



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



## بررسی آزمایشگاهی کاهش ارتفاع موج بر روی لایه لجنی

سیدعباس حق شناس  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

محسن سلطانیپور  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

فرزین صمصامی  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[sahagshenas@dena.kntu.ac.ir](mailto:sahagshenas@dena.kntu.ac.ir)

[soltanpour@kntu.ac.ir](mailto:soltanpour@kntu.ac.ir)

[samsami@dena.kntu.ac.ir](mailto:samsami@dena.kntu.ac.ir)

### مقدمه

رسوبات چسبنده از ذرات بسیار ریز که عموماً در محدوده سیلت (کوچکتر از ۷۰ میکرومتر) تا رس (کوچکتر از ۴ میکرومتر) می باشند، تشکیل یافته‌اند. در بین ذرات این رسوبات نیروهای الکترو-شیمیایی حاکم هستند. این نیروها معمولاً در قیاس با نیروهای ثقلی از مقادیر بالاتری برخوردار بوده و خصیصه پردازای رسوبات را تحت تأثیر فراوان قرار می‌دهند. اما لجن عمدتاً از ذرات کوچکتر از حدود ۲۰ میکرومتر تشکیل یافته که نسبت به ذرات بزرگتر چسبنده‌تر می باشد. اندازه نیروهای بین ذرات تابعی است از بافت کانی شناختی آنها و خصوصیات شیمیایی آب، به خصوص میزان شوری آن. لذا سیلتهای بزرگ در آب شیرین رفتاری شبیه ماسه های ریز غیر چسبنده دارند ولی در محیط اقیانوس ممکن است چسبنده شوند. بر این اساس ذرات رس معمولاً از رودخانه ها به دریا بصورت معلق جابجا می شوند، و می توانند در اثر پدیده لخته شدن به فرم ذرات بزرگتری در آیند. با عبور امواج سطحی از روی بستر تشکیل یافته از ریزدانه‌های لجنی، موجی نیز در فصل مشترک لایه آب و لجن ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر انرژی امواج از طریق اندرکنش با بستر به درون لایه لجنی انتقال می‌یابد و ضخامتی از قسمتهای فوقانی لایه را به حالت سیال درآورده و به نوسان وا می‌دارد. نوسان مذکور به دو پدیده مهم منجر می‌شود؛ کاهش انرژی موج در طول نیمرخ موج و انتقال جرم در لایه لجنی.

نمونه های فراوانی از سواحل لجنی که معمولاً در نزدیکی رودخانه های بزرگ قرار دارند، وجود دارد. از جمله این مناطق دریای آریاکه در ژاپن، خلیج سانفرانسیسکو، سواحل لویزیانای غربی، سواحل غربی شبه جزیره مالزی و سواحل شمالی چین می باشد. شکل ۱ نواحی دارای رسوبات چسبنده در خلیج فارس را نشان می دهد.



شکل ۱: نواحی خلیج فارس با سواحل پوشیده از رسوبات ریزدانه چسبنده

افت ارتفاع موج بر روی سواحل ریزدانه شرایط طراحی را دستخوش تغییرات بسیار می‌کند. عدم توجه به این پدیده در طراحی موج شکن نیمه کاره بندر هندوچان در سواحل خلیج فارس باعث شده است تا پس از گذشت چند سال فیلتر این موج شکن در غیاب لایه محافظ اصلی بدون هیچ صدمه‌ای بر پا بماند. شکل ۲ موج شکن بندر هندوچان را بدون لایه محافظ اصلی نشان می‌دهند که پس از قریب به ده سال آسیبی به آن نرسیده است. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود به استثنای شرایط طوفانی امواج اغلب بدون شکست در این ناحیه مستهلک می‌شوند. در چند دهه اخیر انتشار امواج بر روی بسترهای لجنی از جنبه های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان، کاهش ارتفاع موج به عنوان یکی از اثرات بارز اندرکنش موج - لجن، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (برای مثال Sakakiyama and Bijker, 1989).



شکل ۲: ساحل لجنی و موجشکن بندر هندیجان

در تحقیق حاضر کاهش ارتفاع موج با انجام یک سری بررسی های آزمایشگاهی در فلوم موج بر روی کائولینیت تجاری مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش ها برای ارزیابی مدل عددی اندرکنش موج - لجن به کار گرفته شده است. (Soltanpour *et al.*, 2003)

### استهلاک انرژی موج

ارتفاع امواج عبوری از روی بسترهای لجنی به دلیل زوال انرژی موج در درون لایه لجنی کاهش می یابد. از دیرباز، ماهیگیران و نیز مهندسان سواحل نسبت به اثرات بسترهای لجنی در کاهش انرژی امواج در نواحی ساحلی آگاه بوده اند. در مقاله (Gade (1958) به ناحیه ای لجنی در سواحل مرکزی لویزیانا اشاره شده است که حفره لجنی نامیده می شود و به خاطر کاهش قابل توجه انرژی موج، در حین توفان ها به عنوان پناهگاهی موقت توسط قایق های ماهیگیری مورد استفاده قرار می گیرد. ماهیت این مسأله در حال حاضر مورد توجه مهندسان سواحل نیز واقع شده است و به تازگی پیشرفت هایی جهت احداث سکوهای لجنی در زیر آب و در نواحی فراساحل رخ داده است. کارکرد اصلی این سکوها زوال انرژی موج و کاهش ارتفاع آن از طریق اندرکنش موج و ریزدانه های لجنی است. احداث این سکوها اغلب با انباشتن مصالح لایروبی شده از کانال های دسترسی بنادر صورت می گیرد.

کاهش ارتفاع موج بر روی یک بستر افقی معمولاً با تابع نمایی تخمین زده می شود:

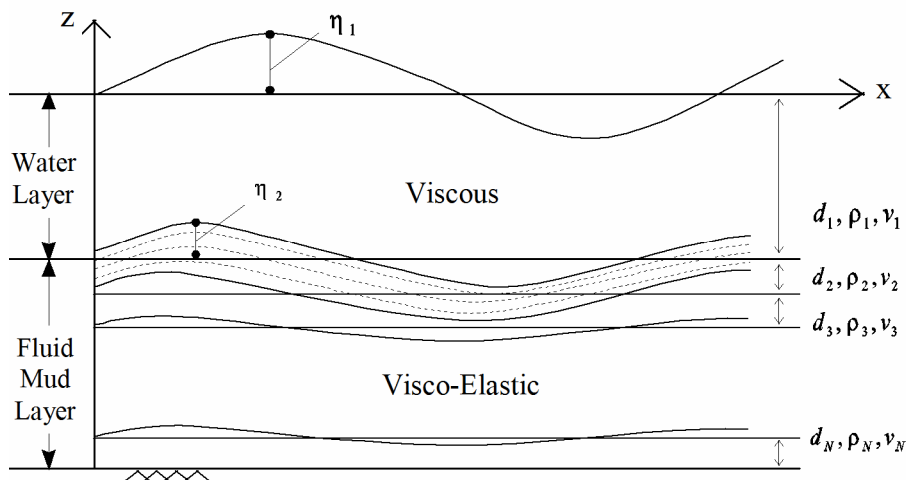
$$H(x) = H_0 \times e^{-k_i x} \quad (1)$$

که  $H_0$  ارتفاع موج اولیه در  $x=0$  و  $k_i$  ضریب کاهش ارتفاع موج می باشد. این رابطه توسط مطالعات تئوری محققین زیادی تأیید شده است که می توان به مواردی چون (Keulegan (1950), Gade (1958) و (Iwasaki and Sato (1972) اشاره کرد. محققان دیگری مانند (Dalrymple and Liu (1978), Maa and Mehta (1990) و (Shibayama and An (1993) نیز نشان داده اند که منحنی نمایی، برازش مناسبی را بر نتایج آزمایشگاهی ارائه می کند. تنوع مدل های رفتاری به کار رفته در این رسوبات بر این واقعیت دلالت دارد که صحت تخمین رابطه کاهش نمایی به معادلات ساختاری مورد استفاده وابستگی ندارد.

### مدل اندرکنش موج و لجن

در این قسمت به بیان مختصری از جزئیات و توضیح ساختار تئوری مدل عددی مورد استفاده پرداخته می شود. پس از فرآیند سیال شدن بخش سطحی بستر لجنی در اثر کنش های موج و تشکیل لایه موسوم به لجن سیال، لایه لجن سیال با موج عبوری از روی بستر اندرکنش متقابل خواهد داشت. پیامد این اندرکنش، زوال انرژی موج و کاهش ارتفاع آن از یک سو و تلاطم و انتقال جرم در لجن سیال از سوی دیگر است. در این مدل اندرکنش موج و لایه لجنی در نظر گرفته می شود. با توجه به ناچیز بودن سرعت ها در فصل مشترک لایه لجن سیال با بخش زیرین، که الاستیک فرض می شود، این تراز به عنوان بستری صلب فرض می گردد. خصوصیات رفتاری لجن سیال از آزمایشات انجام شده بر روی نمونه لجن استخراج شده و پارامترهای رفتاری مدل از آزمایش بر روی نمونه کائولینیت بدست آمده است.

سیستم سیال مورد نظر، شامل آب و لجن سیال، به  $N$  لایه تقسیم می‌شود که لایه آب با  $N=1$  شناخته خواهد شد. مدل چند لایه مذکور نخستین بار توسط Tsuruya et al. (1987) پیشنهاد شد و بعدها توسط محققین دیگری نیز مورد استفاده قرار گرفت. نمای کلی این مدل چندلایه در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳: نمای کلی از مدل چندلایه اندرکنش موج و لجن سیال (پس از Tsuruya et al., 1987)

توزیع قائم خصوصیات لجن سیال می‌تواند در این مدل با اختصاص مقادیر متفاوت برای پارامترها در لایه‌های مختلف اعمال شود. معادلات اصلی حاکم بر این سیستم عبارتند از معادلات خطی شده ناویراستوکس با صرفنظر کردن از شتابهای انتقالی و نیز معادله پیوستگی برای سیال غیرقابل تراکم که به صورت زیر بیان می‌شوند:

معادلات خطی شده ناویراستوکس:

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial x} + \nu_{e,j} \left( \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial z} + \nu_{e,j} \left( \frac{\partial^2 w_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_j}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

معادله پیوستگی برای سیال غیرقابل تراکم:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial w_j}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

در روابط ۲، ۳ و ۴،  $x$  و  $z$  مختصات افقی و قائم بوده و  $u$  و  $w$  مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت اربیتال می‌باشند. اندیس  $j$  نیز بر شماره لایه دلالت دارد. همچنین  $t$ ،  $\rho$  و  $\nu_e$  به ترتیب نماینده زمان، چگالی و لزجت سینماتیکی هستند و  $p$  نماینده فشار دینامیکی است.

حل هارمونیک جداشدنی کمیت‌های  $u_j$ ،  $w_j$  و  $p_j$  به صورت زیر فرض می‌شوند:

$$\hat{u}_j(x, z; t) = u_j(z) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (5)$$

$$\hat{w}_j(x, z; t) = w_j(z) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (6)$$

$$\hat{p}_j(x, z; t) = p_j(z) \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (7)$$

که در آنها  $k$  مقدار مجهول عدد موج مختلط است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = k_r + i k_i \quad (8)$$

همچنین تغییر مکان سطح آب و فصل مشترک لایه‌ها که به  $\eta_j$  نشان داده می‌شود با رابطه زیر معرفی می‌گردد:

$$\eta_j = a_j \exp[i(kx - \sigma t)] \quad (9)$$

در این رابطه  $a_j$  دامنه تغییر مکان  $z$  امین لایه است و کمیت مذکور برای لایه آب با نماد  $\eta_1$  نمایش داده می‌شود. با جایگزین کردن بخشهای حقیقی و موهومی عدد موج مختلط در رابطه فوق معادله سطح آزاد آب به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\eta_j = a_j \exp(-k_i x) \exp[i(k_r x - \sigma t)] \quad (10)$$

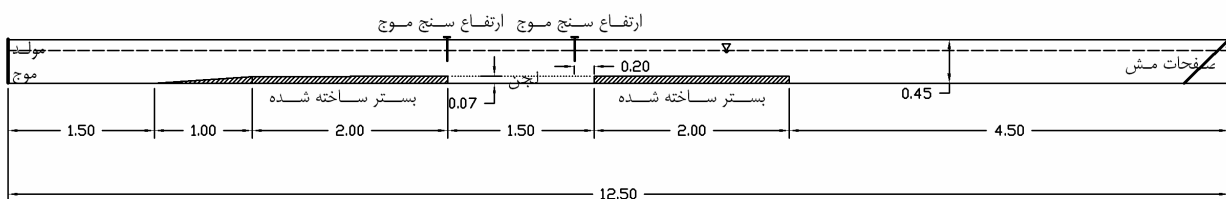
بر این اساس بخش حقیقی عدد موج، طول موج را ارائه می‌دهد،  $L = 2\pi / k_r$ ، در حالیکه بخش موهومی،  $k_i$  نرخ کاهش ارتفاع موج را نمایندگی می‌کند. شایان ذکر است که فرض کاهش نمایی نپربین برای موج استفاده شده است.

## بررسی آزمایشگاهی

در چند دهه اخیر، مجموعه ای از بررسی های آزمایشگاهی و مدل های عددی برای جنبه های مختلف اندرکنش موج-لجن پیشنهاد شده است. در این مطالعه نتایج آزمایشگاهی افت ارتفاع موج بر روی بستر لجنی در فلوم موج ارائه شده و از این اطلاعات جهت بررسی صحت مدل عددی استفاده می شود.

### فلوم موج

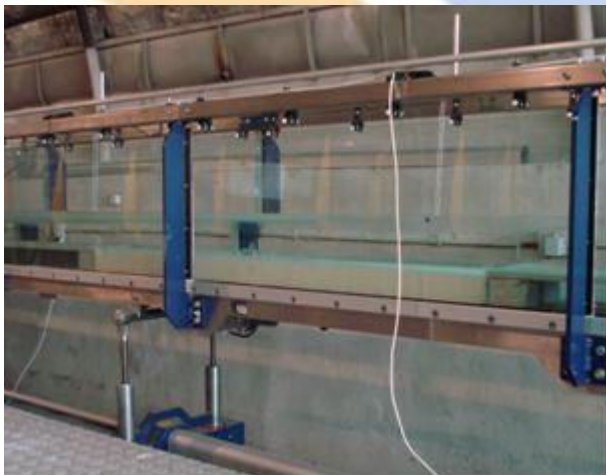
آزمایش ها در فلوم موج آزمایشگاه مدل هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است. ابعاد فلوم ۰/۳۰ متر عرض و ۰/۴۵ متر عمق در مقطع عرضی و طول ۱۲/۵ متر می باشد. از طریق جداره های شیشه ای فلوم روند آزمایش قابل رؤیت می باشد. امواج توسط دستگاه مولد موج از نوع پیستونی در ابتدای فلوم تولید می شود. دستگاه تولید موج با تغییر در حرکت و پریود جابجائی جلو و عقب دریچه، می تواند ترکیبات متفاوتی از ارتفاع و پریود موج و همچنین امواج منظم و نامنظم تولید کند. مقطع آزمایش با استفاده از قطعات سنگی در داخل فلوم تعبیه شده است. مخلوط کائولینیت و آب داخل این مقطع ریخته می شود. شکل ۴ نمایی از چیدمان ساختار آزمایش ها را نشان می دهد. نمایی از فلوم و مقطع آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: چیدمان آزمایش (واحدها در شکل به متر می باشند)

### وسایل سنجش و اندازه گیری

توزیع ارتفاع موج در طول لایه لجن توسط ارتفاع سنج های ثابت الکتریکی که در دو موقعیت بالای دو دیواره فلوم نصب شده اند، ثبت می شود. برای کاهش اثرات اصطکاک دیواره ها، توزیع ارتفاع موج در قسمت میانی و وسط فلوم ثبت می شود. گیج ها با تغییرات موقعیت قائم در تراز آب ساکن کالیبره می شوند. درصد رطوبت در محل لجن نیز با نمونه گیری از قسمت میانی مقطع و انجام آزمایش در آزمایشگاه مکانیک خاک اندازه گیری می شود.



شکل ۵: نمایی از فلوم و مقطع آزمایش

### کائولینیت

کائولینیت تجاری به دلیل شباهت رفتار رئولوژیکی با لجن طبیعی و همچنین سهولت دسترسی و کاربرد، به جای رسوبات بستر در آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع اندازه ذرات کائولینیت مورد استفاده طبق مشخصات سازنده (شرکت صنایع خاک چینی ایران) در بازه  $D_{45} = 2 \mu m$  و  $D_{99} = 20 \mu m$  بوده است. همچنین ترکیب شیمیایی کائولینیت از  $SiO_2$  به میزان ۶۲-۶۱ درصد،  $Al_2O_3$  ۲۴-۲۵ درصد و  $Fe_2O_3$  ۰/۴۵-۰/۶۵ درصد تشکیل یافته است.

## روش و شرایط انجام آزمایش

مقدار مناسبی از کائولینیت تجاری خشک، که در بسته های ۵۰ کیلوگرمی می باشند، در تعدادی ظرف با آب مخلوط می شود. غلظت مخلوط برپایه نبود حباب هوا از طریق چشمی تعیین می شود. از طریق آزمایش های مقدماتی مقدار درصد رطوبت به ازاء ترکیبات مختلف کائولینیت و آب بدست آمده است. برای انجام آزمایش با تخمین نسبت کائولینیت به آب، مخلوط کائولینیت و آب به نسبت وزنی مشخص تهیه می شود. سپس مخلوط در مقطع ریخته می شود تا به ارتفاع مورد نظر برسد. آب به آرامی به داخل فلوم هدایت شده تا ارتفاع مورد نظر حاصل شود. مشخصات امواج منظم (پریود و ارتفاع) توسط برنامه کامپیوتری مولد موج تعریف می شود. مدت زمان اجرای آزمایش نباید بقدری کوتاه باشد که اثرات Thixotropy بزرگ شوند و یا بقدری طولانی باشد که در لجن گردش روی دهد. توزیع ارتفاع موج در حین آزمایش ثبت می شود. همچنین یک نمونه لجن برای تعیین دقیق درصد رطوبت از قسمت میانی مقطع انتخاب می شود. مخلوط کائولینیت در آب به عمق ۳۲ سانتیمتر تحت تاثیر نیروی موج منظم ثابت قرار می گیرد. از آب معمولی برای هر دو حالت مخلوط کائولینیت و آب داخل فلوم استفاده شده و آزمایش برای ترکیبات متفاوت ارتفاع و پریود موج منظم تکرار می شود. جدول ۱ شرایط اجرای مختلف را برای آزمایش نشان می دهد.

جدول ۱: شرایط آزمایش

شماره اجرا	$T(sec)$	$H_0(cm)$	$d(cm)$	$h(cm)$	$\omega(%)$
WA7	۱	۴/۶	۸	۲۴	۹۷
WA8	۱	۶/۰	۸	۲۴	۹۷
WA9	۱	۷/۱	۸	۲۴	۹۷
WA10	۰/۸	۳/۵	۸	۲۴	۹۷
WA11	۰/۸	۴/۹	۸	۲۴	۹۷
WA12	۰/۸	۶/۷	۸	۲۴	۹۷
WA13	۱/۲	۲/۴	۸	۲۴	۹۷
WA14	۱/۲	۴/۲	۸	۲۴	۹۷

## نتایج آزمایش

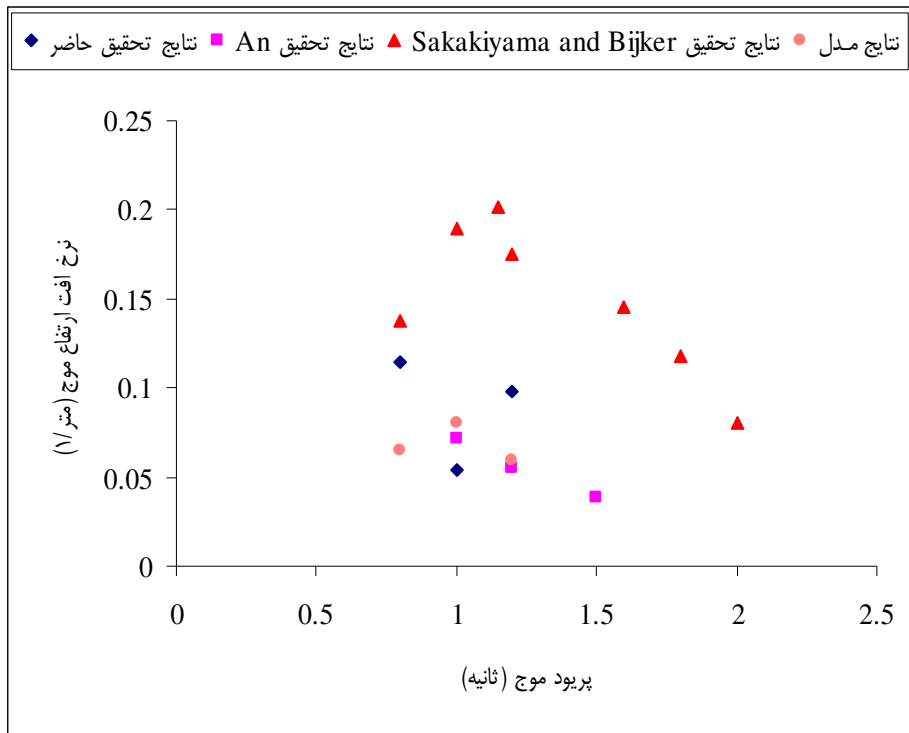
در این بخش نتایج حاصله از آزمایشات با نتایج محققین مختلف و همچنین مدل عددی موجود مورد مقایسه قرار می گیرد.

### اثر پریود موج بر روی افت ارتفاع موج در بستر لجنی

در این تحقیق برای بررسی اثر پریود موج آزمایشات به شرح جدول ۲ انجام گرفت. در آزمایش Sakakiyama and Bijker (1989) اثر پریود موج (یا فرکانس زاویه موج) در افت ارتفاع موج بررسی شده است. بر مبنای نتایج آزمایش Sakakiyama and Bijker (1989) افت ارتفاع در یک فرکانس زاویه ای مشخص دارای مقدار ماکزیمم می باشد. بنابراین اگر اثرات ارتفاع موج در افت ارتفاع زیاد باشد نمی توان با استفاده از این نتایج تحلیل مناسبی درباره اثرات فرکانس موج در افت ارتفاع بدست آورد. آزمایشات حاضر با نتایج آزمایش An (1993) و مدل عددی نیز مقایسه شده است. شکل ۶ مقایسه این نتایج را نیز نشان می دهد.

جدول ۲: رابطه پریود موج و افت ارتفاع موج

شماره اجرا	$T(s)$	$H_0(cm)$	$H(cm)$	$d(cm)$	$h(cm)$	$\omega(%)$	$k_i(1/m)$
WA7	۱	۴/۶	۴/۳	۸	۲۴	۹۷	۰/۰۵۳۶
WA11	۰/۸	۴/۹	۴/۲	۸	۲۴	۹۷	۰/۱۱۴۱
WA14	۱/۲	۴/۲	۳/۷	۸	۲۴	۹۷	۰/۰۹۷۵



شکل ۶: مقایسه نتایج رابطه پریود موج و نرخ افت ارتفاع موج

اثر ارتفاع موج بر روی افت ارتفاع موج در بستر لجنی

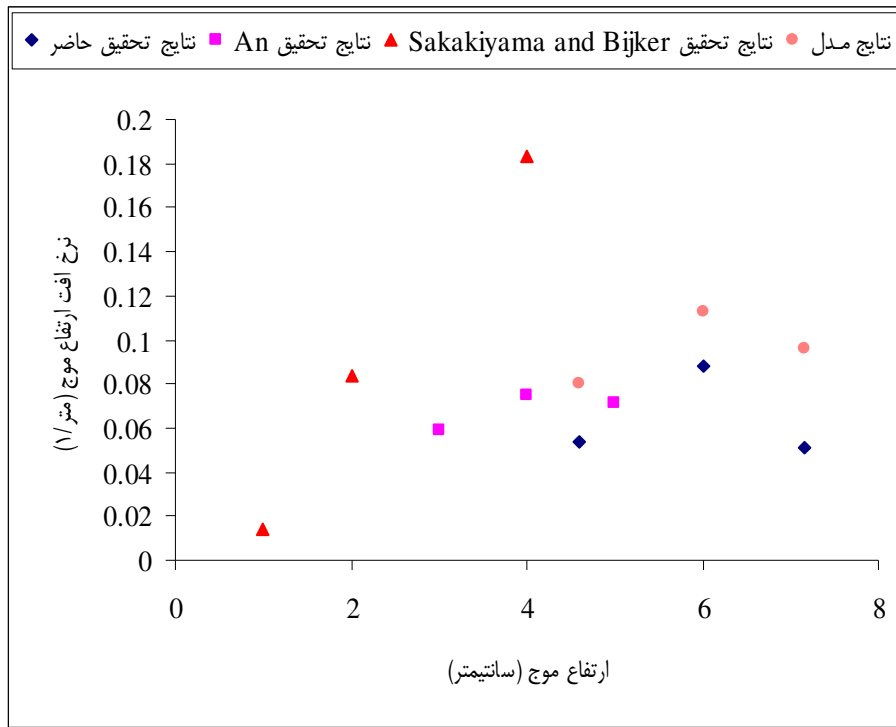
ارتفاع موج اولیه ۴، ۵ و ۶ سانتیمتر با پریود یکسان ۰/۸ ثانیه در آزمایش بکار برده شد. نتایج در جدول ۳ آمده است. همچنین ارتفاع موج اولیه ۵، ۶ و ۷ سانتیمتر با پریود یکسان ۱ ثانیه نیز مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۷ مقایسه‌ای از نتایج را با آزمایش Sakakiyama and Bijker (1989) و An (1993) و همچنین نتایج مدل نشان می‌دهد.

جدول ۳: رابطه ارتفاع موج و افت ارتفاع موج (پریود یکسان ۰/۸ ثانیه)

شماره اجرا	$T(s)$	$H_0(cm)$	$H(cm)$	$d(cm)$	$h(cm)$	$\omega(\%)$	$k_i(1/m)$
WA10	۰/۸	۳/۵	۲/۵	۸	۲۴	۹۷	۰/۲۵۰۹
WA11	۰/۸	۴/۹	۴/۲	۸	۲۴	۹۷	۰/۱۱۴۱
WA12	۰/۸	۶/۷	۵/۶	۸	۲۴	۹۷	۰/۱۴۱۸

جدول ۴: رابطه ارتفاع موج و افت ارتفاع موج (پریود یکسان ۱ ثانیه)

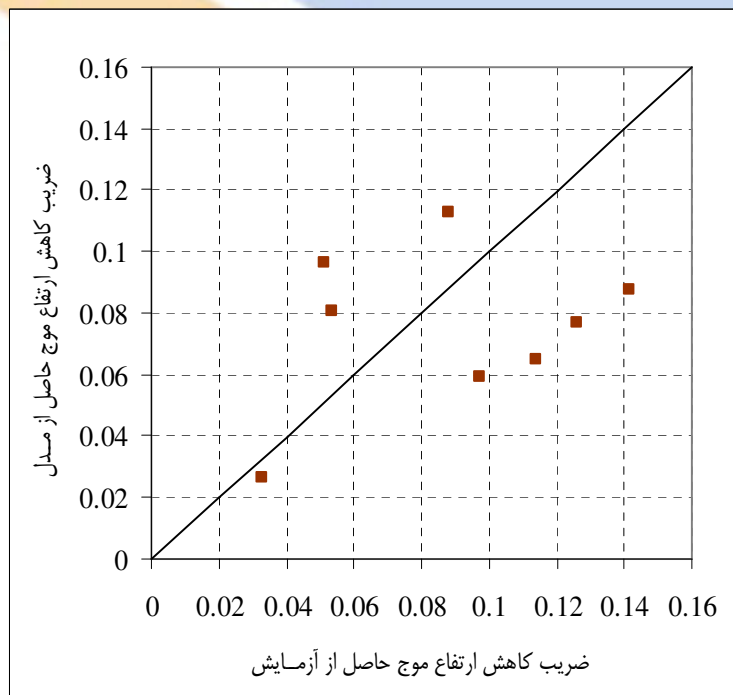
شماره اجرا	$T(s)$	$H_0(cm)$	$H(cm)$	$d(cm)$	$h(cm)$	$\omega(\%)$	$k_i(1/m)$
WA7	۱	۴/۶	۴/۳	۸	۲۴	۹۷	۰/۰۵۳۶
WA8	۱	۶/۰	۵/۴	۸	۲۴	۹۷	۰/۰۸۸۲
WA9	۱	۷/۱	۶/۷	۸	۲۴	۹۷	۰/۰۵۱۰



شکل ۷: مقایسه نتایج رابطه ارتفاع موج و نرخ افت ارتفاع موج (پریود یکسان ۱ ثانیه)

### نتیجه گیری

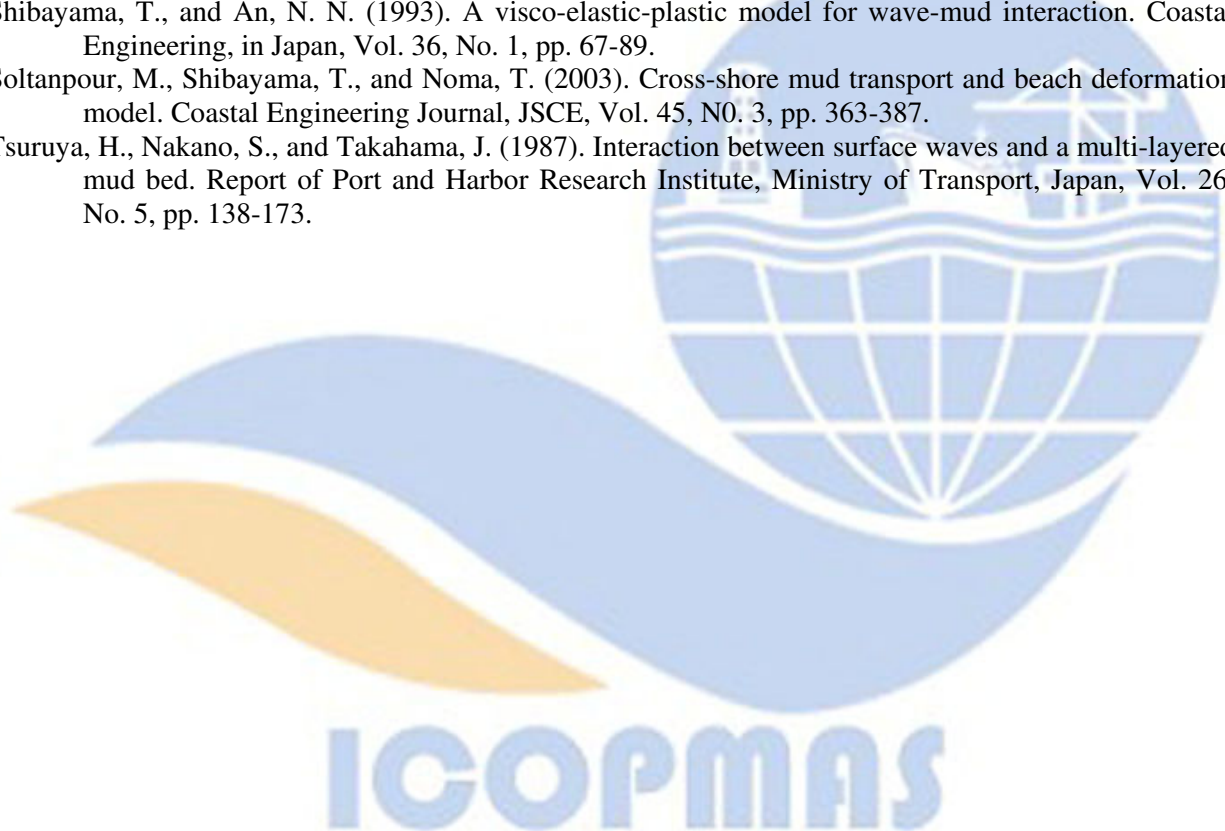
شکل ۸ مقایسه‌ای بین ضرایب کاهش ارتفاع موج اندازه گیری شده از آزمایش و مقادیر حاصل از مدل را نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج مدل عددی افت ارتفاع در یک فرکانس زاویه ای مشخص دارای مقدار ماکزیمم می باشد. نتایج آزمایشات گرایشی متفاوت را در داده های ثبت شده نشان می‌دهد. همچنین افت ارتفاع موج برای کوچکترین ارتفاع موج اولیه کمترین نرخ را دارد. با افزایش ارتفاع نرخ افزایش یافته و با ادامه روند افزایش ارتفاع موج نرخ افت ارتفاع کمی کاهش می یابد. برای کسب یک نتیجه گیری واقعی از گرایش نرخ افت ارتفاع تعداد سه داده کافی نمی باشد. با وجود اثر محدودیت های آزمایشگاهی و فرضیات مدل بر نتایج، مشاهده می شود که مدل از توانایی پیش بینی کاهش ارتفاع موج برخوردار است.



شکل ۸: مقایسه بین ضرایب کاهش ارتفاع موج اندازه گیری شده در آزمایش ها و مقادیر حاصل از مدل (متر/متر)



- An, N. N. (1993). Mud mass transport under wave and current. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Eng., Yokohama National University, Yokohama, 135 pp.
- Dalrymple, R. A., and Liu, P. L.-f. (1978). Waves over muds, a two-layer fluid model. *Journal Physical Oceanography*, Vol. 8, pp. 1121-1131.
- Gade, H. G. (1958). Effects of non rigid, impermeable bottom on plane surface wave in shallow water. *Journal of Marine Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 61-82.
- Iwasaki, T., Sato, M. (1972). Dissipation of wave energy due to opposing current. Proc. 13<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf., ASCE, Vol. 1, pp. 605-622.
- Keulegan, G. H. (1950). Wave Motion, *Engineering Hydraulics*. Chapter 11, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Maa, P.-Y. and Mehta, A.J. (1990). Soft mud response to water waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 5, pp. 634-650.
- Sakakiyama, T., and Bijker, E. W. (1989). Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 115(5), pp. 279-291.
- Sheremet, A., Mehta, A.J., Liu, B., and Stone, G.W. (2005). Wave-sediment interaction on muddy inner shelf during Hurricane Claudette. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 63, pp. 225-233.
- Shibayama, T., and An, N. N. (1993). A visco-elastic-plastic model for wave-mud interaction. *Coastal Engineering, in Japan*, Vol. 36, No. 1, pp. 67-89.
- Soltanpour, M., Shibayama, T., and Noma, T. (2003). Cross-shore mud transport and beach deformation model. *Coastal Engineering Journal, JSCE*, Vol. 45, NO. 3, pp. 363-387.
- Tsuruya, H., Nakano, S., and Takahama, J. (1987). Interaction between surface waves and a multi-layered mud bed. Report of Port and Harbor Research Institute, Ministry of Transport, Japan, Vol. 26, No. 5, pp. 138-173.



## **Experimental Investigation of Wave Height Reduction on Sludge Layer**

*F. Samsami, KN Toosi*

*M. Soltanpour, KN Toosi*

*S. A. Haghshenas,*

### **Abstract**

Adhesive deposits are made of tiny particles that generally range from cilia (smaller than 70 micrometers) to clay (smaller than 4 micrometers). These particles adhere to each other by electro-chemical forces. These forces control a wide range of deposits properties. Sludge is composed of particles that are smaller than approximately 20 micrometers in size. Smaller particles have stronger adhesiveness than large ones. Size of particles is a function of mineral texture and water chemical properties as well as the extent of water saltiness. The present study deals with reduced wave height by means of a series of experimental studies in wave flume on commercial kaolinite. Results of this study are employed for the purpose of evaluation of sludge-wave interaction numerical model.

**Keywords:** *adhesive deposits, particles, size, saltiness, sludge, wave*