بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنّی
گروه مهندسی عمران
گرایش سازه های دریایی

بررسی تاثیر اشکال بستر بر ضریب انتقال رسوب با در نظر گرفتن اندرکنش موج - جریان

از
مهسا انصاری

استاد راهنما:
دکتر میراحمد لشته نشائی

استاد مشاور:
دکتر میرعبدالحمید مهرداد

مرداد 1392

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که پس از ایزد منان ، همواره مشوق و پشتیبانم در همه ی مراحل زندگی بوده اند.

سپاسگزاری

سپاس پروردگار متعال را که هر آنچه دارم از اوست.

بدین وسیله مراتب سپاس و قدردانی فراوان خود را از استاد راهنمای گرانقدر و ارجمند جناب آقای دکتر لشته نشایی و استاد مشاور گرامی جناب آقای دکتر مهرداد که وقت و تجربه ارزشمند خود را بی منت، در تهیه این پایان نامه در اختیارم قرار دادند و با راهنمایی های مدبرانه، سختی های این راه را بر من هموار نمودند اعلام می دارم.

فهرست مطالب

چکیده فارسی ژ

چکیده انگلیسی س

فصل اول : کلیات **1**

1-1- مقدمه 2

2-1- بیان مسئله 4

3-1- اهداف تحقیق 5

4-1- چگونگی انجام تحقیق 6

5-1- ساختار پایان نامه 6

فصل دوم : مبانی تئوری **7**

2-1- ساختار فصل 8

2-2- مقدمه ای بر حرکت ذرات رسوبی 8

2-3- معرفی امواج 13

2-3-1- طبقه بندی امواج بر مبنای دوره تناوب 15

2-3-2- طبقه بندی امواج بر مبنای عمق 16

2-4- اشکال بستر در ناحیه ساحلی 17

2-4-1- اشکال بستر تحت اثر جریان 17

2-4-2- اشکال بستر تحت اثر امواج 20

2-4-3- اشکال بستر تحت اثر اندرکنش موج- جریان 22

2-4-3-1- ترکیب موج و جریان 22

2-4-3-2- انتقال رسوب توسط موج-جریان 23

2-4-3-3- تنش برشی بستر ناشی از اندرکنش موج-جریان 24

2-4-3-4- طبقه بندی اشکال بستر 24

2-4-3-5- لایه مرزی 26

2-5- زبری موثر بستر 26

2-5-1- زبری بستر در حالت جریان (k_{cs}) 27

2-5-1-1- تعیین k_s بر اساس شکل بستر 27

2-5-1-2- تعیین k_s برای جریانها بر اساس نوع جریان 29

2-5-2- زبری بستر در حالت امواج 30

2-5-3- زبری بستر در حالت اندرکنش موج-جریان 31

2-6- بررسی پارامترهای حرکت ذرات رسوب تحت اثر جریان 31

2-6-1- اثرات جریان بر روی حرکت رسوبات 31

2-6-2- تعیین ضریب انتقال رسوب تحت اثر جریان 33

2-7- بررسی پارامتر های حرکت ذرات رسوب تحت اثر امواج 39

2-7-1- لایه مرزی تحت اثر امواج 39

2-7-2- تعیین ضریب انتقال رسوب تحت اثر امواج 40

2-8- بررسی پارامتر های حرکت ذرات رسوب تحت اثر اندرکنش موج-جریان 47

2-8-1- تعیین سرعت حرکت ذرات رسوب 47

2-8-2- تعیین ضریب انتقال رسوب 48

فصل سوم : ارائه مدل ریاضی **50**

3-1- ساختار فصل 51

2-3- بررسی های آزمایشگاهی 51

3-3- ارائه مدل ریاضی 54

3-3-1- مدل ریاضی ارائه شده مبتنی بر تحقیقات صورت گرفته 54

3-3-1-1- ساختار مدل 55

3-3-1-2- هیدرودینامیک مدل 56

3-3-1-3- انتقال رسوب 62

3-3-1-4- تحولات در پروفیل ساحل 66

3-3-1-5- نحوه راه اندازی برنامه دیوار ساحلی 69

3-3-1-6- بررسی نتایج 70

3-3-2- ایده اصلی در مدل ریاضی تغییر یافته 72

فصل چهارم : ارائه نتایج و پیشنهاد ها **77**

4-1- ساختار فصل 78

4-2- ارائه نتایج 78

4-2-1- ارائه نتایج حاصل از بررسی تئوریکی اثرات جریان بر ذرات بار بستر 78

4-2-2- ارائه نتایج حاصل از بررسی تئوریکی اثرات امواج بر ذرات بار بستر 81

4-2-3- ارائه نتایج حاصل از مطالعه اثرات اندرکنش موج-جریان بر روی تغییرات پروفیل بستر 87

4-3- جمع بندی و نتیجه گیری 97

4-4- پیشنهادها 97

مراجع **98**

فهرست اشکال

شکل (2-1) دیاگرام نیروهای وارد بر ذره رسوبی برای حرکت 9

شکل (2-2) منحنی شیلدز برای تشخیص زمان حرکت ذره رسوب با قطر D 12

شکل (2-3) اجزای موج 14

شکل (2-4) طبقه بندی امواج دریا بر حسب دوره تناوب و انرژی نسبی آن 15

شکل (2-5) روند فرسایش و رسوبگذاری حرکت خاکریز ، تحت اثر جریان 18

شکل (2-6) طبقه بندی ون راین برای اشکال بستر تحت اندرکنش موج – جریان 25

شکل (2-7) پروفیل سرعت جریان و ضخامت لایه مرزی کف 32

شکل (2-8) دیاگرام نیروهای وارد بر ذرات رسوبی تحت اثر جریان افقی 33

شکل (2-9) دیاگرام توزیع سرعت جریان در بستر 35

شکل (2-10) پروفیل توزیع غلظت رسوبی 39

شکل (2-11) نمودار تعیین پارامتر شیلدز بحرانی برای امواج 43

شکل (2-12) حرکت و جابجایی المان آب نزدیک کف توسط یک حرکت رفت و برگشتی 45

شکل (2-13) پروفیل توزیع سرعت توسط یک موج از کف تا سطح 45

شکل (2-14) نمودار تعیین پارامتر بحرانی شیلدز، تحت اثر اندرکنش موج – جریان 48

شکل (3-1) مشخصات مخزن و جزئیات تشکیل دهنده آزمایش و مشخصات دیوار و جزئیات تشکیل دهنده آن..... 53

شکل (3-2) (a) طیف امواج برخورد کننده و منعکس شده و (b) ضریب انعکاس در پای دیوار ساحلی 54

شکل (3-3) منحنی گوسین برای سرعت افقی ذرات در مجاورت دیوار ساحلی 59

شکل (3-4) انحراف منحنی پی در اف برای سرعت افقی ذرات در مجاورت دیوار ساحلی 60

شکل (3-5) محاسبه ی مقدار رسوبات جابجا شده ، بر اساس سری های زمانی سرعت 63

شکل (3-6) محاسبه ی جابجایی های ذرات رسوب بر اساس تابع توزیع احتمال افقی 65

شکل (3-7) تقسیم بندی پروفیل ساحل به تعدادی عناصر مجزا 66

شکل (4-1) روند تغییرات ضریب انتقال رسوب بر حسب شیب بستر و قطر ذرات 79
شکل (4-2) تغییرات در نرخ انتقال ذرات بار بستر بر حسب شیب بستر و قطر ذرات 79
شکل (4-3) تغییرات ضخامت لایه مرزی بر حسب شیب بستر و قطر ذرات 80
شکل (4-4) تغییرات مقدار سرعت حرکت ذرات بر حسب ارتفاع موج 81
شکل (4-5) تغییرات مقدار ضریب انتقال رسوب برحسب ارتفاع موج 82
شکل (4-6) تغییرات مقدار غلظت ذرات بستر برحسب ارتفاع موج 83
شکل (4-7) تغییرات مقدار نرخ انتقال ذرات بار بستر برحسب ارتفاع موج 84
شکل (4-8) روند تغییرات ارتفاع ریپل های بستر برحسب ارتفاع موج 84
شکل (4-9) روند تغییرات طول ریپل های بستر برحسب ارتفاع موج 85
شکل (4-10) نمودار تغییرات نرخ حجمی انتقال ذرات با قطر متوسط 0.5 mm بر حسب ارتفاع موج 86
شکل (4-11) بررسی روند تغییرات تراز بستر برای ذرات ریز دانه بعد از 120 دقیقه طوفان (S1W1) 89
شکل (4-12) بررسی روند تغییرات تراز بستر برای ذرات ریز دانه بعد از 120 دقیقه طوفان (S2W2) 91
شکل (4-13) بررسی روند تغییرات تراز بستر برای ذرات ریز دانه بعد از 120 دقیقه طوفان (S3W3) 92
شکل (4-14) بررسی روند تغییرات تراز بستر برای ذرات درشت دانه بعد از 120 دقیقه طوفان (S1W1) 93
شکل (4-15) بررسی روند تغییرات تراز بستر برای ذرات درشت دانه بعد از 120 دقیقه طوفان (S2W2) 94
شکل (4-16) بررسی روند تغییرات تراز بستر برای ذرات درشت دانه بعد از 120 دقیقه طوفان (S3W3) 95

فهرست جداول

جدول (2-1) طبقه بندی ون راین برای اشکال بستر تحت اثر جریان تنها 18

جدول (3-1) توصیف متغیرهای ریاضی برای ذراتی با قطر متوسط 0.5 میلی متر 74

جدول (3-2) نتایج بررسی تئوریکی اثرات اندرکنش موج-جریان در شیب 1/18 بستر 74

جدول (3-3) نتایج بررسی تئوریکی اثرات اندرکنش موج-جریان در شیب 1/12 بستر 75

جدول (3-4) طبقه بندی اشکال بستر تحت تاثیر اندرکنش موج – جریان 76

جدول (4-1) بررسی اثرات جریان بر پارامترهای مهم حرکت ذرات در لایه مرزی 79

جدول (4-2) بررسی روند تغییرات نرخ حجمی انتقال رسوب و ضریب انتقال ، بر حسب ارتفاع موج 86

جدول (4-3) اطلاعات طیف های امواج بکار گرفته شده در آزمایش دیوار ساحلی 87

جدول (4-4) مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی برای d_{50}=0.5 mm ,Wd= 0.05 m 89

جدول (4-5) مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی برای d_{50}=0.5 mm ,Wd= 0.10 m 91

جدول (4-6) مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی برای d_{50}=0.5 mm ,Wd= 0.15 m 92

جدول (4-7) مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی برای d_{50}=1.5 mm ,Wd= 0.05 m 93

جدول (4-8) مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی برای d_{50}=1.5 mm ,Wd= 0.10 m 94

جدول (4-9) مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی با مدل ریاضی برای d_{50}=1.5 mm ,Wd= 0.15 m 95

فهرست علائم اختصاری

پارامتر بی بعد ذرات رسوب	D_*
قطر متوسط ذرات بستر	d_{50}
شتاب گرانش	g
ارتفاع مشخصه موج	H_s
عمق آب	h
گرادیان خط انرژی	I
شیب بستر دریا	β
دبی انتقال رسوب در واحد عرض	q_b^*
دانسیته نسبی	s
چگالی ذرات آب	ρ
چگالی ذرات رسوب	ρ_s
پارامتر بی بعد رژیم انتقال	T
سرعت برشی جریان در بستر	U_c^*
سرعت برشی بحرانی جریان در بستر	U_{rc}^*
تنش برشی ناشی از جریان در بستر	τ_{bc}
تنش برشی بحرانی در بستر	τ_{bcr}
پارامتر شیلدز ناشی از جریان	θ_c
حداکثر نرخ غلظت ذرات رسوب	C_o
مقدار غلظت مرجع ذرات در بستر	C_a

ضریب شزی جریان	C
ارتفاع ذره از کف بستر دریا	z
پارامتر موثر شیلدز	θ'
ارتفاع ستون آب	L_s
طول موج اولیه	L
طول موج بعد از برخورد موج با جریان	L'
فرکانس زاویه ای امواج	σ
زمان	t
ضریب انعکاس	k_r
تغییر فاز ناشی از انعکاس	θ_t
زاویه فاز اولیه برای امواج القایی	ε
پارامتر وابسته به نوع رژیم جریان	z_o
طول اشکال بستر در لایه مرزی	λ
ارتفاع اشکال بستر در لایه مرزی	Δ
ضخامت لایه مرزی (لایه بار بستر)	δ_b
حداکثر سرعت اربیتالی ذرات در مرز لایه مرزی	$\hat{U}s$
حداکثر جابجایی افقی ذرات آب در مرز لایه مرزی	$\breve{A}s$
پارامتر بی بعد حرکت ذرات	Ψ
سرعت برشی ناشی از امواج در بستر	U_{*w}
سرعت برشی بحرانی ناشی از امواج در بستر	U_{*cr}
تنش برشی بستر ناشی از امواج	τ_{bw}

تنش برشی بحرانی بستر ناشی از امواج	τ_{bcr}
پارامتر شیلدز ناشی از امواج	θ_w
پارامتر بحرانی شیلدز ناشی از امواج	θ_{cr}
شماره موج	k
ثابت عددی بگنولد	k_B
زبری ظاهری بستر	k_a
زبری موثر بستر ناشی از جریان	k_{sc}
زبری ناشی از ذرات بستر	k'_{sc}
زبری ناشی از اشکال بستر	k''_{sc}
زبری ناشی از دندانه های بستر	k''_{sr}
زبری ناشی از وجود خاکریز در بستر	k''_{sd}
زبری ناشی از تپه های ماسه ای	k''_{ssw}
زبری موثر ناشی از امواج	k_{sw}
زبری ناشی از ذرات بستر	k'_{sw}
زبری ناشی از اشکال بستر	k''_{sw}
ضریب اصطکاک جریان	f_s
ضریب اصطکاک موج	f_w
نیروی برشی ناشی از تنش ذرات در بستر	F_s
نیروی برشی ناشی از تنش اشکال بستر	F_f
ضریب اصطکاک	f
ضریب اصطکاک جریان تحت اثر تنش برشی ناشی از ذرات بستر(τ')	f'

ضریب اصطکاک جریان تحت اثر تنش برشی ناشی از اشکال بستر("τ)	f''
عمق آب در بستری با تنش برشی 'τ	h'
عمق آب در بستری با تنش برشی "τ	h''
ثابت فن کارمن	k_*
سرعت برشی ناشی از اندرکنش موج و جریان در بستر	U_{*cw}
سرعت برشی بحرانی ناشی از اندرکنش موج و جریان در بستر	U_{*cr}
تنش برشی بستر ناشی از اندرکنش موج و جریان	τ_{bcw}
تنش برشی بحرانی بستر ناشی از اندرکنش موج و جریان	τ_{bcr}
پارامتر شیلدز تحت اثر اندرکنش موج با جریان	θ_{cw}
پارامتر بحرانی شیلدز در حالت اندرکنش موج - جریان	θ_{cr}

چکیده

بررسی تاثیر اشکال بستر بر ضریب انتقال رسوب ، با در نظر گرفتن اندرکنش موج – جریان

مهسا انصاری

بخش وسیعی از خساراتی که به تاسیسات و سازه های ساحلی وارد می شود ناشی از فرایند فرسایش و رسوبگذاری سواحل می باشد. به همین دلیل بررسی روند تغییرات مورفولوژیکی تراز بستر سواحل ماسه ای از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مطالعه، ضریبی تعریف شد که بتواند نسبتی دقیق تر از سرعت حرکت ذرات رسوب به ذرات آب را ارائه بدهد. به کار گیری این ضرایب در مدل ریاضی، می تواند در محاسبه روند اثراتی که رسوبات جابجا شده بر تغییرات تدریجی پروفیل سواحل می گذارند موثر باشد و امکان پیش بینی تغییرات تراز بستر سواحل در مقطع عرضی، به نحوی که با واقعیت تحولات پروفیل طبیعی سواحل سازگاری بیشتری داشته باشد فراهم شود. با استفاده از معادلات حرکتی ون راین و همچنین با در نظر گرفتن تنش برشی ناشی از نیروی موج، سعی برآن شد که تخمین سرعت حرکت ذرات رسوب در لایه مرزی تحت اثر اندرکنش موج - جریان، مستقل از حل معادلات پیچیده حرکت ذرات رسوب در لایه مرزی بدست آید. هدف اصلی از محاسبه این ضرایب انتقال جدید ، بکار بردن آنها در برنامه مدل سازی ریاضی به منظور دستیابی به نتایج بهتر در شبیه سازی تغییرات مقطع عرضی سواحل می باشد. این در حالی است که به منظور اثبات درستی و اعتبار ضرایب انتقال بدست آمده، مقادیر آن با نتایج آزمایشگاهی معتبر، مقایسه شد و تطابق بسیار خوبی به ویژه درعمق های کم آب پای دیوار ساحلی مشاهده گردید.

کلید واژه : ضریب انتقال رسوب، جریان دو فازه، پروفیل بستر دریا، امواج، جریان

Abstract

Investigation of the effects of bed forms, on sediment transport coefficient by taking the interaction of wave-current into account

Mahsa Ansari

A large part of the damages to the facilities and coastal structures can be caused by erosion and deposition process. Therefore, predicting the morphological bed level changes of sandy beaches is important. In this study, a new sediment transport coefficient (STC) was defined. This new STC can offer the precise ratio of sediment velocity to the velocity of water particles. Applying this new coefficient in the modeling program, can change the calculation process of sediment movements effectively and show these gradual changes in beach profiles. By using STC in the program, it can be more possible to predict the bed level changes with more accuracy and reach to a better adjustment with the changes of a natural beach profile. By using the model of Van Rijn and applying the wave shear stress in the mathematical formulation, theoretical results of sediment movements were modified. These conclusions were used to estimate the sediment velocity under the effects of waves and currents. In order to obtain better results in simulating the cross shore profile, this new STC was calculated and used in the modeling program. Also, reliable experimental results are essentially required for demonstrating the accuracy and validity of the presented model. Finally, the results of this comparision represented an acceptable fitness between the experimental and theoretical results especially under shallow depths of water in front of a seawall.

KEYWORDS: Sediment transport cofficient, two phase flow, seabed profile, waves, current.

فصل اول

کلیات

1-1- مقدمه

سواحل [1] روی سطح کره زمین جزء مهمترین سیستم های فیزیکی و دینامیکی به حساب می آیند. تمامی سواحل دریایی توسط امواج و ترکیبات رسوب گذاری[2] احاطه شده اند و تشکیل خط ساحلی[3] از رسوباتی بوده است که توسط امواج حمل، و بعد در ساحل رها شده است [1] .

بخش وسیعی از خسارات وارده به تاسیسات و سازه های ساحلی، ناشی از مسائل مربوط به فرایند فرسایش [4] و رسوبگذاری در سواحل می باشد. از این رو مبحث تخمین نرخ نقل و انتقالات ساحلی از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار است. بدلیل بروز مشکلات فراوان در اثر پدیده فرسایش و رسوبگذاری و گستردگی دامنه تخریب آن، بررسی و تخمین نرخ انتقال رسوب، به عنوان عامل اصلی تغییرات موفولوژیکی سواحل ماسه ای، امری مهم و اجتناب ناپذیر است.

به این ترتیب، نقل و انتقالات رسوبی بر تغییر شکل بستر سواحل و ویژگی های آنها نقش موثری ایفا می کنند. وجود منابع رسوب کافی و تجمع این ذرات در ساحل بر اثر امواج و بودجه رسوبی مثبت، شرط اساسی برای برقرار ماندن و حیات یک ساحل می باشد [1] .

امواج وارده به سواحل را در بازه امواج ناشی از باد که بطور مستقیم وارد ساحل می شوند، تا امواج ناشی از جذر و مد [5] که ناشی از نیروی جاذبه خورشید و ماه ایجاد می شوند، می توان قرار داد. اکثر سواحل بر اثر امواج ثقلی ساخته شده اند و انرژی این امواج و شیب بستر دریا بر روی میزان و مکان انباشتگی رسوبات در مقطع عرضی سواحل اثر مستقیم دارد [1] .

---

[1] Beaches
[2] Sedimentation
[3] Shoreline
[4] erosion
[5] Tidal currents

یک تعریف ساده از ساحل با ارائه پروفیل یا مقطع عرضی آن بدست می آید. این پروفیل مقادیر ارتفاع، عرض، شیب و حجم یک ساحل را نشان می دهد که در طول ساحل و با گذشت زمان در حال تغییر است. جریان های برگشتی که در اثر شکست امواج و حرکت چرخشی آنها به سمت دریا ایجاد می شوند، حجمی از رسوبات کنده شده از بستر را در جهت عمود بر ساحل به سمت دریا انتقال می دهند و باعث فرسایش و تغییرات تدریجی در شکل مقطع عرضی سواحل می شوند [1] .

با توجه به این موضوع که در کشور ما داده های ساحلی کاملی وجود ندارد، تعیین دقیق مقدار رسوبات ساحلی انتقال یافته، از روشهای عددی و حل معادلات حاکم بر موج، جریان و رسوب انجام می شود.

تاکنون از نرم افزارهای مختلفی برای تخمین مقدار رسوبات انتقال یافته در جهت موازی و عمود بر ساحل استفاده شده است که نتایج حاصل از آنها می تواند روند تغییرات طولی و عرضی سواحل را بطور تقریبی پیش بینی کند. براساس این نتایج، هرچه به سمت دریا پیش می رویم، اندازه قطر متوسط ذرات رسوبی کاهش می یابد و این روند باعث فرسایش ساحل و دور شدن ذرات رسوب در جهت عمود بر آن می شود.

در تمامی مدل های ریاضی که تاکنون برای شبیه سازی تغییرات مقطع عرضی سواحل استفاده شده است، فرض بر این بود که ذرات رسوب با سرعتی معادل با سرعت ذرات آب در لایه مرزی در حرکت هستند. این فرض موجب سهولت و خلاصه شدن روند محاسبات می شد. اما با استفاده از مفهوم جریان های دو فازه[1]، می توان مقادیر دقیقتری از این نسبت را در شرایط مختلف اندرکنش موج – جریان[2] بدست آورد و در نرم افزارهای مدل سازی بکار گرفت. مقادیر ضریب انتقال رسوب بر اساس معادلات حاکم بر حرکات رسوب در لایه مرزی و نیروهای وارد بر ذرات، تحت اثر جریان، امواج و اندرکنش موج و جریان مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر این ضرایب انتقال رسوب[3] به ازای ارتفاع های مختلف موج و مقادیر متنوع از شیب بستر، بدست آمد.

[1] Two phase flow
[2] Interaction of wave-currents
[3] Sediment transport coefficient

1-2- بیان مسئله

تعیین مسیر حرکت ذرات رسوب تحت اثر نیروی ناشی از شکست موج در پیش بینی تغییرات مورفولوژیکی سواحل در طول زمان (فرسایش و رسوبگذاری) ضروری می باشد. بهمین دلیل، این مبحث بعنوان یکی از موضوعات مهم در علم مهندسی سواحل همواره مورد بحث قرار گرفته است. در این تحقیق ابتدا مدل ون راین[1] در خصوص حرکت ذرات رسوب در لایه مرزی[2] مورد مطالعه قرار گرفت.

این روش تحلیلی با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر ذرات رسوبی در بستر، معادلات حرکت ذرات بستر را در دو جهت قائم و افقی در نظر می گیرد. سپس با حل معادلات حرکت و اعمال شرایط مرزی[3] مناسب، سرعت حرکت ذره و میزان ارتفاع و طول پرش آنها، بر اساس قطر ذرات، چگالی نسبی[4] و پارامتر بی بعد برش بستر[5] بدست می آید.

اما این مدل تحلیلی فقط سرعت ذرات رسوب را تحت اثر یک جریان افقی مورد مطالعه قرار می دهد و بدست آوردن فورمول هایی که بتواند سرعت ذرات رسوبی را تحت اثر توام موج و جریان نشان دهد، نیاز به اعمال نیروهای بیشتر و حل معادلات پیچیده تر دارد.

در این مطالعه، بمنظور بررسی هرچه بهتر مقادیر ضریب انتقال رسوب تحت اثر اندرکنش موج - جریان، تغییراتی در جنس تنش برشی بستر اعمال شد تا اثر نیروی موج نیز به سیستم وارد شود و سرعت ذرات رسوب و ذرات آب در لایه مرزی تحت اثر توام موج و جریان، بدون نیاز به حل معادلات حرکتی پیچیده، بدست آید.

---

1 Van Rijn
2 Boundary Layer
3 Boundary Conditions
4 Specific Density
5 Dimensionless bed-shear stress parameter