M., V. Alymov, Y. S. Chang, and C. Jette, "Wave-Formed Sand Ripples at Duck, North Carolina", Journal of Geophysical Research, Vol. 106(C10), pp. 22,575-22, 2001.
- [13] Blondeaux, P., "Mechanics of Coastal Forms", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33, pp. 339-370, 2001.
- [14] Faraci, C., and E. Foti, "Geometry, Migration and Evolution of Small-Scale Bed Forms Generated by Regular and Irregular Waves", Coastal Engineering, Vol.47, pp.35-52, 2002.
- [15] Grasmeyer, B. T. and M. G. Kleinhan, "Observed and Predicted Bed forms and Their Effect on Suspended Sand Concentrations", Coastal Engineering, Vol. 51, pp. 351-371, 2004.
- [16] Williams, J.J., P. S. Bell, P. D. Thorne, N. Metje, and L. E. Coates, "Measurement and Prediction of Wave-Generated Suborbital Ripples", Journal of Geophysical Research, Vol.109, 2004.
- [17] Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Doneland, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P. A. E. M. Janssen, "Dynamics and Modeling of Ocean Waves", Cambridge University Press, Vol. 560, 2004.
- [18] O' Donoghue, T., J. S. Doucette, J. J. van der Werf, and J. S. Ribberink, "The Dimensions of Sand Ripples in Full-Scale Oscillatory Flows",

از آنجاکه هدف این تحقیق، ارائه رابطه ای کاربردی هم برای داده‌های آزمایشگاهی و هم داده‌های میدانی می‌باشد، رابطه زیر که با استفاده از مجموع داده‌های آزمایشگاهی و میدانی بدست آمده است، جهت پیش بینی طول موج بدون بعد ریبیل پیشنهاد می‌گردد:

$$\frac{\lambda}{A} = 7490.281R_{ed}^{0.608}R_e^{-0.432} \quad (۱۴)$$

با توجه به جدول (۸) مشخص می‌شود که این رابطه ارائه شده، در تمام شاخص‌های آماری نتایج بهتری نسبت به سایر روابط دارد. برای این رابطه مقدار شاخص اریبی به صفر میل می‌کند و این مسئله در جهت بهبود پیش‌بینی است. شاخص پراکندگی نیز برای رابطه پیشنهاد شده از سایر روابط کمتر است و این مسئله نیز در جهت بهبود پیش‌بینی است. مقدار ضریب همبستگی برای این رابطه بیش از سایر روابط بدست آمده است. مقدار ضریب توافق نیز بیش از سایر روابط است.

۵- مراجع

- [1] Nielsen, P., "Dynamics and Geometry of Wave Generated Ripples", Journal of Geophysical Research, Vol. 86, pp. 6467-6472, 1981.
- [2] Grant, W. D., and O. S. Madsen, "Movable Bed Roughness in Unsteady Oscillatory Flow", Journal of Geophysical Research, Vol. 87, pp. 469-481, 1982.
- [3] Van Rijn, L., "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas", Aqua Publications, The Netherlands, 1993.
- [4] Wiberg, P. L. and C. K. Harris, "Ripple Geometry in Wave Dominated Environments", Journal of Geophysical Research, Vol. 99, pp. 775-789, 1994.
- [5] Grasmeyer, B. T. and M. G. Kleinhan, "Observed and Predicted Bed Forms and Their Effect on Suspended sand Concentrations", Coastal Engineering, Vol. 51, pp. 351-371, 2004.
- [6] Soulsby, R., Whitehouse, R., "Prediction of Ripples Properties in Shelf Seas: Mark1, Predictor", Technical Report TR 150. HRWallingford, UK, 2005.

- Coastal Engineering, Vol. 53, No. 12, pp. 997-1012, 2006.
- [19] Pelletier, J. D., "Controls on the Height and Spacing of Eolian Ripples and Transverse Dunes: A numerical Modeling Investigation", *Geomorphology*, Vol. 105, No.3, pp. 322-333, 2009.
- [20] O'Donoghue, T., "Laboratory Experiments for Wave-Driven Sand Transport Prediction", *Jubilee Conference Proceedings*, 2012.
- [21] Blondeaux, P., "Sediment Mixtures, Coastal Bed Forms and Grain Sorting Phenomena: An Overview of the Theoretical Analyses", *Advances in Water Resources*, Vol. 48, pp. 113-124, 2012.
- [22] Calantoni, J., Landry, B.J. and Penko, A.M., "Laboratory Observations of Sand Ripple Evolution using Bimodal Grain Size Distributions under Asymmetric Oscillatory Flows", In *Proceedings of the 12th International Coastal Symposium*, Plymouth, England. *Journal of Coastal Research*, Vol. 65, pp. 1497-1502, 2013.
- [23] Miles, J., Thorpe, A., Russell, P. and Masselink, G., "Field Observations of Ripple and Megaripple Dynamics in the Nearshore", *Proc. Coastal Dynamics*, pp. 1207-1218, 2013.
- [24] Goldstein, E. B., Coco, G. and Murray, A. B., "Prediction of Wave Ripple Characteristics using Genetic Programming", *Continental Shelf Research*, Vol. 71, pp. 1-15, 2013.