

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

bidokhti@ut.ac.ir

۱- دکتری فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دکتری سازه های دریایی، عضو هیات علمی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

۳- دانشیار گروه فیزیک فضا، 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 ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ 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 پرپود موج روی ریپل (در طی ۸ اجرا) انجام گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و پرپود 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 پرپود موج می‌تواند موجب نامنظم شدن ریپل‌های بستر نیز گردد. هدف این تحقیق، ارائه روابط 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.

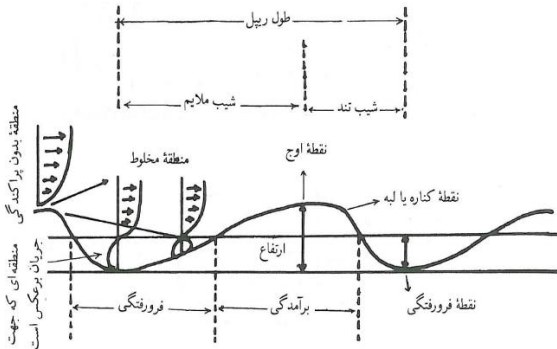
واژگان کلیدی: تغییر شکل بستر، ریپل، مدل فیزیکی، امواج.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۸/۲۸

۱- مقدمه

اختلال، جریان جت به سمت پایین تمایل به ایجاد یک فرورفتگی در مقابل خود و بلند کردن ماسه در یک برآمدگی در آن سویش دارد.



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

وقتی جریان در قله جدا می‌شود، گردابه‌ای در سمت پرسیب ریبیل 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 ریبیل اصلی وجود دارد، دو ریبیل جدید را به وجود می‌آورد که به نوبه خود به عنوان ریبیل‌های "تولید کننده" عمل می‌کنند. تا زمانی که تکه‌های ریبیل‌های شکل گرفته به سمت بیرون پخش می‌شوند، طول موج و ارتفاع ریبیل‌ها خود را تطبیق می‌دهند تا به یک تعادل برسند.

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

در تحقیق حاضر مدلسازی تغییرات بستر یک ساحل ماسه-ای و محاسبه ارتفاع ریبیل‌ها به روش آزمایشگاهی انجام گرفته و سپس ابعاد ریبیل بدست آمده از مدل فیزیکی با روابط تجربی موجود مقایسه شده است. از طریق بررسی ابعاد هندسی ریبیل‌های بستر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی و همچنین استفاده از مجموعه داده بزرگی شامل

شبه سازی 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. ریبیل‌ها معمولاً به دو صورت دیده می‌شوند:

۱- ریبیل‌های نامتقارن^۱ یا ریبیل‌های جریانی که در اثر حرکت جریان آب یا باد بطور یک جهتی درست شده‌اند و شیب دوطرف آن‌ها به یک اندازه نمی‌باشد. ۲- ریبیل‌های متقارن^۲ یا ریبیل‌های موجی که شیب در دو طرف ریبیل به یک اندازه است. ریبیل‌های متقارن به صورت دیواره‌هایی هستند که با فرورفتگی‌هایی از یکدیگر جدا شده و در اثر حرکت امواج تشکیل گردیده‌اند. ریبیل از دو قسمت تشکیل شده است (شکل ۱): اول قسمتی که دارای شیب ملایم^۳ بوده و درخلاف جهت جریان قرار دارد و دوم قسمتی که دارای شیب تند^۴ بوده و درجهت جریان قرار می‌گیرد. نصف ارتفاع یک ریبیل 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 ریبیل از بخش با شیب زیاد آن می‌گردد را نقطه لبه یا کناره^۷ می‌نامند. طول ریبیل عبارت از پایین‌ترین نقطه یک ریبیل تا ریبیل بعدی است که شامل یک بخش با شیب کم و یک بخش با شیب زیاد می‌باشد. تیزی ریبیل^۸ عبارت از نسبت ارتفاع ریبیل بر طول آن می‌باشد که می‌توان توسط آن ریبیل‌های تشکیل شده در محیط‌های آبی را از بادی جدا کرد. ابتدا قبل از جداشدن جریان در قله

¹ Asymmetrical Ripple Mark

² Symmetrical Ripple Mark

³ Stoss Side

⁴ Lee side

⁵ Trough Point

⁶ Summit Point

⁷ Brink Point

⁸ Ripple Steepness

اندازه‌گیری‌ها در فواصل ۲/۵ سانتی متری در عرض 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 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.

داده‌های آزمایشگاهی و میدانی دیگر محققین، و با بهره‌گیری از 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 دپوی 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

² Williams & Kemp

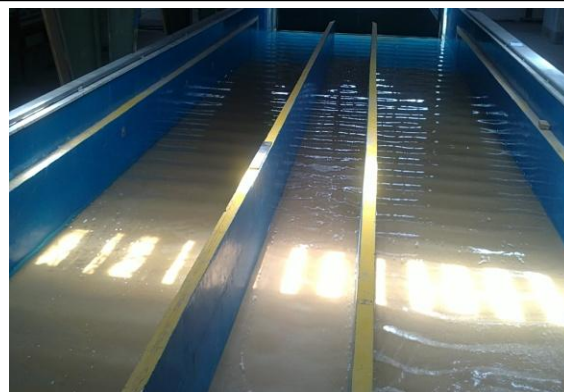
¹ Bed Profiler

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.

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 نیافته‌اند. 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 شده‌اند، 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
$H_0 = 0.105 \text{ m}$ $T = 1/8 \text{ s}$	۰/۶۱	۶/۵۴
$H_0 = 0.1075 \text{ m}$ $T = 1/8 \text{ s}$	۰/۷۲	۷۷/۷

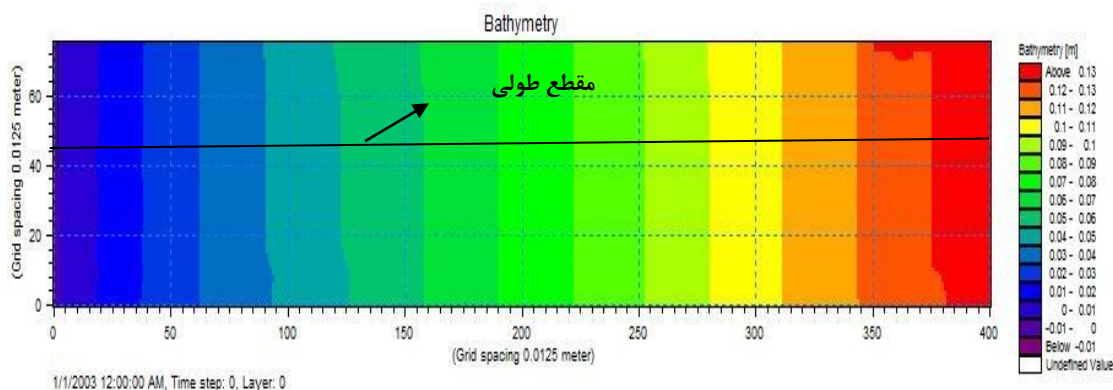


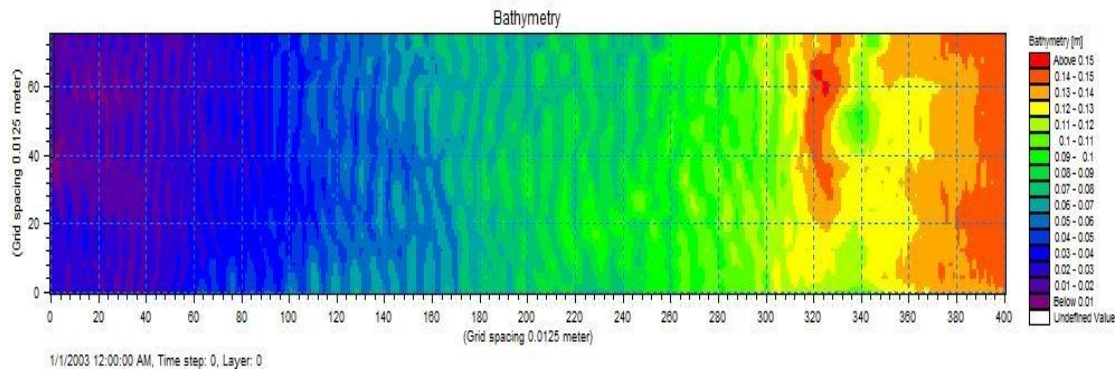
شکل (۳) فلوم آزمایشگاهی در حال آزمایش.

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





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.

دیگر، و با بهره گیری از نرم افزار SPSS رابطه ای را برای پیش بینی ارتفاع ریپل ها به دست آوردیم.

در این تحقیق به منظور بدست آوردن روابطی کاربردی جهت پیش بینی ابعاد ریپل ها، 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. داده های ریپل مورد استفاده در این تحقیق شامل داده های امواج منظم و نامنظم آزمایشگاهی و نیز اندازه گیری های 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 می باشد.

بررسی های اولیه نشان داد که تفاوت قابل ملاحظه ای بین داده های بدست آمده از فلوم موج و تونل موج وجود ندارد. لازم به ذکر است که تست های آزمایشگاهی در محدوده مشابهی از اندازه ذرات رسوبی مشاهده شده در اندازه گیری های میدانی انجام گرفته اند.

هندسه ریپل های ماسه ای ناشی از موج توسط افراد مختلفی مورد بررسی قرار گرفته اند. در اغلب این بررسی ها، هدف پیدا کردن پارامتر بدون بعدی بوده است که بهترین همبستگی را با داده های پارامترهای ریپل داشته باشد و به همین منظور یک منحنی به عنوان یک رابطه پیش بینی کننده به داده ها برازش شده است.

برای جریان های با شدت کم، بستر به صورت یک مجموعه ریپل دویبعی منظم با قله های 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 می یابد، ارتفاع و طول موج ریپل ها افزایش می یابد در صورتی که تیزی ریپل در مقدار اولیه اش ثابت می ماند. در جریان های با شدت بازم بیشتر، تیزی ریپل کاهش می یابد. در واقع طول موج ریپل در مقداری مشابه باقی می ماند درحالی که ارتفاع ریپل کاهش یافته، قله ها گردتر شده و ریپل ها سه بعدی می شوند.

ارتفاع و طول موج ریپل های بستر با افزایش ارتفاع و پریود موج، افزایش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع موج، بخش بیشتری از رسوبات ناحیه عمیق برداشته شده و به ناحیه کم عمق منتقل شده است. افزایش پریود موج می تواند موجب نامنظم شدن ریپل های بستر نیز گردد. اغلب مشاهده می شود که ریپل های شکل گرفته در مناطق عمیق فلوم، مرتب تر و کوچک تر از ریپل های مناطق کم عمق می باشند.

از طریق بررسی ابعاد هندسی ریپل های بستر با استفاده از نتایج مدل فیزیکی و همچنین استفاده از مجموعه داده بزرگی شامل داده های آزمایشگاهی و میدانی محققین

جدول (۳) خلاصه داده های ریپل موجود از تست های 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

$$\frac{\psi}{S_*} \leq 3.0 \quad (۴)$$

$$\frac{\eta}{A} = 0.27 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-0.5}$$

$$\frac{\psi}{S_*} > 3.0 \quad (۵)$$

$$\frac{\eta}{A} = 0.52 \left(\frac{\psi}{S_*} \right)^{-1.1}$$

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.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (۶)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (۷)$$

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:

$$\frac{2\eta}{d_0} = 0.275 - 0.022\sqrt{\psi} \quad (۱)$$

- برای داده‌های میدانی:

$$\frac{2\eta}{d_0} = 21\psi^{-1.85} \quad (۲)$$

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 گرنت^۱ (۱۹۷۶) به صورت زیر بیان شد:

(۳)

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

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:

³ Agreement Index

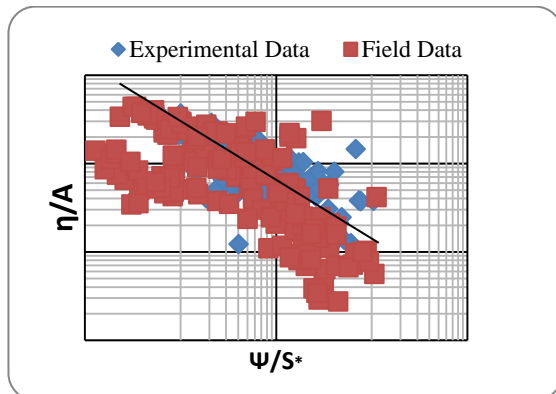
⁴ Correlation Coefficient

⁵ Scatter Index

¹ Madsen & Grant

² Komar & Miller

شاخص‌های آماری مجدداً برای هر سه رابطه بدست آمده محاسبه شدند.



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

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

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

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 پیش‌بینی ارتفاع ریپل، در جدول (۵) آورده شده‌اند. در مرحله بعد به منظور بدست آوردن رابطه ای با دقت بیشتر جهت پیش‌بینی 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

جدول (۵) نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف ارائه شده جهت پیش‌بینی 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	۰/۲۳
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 پیش‌بینی 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

در هنگام مطالعه طول موج ریپل، بگنولد (۱۹۴۶) و سپس کارستنز و همکارانش (۱۹۶۹)، موریج و کمفیوس^۱ (۱۹۷۲)، دینگلر^۲ (۱۹۷۴) و برینر^۳ (۱۹۸۰) تنها وابستگی به عدد موبیلیتی را پیشنهاد دادند. به ویژه آن‌ها پیشنهاد دادند که برای $\psi < 20$ ، 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:

(۱۱)

$$\frac{\lambda}{A} = 2.2 - 0.345\psi^{0.34}$$

- 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 فاراسی 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 فاراسی 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 $R_{e\delta}$ و R_{ed} وجود دارد که $R_{e\delta}$ برابر با $\sqrt{2R_e}$ می‌باشد.

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 می‌دهند 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 می‌دهند. از آنجاکه هدف این تحقیق، ارائه رابطه‌ای کاربردی برای هردو داده‌های آزمایشگاهی و میدانی می‌باشد، رابطه زیر که با استفاده از مجموع داده‌های آزمایشگاهی و میدانی بدست آمده است، جهت پیش بینی ارتفاع بدون بعد ریپل پیشنهاد می‌گردد:

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

با توجه به جدول (۶) مشخص می‌شود 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 می‌کند که نشان می‌دهد 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 می‌دهد، 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 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

¹ Mogridge & Kamphuis

² Dingler

³ Brebner

⁴ Blondeaux

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 بین طول موج ریپل ارائه کردند:

(۱۳)

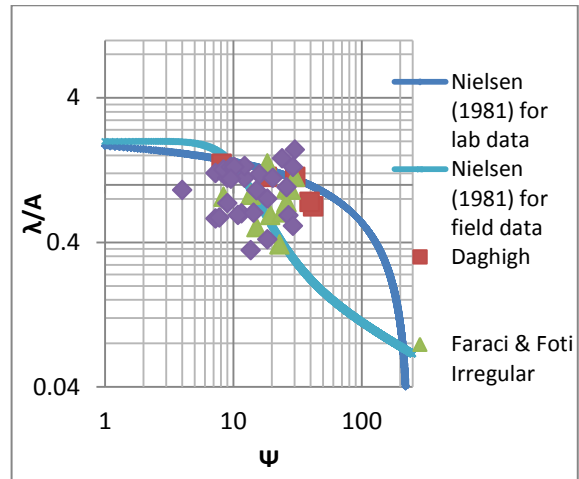
$$\frac{A}{\lambda} = \frac{0.08291}{R_{ed}} R_e^{0.68}$$

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.

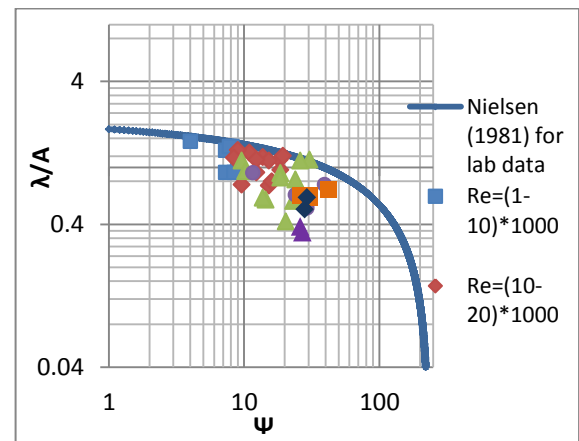
نتایج شاخص‌های آماری برای روابط مختلف ارائه شده تاکنون جهت پیش بینی طول موج ریپل، در جدول (۷) آورده شده اند. در محاسبه این شاخص‌های آماری از مجموع داده‌های آزمایشگاهی و میدانی استفاده شده است.

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.

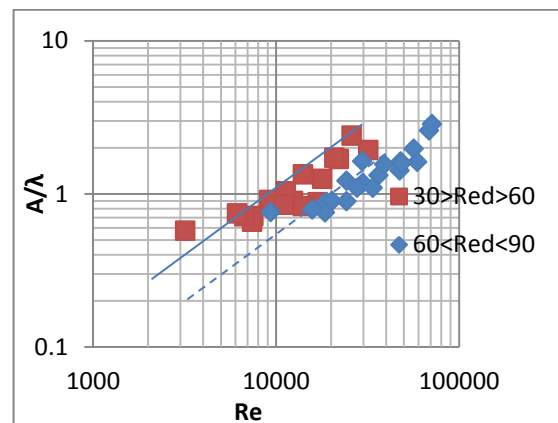
روابط بدست آمده در هر حالت و شاخص آماری آن‌ها در جدول (۸) آمده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند



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.

^۱ Bosman

رابطه اصلاح شده با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی باهم، که در واقع به سبک رابطه ارائه شده توسط فارسی و فوتی (۲۰۰۲) است، در تمام شاخص‌ها بهترین نتیجه را دارد. هر سه رابطه پیشنهادی نتایج بهتری را نسبت به رابطه ارائه شده توسط فارسی و فوتی (۲۰۰۲) نشان می‌دهند.

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

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

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

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 توافقی 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.

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:

(۱۴)

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

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 ضریب توافقی به صفر میل می‌کند و این مسئله در جهت بهبود پیش‌بینی است. شاخص پراکندگی نیز برای رابطه پیشنهاد شده از

- [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", *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.
- [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] Grasmeijer, B. T. and M. G. Kleinhans, "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.
- [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] Grasmeijer, B. T. and M. G. Kleinhans, "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.