

تعیین ساحل سنگریزه‌ای بهینه به منظور به حداقل رساندن انعکاس امواج دریا به روش تحلیلی و آزمایشگاهی

محمد جواد کتابداری^۱، الهام شیرافکن^۲

ketabdar@aut.ac.ir

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

هنگامی که امواج به سازه‌های دریایی یا سواحل شیبدار برخورد می‌کنند بخشی از موج انعکاس یافته و در جهت مخالف موج ورودی انتشار می‌یابد. امواج انعکاسی باعث افزایش سرعت آب در جلوی سازه شده یا ممکن است به فاصله‌های نزدیک منتشر شوند و ایجاد آشفتگی در بخش آرام آب کنند. در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی لازم است در اندازه‌گیری‌ها، امواج به امواج تابشی و انعکاسی مجزا گردند زیرا پاسخ مدل با پارامترهای موج تابشی مرتبط است. در فلوم موج در اثر انعکاس چندگانه قطار موجها ناشی از انعکاس دوباره توسط سازه مدل، ساحل شیبدار و پارو موجساز، سیستم پیچیده‌ای از امواج ترکیبی بوجود می‌آیند. لذا روشهای مختلف آنالیز در طی چند دهه اخیر برای اندازه‌گیری ضریب انعکاس در فلوم‌های موج آزمایشگاهی گسترش یافته است. در این تحقیق مطالعات آزمایشگاهی دوبعدی در فلوم موج برای بدست آوردن پارامترهای امواج تابشی و انعکاسی امواج منظم و نامنظم انجام شد. اندازه‌گیریها با روش دو و سه سنسور صورت گرفت و روشها با هم مقایسه شدند. همچنین، تاثیر بعضی از پارامترها مانند ارتفاع موج و نفوذپذیری و شیب ساحل بررسی شد. تاثیر ارتفاع موج تابشی، فرکانس موج تابشی، ضریب ۷ در طیف جانسواپ، شیب ساحل و نفوذپذیری ساحل، بر ضریب انعکاس مورد بررسی قرار گرفت و سرانجام ساحل بهینه برای کاهش میزان ضریب انعکاس پیشنهاد گردید. نتایج تحقیق نشان داد که در فلومهای کوتاه، ساحل فلزی نفوذپذیر با زاویه ۳۰ تا ۴۵ درجه حداقل انعکاس موج را دارند.

واژگان کلیدی: شیب ساحل، نفوذپذیری ساحل، امواج منظم و نامنظم، مدل آزمایشگاهی، انعکاس موج.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۱۱/۲۸

۱- مقدمه

امواج یکی از مهمترین پدیده‌های طبیعی هستند که به سواحل و سازه‌های دریایی نیرو وارد می‌نمایند. این امواج وقتی از آب عمیق به آب کم عمق حرکت می‌کنند، دچار تغییر می‌شوند. بسته به وضعیت شیب و زاویه رسیدن موج به ساحل و شکل سازه، موج دچار پدیده‌هایی مانند عمق کاستگی، تفرق، انکسار، شکست، انعکاس، بالاروی و روگذری می‌گردد. وقتی موج به سازه‌های ساحلی یا بستر شیبدار برخورد می‌نماید می‌شکند و قسمتی از آن منعکس می‌شود. انعکاس امواج منظم و نامنظم در فلوم به صورت دو بعدی توسط محققین بررسی شده است. گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) انعکاس موج را از اندازه‌گیری دو ارتفاع موج و یک اختلاف فاز زاویه‌ای از سطح آب بدست آوردند [۱]. فونک و منسارد (۱۹۸۰) روشی ارائه دادند، که شامل اندازه‌گیری سه ارتفاع موج و دو اختلاف فاز زاویه‌ای بود [۲]. تاتاوارتی و هونتلی در سال ۱۹۸۷ و تاتاوارتی در سال ۱۹۸۸ روش آنالیز حوزه فرکانس را ابداع کردند که ضریب انعکاس موج را از سری زمانی سرعت افقی در یک آرایش قائم بدست می‌آورد. روش آنها هنگامی که ارتباط متقاطع بین گیج‌ها کاهش می‌یافت، تاثیرات سیگنال‌های مزاحم را که منجر به نتایج غیر واقعی می‌شد کاهش می‌داد [۳]. کوباتو و همکاران در سال ۱۹۹۰ انعکاس امواج را از سواحل دارای شیب ملایم و تند به روش آزمایشگاهی بدست آوردند. آنها جهت اندازه‌گیری ضریب انعکاس موج یک روش بر اساس تئوری دامنه کوتاه و یک روش براساس تئوری موج بلند شبه غیرخطی ارائه دادند [۴]. والتون در سال ۱۹۹۲ روش حوزه فرکانس را برای داده‌های سری زمانی بدست آمده از فشار سنج و جریان‌سنج به صورت ترکیبی که در خارج از ناحیه شکست ساحلی در دو بخش طبیعی ساحل قرار داده شده بود، به کار برد [۵]. هوگز در سال ۱۹۹۳ روشی برای آنالیزی حوزه فرکانس طیف امواج نامنظم بیان کرد که در آنجا سری زمانی سرعت افقی و قائم در یک نقطه در ستون آب اندازه‌گیری می‌شد. هوگز روش سرعت‌های همزمان را با استفاده از یک سرعت‌سنج لیزر داپلر به کار گرفت تا سیگنال‌های عمودی و افقی را در نقطه مرکزی به دست آورد. وی درستی این روش را در مورد دیوار عمودی کاملاً انعکاسی به اثبات رساند [۶]. فریگارد و برورسن در سال ۱۹۹۵ روش حوزه فرکانس برای جداسازی امواج نامنظم تابشی و انعکاسی را با استفاده از فیلترهای

دیجیتالی ارائه دادند ولی خطاهای ناشی از مدل عددی و آزمایشگاهی آنها قابل قبول نبود [۷]. بالداک و سیموند در سال ۱۹۹۹ با در نظر گرفتن اثر عمق کاستگی به طور خطی و قرار دادن دو سنسور بر روی کف شیبدار انعکاس از ساحل را محاسبه کردند [۸]. سو و همکاران در سال ۲۰۰۱ از روش برازش مربعات با به کار بردن سنسور در دو و چند موقعیت، انعکاس ترکیب موج و جریان ثابت را اندازه‌گیری کردند [۹]. زو و چوانگ در سال ۲۰۰۱ روش تابع انتقال TFM را برای تفکیک امواج به تابشی و انعکاسی به کار بردند [۱۰]. کانگ و هسو در سال ۲۰۰۳ با روشی متفاوت نسبت به بالداک و سیموند با در نظر گرفتن اثرات ناشی از کاهش عمق و اثر عمق کاستگی با قرار دادن دو سنسور بر روی کف شیبدار انعکاس امواج نامنظم را محاسبه کردند [۱۱].

در این مقاله روش گودا و سوزوکی و روش فونک و منسارد مبنای آزمایشات و بررسی انعکاس موج از ساحل قرار گرفت. در مطالعه ضریب انعکاس امواج پارامترهای خصوصیات موج تابشی و ساحل موثر هستند. از پارامترهای موثر موج مانند ارتفاع موج تابشی، فرکانس موج تابشی، تیزی موج و از خصوصیات ساحل شیب ساحل و نفوذپذیری آن را می‌توان بیان کرد. اهداف این تحقیق شامل موارد زیر هستند:

- ۱- مقایسه روشهای گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) و فونک و منسارد (۱۹۸۰) در برآورد ضریب انعکاس از ساحل
- ۲- مطالعه پارامتری روی ضریب انعکاس نسبت به خصوصیات موج تابشی و خصوصیات ساحل
- ۳- ارائه ساحل بهینه کاربردی در فلوم‌های کوتاه جهت به حداقل رساندن انعکاس موج
- ۴- مقایسه ضریب انعکاس امواج منظم و نامنظم از ساحل

۲- معادلات حاکم

۲-۱- تحلیل زمانی و طیفی

به منظور تجزیه امواج نامنظم دو روش حوزه زمان و حوزه فرکانس وجود دارد. روش حوزه زمان روش گذر از خط صفر را مبنای تجزیه امواج قرار می‌دهد. سپس میانگین ارتفاع یک سوم از بلندترین امواج و میانگین دوره تناوبهای متناظر به عنوان ارتفاع و دوره تناوب شاخص (H_s , T_s) در نظر گرفته می‌شود.

در روش حوزه فرکانس یک موج نامنظم از ترکیب چند موج منظم با دامنه‌ها، دوره‌های تناوب و فازهای مختلف بدست

که فازهای انعکاسی و تابشی بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\phi_{ii} = (k_i x + \beta_{ii}), \phi_{ri} = (k_i x + \beta_{ri}) \quad (۸)$$

۲-۲- روش دو سنسور ثابت

در روش گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) اطلاعات سری زمانی ارتفاع سطح دریا از دو سنسور ثابت که با فاصله Δl در امتداد انتشار موج قرار گرفته اند، ثبت می شود و تحلیل طیفی آن با فوریه سریع انجام می شود. دو سری زمانی ارتفاع سطح آب که ترکیب خطی امواج تابشی و امواج برگشتی هستند با روابط (۹) و (۱۰) بیان می شوند:

$$\eta_1(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \begin{bmatrix} a_{ii} \cos(\phi_{ii} - \omega_i t) + \\ a_{ri} \cos(\phi_{ri} + \omega_i t) \end{bmatrix} \quad (۹)$$

$$\eta_2(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \begin{bmatrix} a_{ii} \cos(\phi_{ii} - \omega_i t + k_i \Delta l) + \\ a_{ri} \cos(\phi_{ri} + \omega_i t + k_i \Delta l) \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

با بسط معادلات (۹) و (۱۰)، پروفیل سطح آب η_1 و η_2 در محل سنسورهای ۱ و ۲ از روابط زیر بدست می آید:

$$\eta_1(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} [A_{1i} \cos \omega_i t + B_{1i} \sin \omega_i t] \quad (۱۱)$$

$$\eta_2(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} [A_{2i} \cos \omega_i t + B_{2i} \sin \omega_i t] \quad (۱۲)$$

ضرائب A_{1i}, B_{1i}, A_{2i} و B_{2i} با توجه به روابط زیر محاسبه می شوند:

$$A_{1i} = a_{ii} \cos(\phi_{ii}) + a_{ri} \cos(\phi_{ri}) \quad (۱۳)$$

$$B_{1i} = a_{ii} \sin(\phi_{ii}) - a_{ri} \sin(\phi_{ri}) \quad (۱۴)$$

$$A_{2i} = a_{ii} \cos(\phi_{ii} + k_i \Delta l) + a_{ri} \cos(\phi_{ri} + k_i \Delta l) \quad (۱۵)$$

$$B_{2i} = a_{ii} \sin(\phi_{ii} + k_i \Delta l) - a_{ri} \sin(\phi_{ri} + k_i \Delta l) \quad (۱۶)$$

$$\phi_{ii} = (k_i x_1 + \beta_{ii}) \quad (۱۷)$$

$$\phi_{ri} = (k_i x_1 + \beta_{ri}) \quad (۱۸)$$

فاصله بین پارو موجساز و اولین سنسور است. x_1 که در آن معادلات (۱۳) تا (۱۶) یک سیستم ۴ معادله با ۴ مجهول را برای هر مولفه بیان می کنند. با حل $(a_{ii}, a_{ri}, \phi_{ii}, \phi_{ri})$ این سیستم معادلات، مجهولات به شرح ذیل بدست می آیند:

$$a_{ii} = \frac{[(A_{2i} - A_{1i} \cos k_i \Delta l - B_{1i} \sin k_i \Delta l)^2 + (B_{2i} - B_{1i} \cos k_i \Delta l + A_{1i} \sin k_i \Delta l)^2]^{1/2}}{2 |\sin k_i \Delta l|} \quad (۱۹)$$

$$a_{ri} = \frac{[(A_{2i} - A_{1i} \cos k_i \Delta l + B_{1i} \sin k_i \Delta l)^2 + (B_{2i} - B_{1i} \cos k_i \Delta l - A_{1i} \sin k_i \Delta l)^2]^{1/2}}{2 |\sin k_i \Delta l|} \quad (۲۰)$$

$$\phi_{ii} = \tan^{-1} \left[\frac{-(A_{2i} - A_{1i} \cos k_i \Delta l - B_{1i} \sin k_i \Delta l)}{(B_{2i} - B_{1i} \cos k_i \Delta l + A_{1i} \sin k_i \Delta l)} \right] \quad (۲۱)$$

$$\phi_{ri} = \tan^{-1} \left[\frac{-(A_{2i} - A_{1i} \cos k_i \Delta l + B_{1i} \sin k_i \Delta l)}{(B_{2i} - B_{1i} \cos k_i \Delta l - A_{1i} \sin k_i \Delta l)} \right] \quad (۲۲)$$

می آید. همچنین انرژی مشخصی توسط هر یک از این امواج منتقل می شود که مجموع آنها برابر انرژی کل منتقل شده توسط موج نامنظم است. این روش بر مبنای آنالیز طیفی امواج را در حوزه زمان از هم جدا کرده و انرژی کل موج را در حوزه فرکانس بدست می دهد. این فرایند با تکنیک تبدیل فوریه سریع صورت می گیرد. همچنین واریانس تغییرات تراز سطح آب حول نقطه مبدا از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Var = \sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \eta^2(t) dt = \frac{1}{2} a^2 \quad (۱)$$

در معادله (۱) σ^2 واریانس، T دوره تناوب، a دامنه موج و $\eta(t)$ سری زمانی تراز سطح آب است. انرژی E و واریانس طبق معادله ۲ و به صورت مستقیم با هم ارتباط دارند. (وزن مخصوص آب)

$$E = \gamma_w L \sigma^2 \quad (۲)$$

مرحله نخست در تبدیل فوریه سریع با توجه به معادله (۳) معادل قرار دادن سری زمانی سطح آب موج نامنظم با مجموع یک سری نامحدود از امواج منظم سینوسی با دامنه a ، بسامد زاویه ای ω و فاز اولیه تصادفی δ است.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t + \delta_i) \quad (۳)$$

سپس معادله (۴) بین طیف موج و واریانس نوشته می شود [۱۲]:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i^2}{2} = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (۴)$$

در این رابطه $S(f)$ چگالی طیفی انرژی موج یا طیف موج است. دین و دالامبر (۱۹۸۴) پتانسیل سرعت درجه اول برای امواج نامنظم تابشی و انعکاسی را بصورت خطی به فرم زیر ارائه دادند [۱۳]:

$$\phi(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{-a_{ii} g \cosh k_i (h+z)}{\omega_i \cosh(k_i h)} \sin(k_i x - \omega_i t + \beta_{ii}) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_{ri} g \cosh k_i (h+z)}{\omega_i \cosh(k_i h)} \sin(k_i x + \omega_i t + \beta_{ri}) \quad (۵)$$

ترم اول معادله (۵) برای انتشار موج در راستای مثبت x و ترم دوم بیانگر انتشار موج در راستای مخالف است. سری زمانی عبارتهای سطح دریا η براساس پتانسیل سرعت به صورت زیر بدست می آید:

$$\eta = \frac{1}{g} \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=0} \quad (۶)$$

با جایگذاری معادله (۵) در عبارت (۶) معادلات (۷) و (۸) برای امواج خطی نامنظم تابشی و انعکاسی بدست می آید:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} [a_{ii} \cos(\phi_{ii} - \omega_i t) + a_{ri} \cos(\phi_{ri} + \omega_i t)] \quad (۷)$$

ای که موج از آن منعکس می‌شود x_{r1} باشد، پروفیل موج در آن سنسور بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta_1 = \sum_{n=1}^N C_{in} \sin(-n\omega t + k_n x_1 + \beta_n) + \sum_{n=1}^N C_{rn} \sin[-n\omega t + k_n(x_1 + 2x_{r1}) + \beta_n + \Phi_n] + \Omega_1(t) \quad (28)$$

$\Omega_1(t)$ اثر تراکمی تمام سیگنال‌های تحریف شده یا از بین رفته در $p = 1$ است و Φ_n تغییرات فاز بعثت سازهای است که موج را منعکس می‌کند. سنسور دوم در $p = 2$ که مسافتی برابر x_{12} را از سنسور در $p = 1$ در جهت انتشار موج تابشی طی می‌کند، پروفیل موجی مشابه با معادله (۲۸) را ثبت خواهد کرد. با این تفاوت که زوایای فاز برای امواج تابشی و انعکاسی در آن $(-n\omega t + k_n(x_1 + 2x_{12}) + \beta_n)$ و $(-n\omega t + k_n(x_1 + 2x_{r1} - 2x_{12}) + \beta_n + \Phi_n)$ خواهد بود.

معادلاتی مشابه، زوایای موج را برای دیگر موقعیتهای جابجایی که فاصله‌ای برابر x_{1p} از نقطه شروع دارند را بدست می‌دهد. تابع انتقال فوریه، سیگنال مجموع را که با معادله (۲۸) بیان شد در دامنه‌ی $0 \leq t \leq T$ می‌دهد:

$$F(\eta_1) = B_{1,n} = C_{in} \exp(ik_n x_1 + i\epsilon_n) + C_{rn} \exp(ik_n(x_1 + 2x_{r1}) + i(\epsilon_n + \Phi_n)) + Y_{1,n} \exp(i\rho_{1,n}) \quad (29)$$

به طور مشابه سیگنال‌های مشاهده شده برای دیگر سنسورها با معادله (۳۰) بیان می‌شوند:

$$F(\eta_p) = B_{p,n} = C_{in} \exp(ik_n(x_1 + x_{1p}) + i\epsilon_n) + C_{rn} \exp(ik_n(x_1 + 2x_{r1} - x_{1p}) + i(\epsilon_n + \Phi_n)) + Y_{p,n} \exp(i\rho_{p,n}) \quad (30)$$

برای ساده‌سازی معادله $F(\eta_1)$ و $F(\eta_p)$ روابط زیر به کار می‌روند:

$$Z_{in} = C_{in} \exp(ik_n(x_1 + x_{1p}) + i\epsilon_n) \quad (31)$$

$$Z_{rn} = C_{rn} \exp(ik_n(x_1 + 2x_{r1}) + i(\epsilon_n + \Phi_n)) \quad (32)$$

$$Z_{N,p,n} = Y_{p,n} \exp(i\rho_{p,n}) \quad (33)$$

$$B_{1,n} = Z_{in} + Z_{rn} + Z_{N,1,n} \quad (34)$$

$$B_{2,n} = Z_{in} \exp(ik_n x_{12}) + Z_{rn} \exp(-ik_n x_{12}) + Z_{N,2,n} \quad (35)$$

$$B_{3,n} = Z_{in} \exp(ik_n x_{13}) + Z_{rn} \exp(-ik_n x_{13}) + Z_{N,3,n} \quad (36)$$

در این روابط عبارت Z_N را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. به منظور حل معادلات بالا روش مینیمم مربعات به کار می‌رود. در ادامه برای راحتی کار روابط زیر تعریف می‌شود (x_{1p} فاصله بین سنسور ۱ و سنسور p است):

$$\psi_{p,n} = k_n x_{1p} \quad (37)$$

معادلات (۱۹) تا (۲۲) مولفه‌های طیفی دامنه و فاز موج را در هر مولفه فرکانسی موج محاسبه می‌کنند. سپس ضریب انعکاس با فرمول (۲۳) محاسبه می‌شود [۱]:

$$K_R = \frac{a_R(f)}{a_I(f)} = \sqrt{\frac{S_R(f)}{S_I(f)}} \quad (23)$$

۲-۳- روش سه سنسور ثابت

در روش فونک و منسارد (۱۹۸۰) با به‌کار بردن تکنیک مینیمم مربعات رکوردهای دریافتی از سه سنسور با فواصل مشخص تحلیل می‌شود. به خاطر عرض کم فلوم موج، امواج در فلوم در جهت طولی حرکت می‌کنند و امواج منعکس شده از ساحل و یا سازه دلخواه در خلاف جهت انتشار موج است. همچنین اندازه‌گیری همزمان بر هم نهی خطی این امواج در نقاط $p = 1, 2, \dots, m$ که در فاصله‌ای منطقی نسبت به هم در خطی موازی با جهت انتشار موج قرار دارد، امکان پذیر است. پروفیل موجی که در هر یک از موقعیت‌های مورد آزمایش مشاهده می‌شود را می‌توان بصورت مجموعه‌ای از مولفه‌های گسسته و هارمونیک و به شکل فوریه نوشت یعنی:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (24)$$

که در آن A_n ضریب فوریه و α_n فاز مولفه موج n ام است. N حد بالایی مجموع است که به مولفه فرکانس ماکزیمم بستگی دارد. ضرایب فوریه و فازهایش از تابع انتقال فوریه به دست می‌آیند که در حالت مختلط به شکل زیر است:

$$B_n = A_n e^{i\alpha_n} \quad (25)$$

و در مختصات متعامد داریم:

$$B_n = [A_n \cos(\alpha_n) + iA_n \sin(\alpha_n)] \quad (26)$$

از آنجایی که فاصله بین سنسورهای مختلف مشخص است و جز در حالت مختصات ثابت مولفه‌های فرکانس هر موج در مجموعه امواج با سرعت فاز خود حرکت می‌کند، محاسبه روابط فاز بین دسته امواج در هر سه سنسور قابل محاسبه است. معادله کلی برای یک موج پیشرونده با رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\eta = \sum_{n=1}^N C_n \sin(n\omega t + k_n x + \beta_n) \quad (27)$$

در این رابطه β_n فاز قراردادی بر حسب زمان و مکان شروع تابع و x فاصله متغیر اندازه‌گیری شده از محل شروع تابع در جهت انتشار موج است. بررسی فعالیت موج در نقطه n ، بر حسب مجموع یک موج تابشی $C_{i,n}$ ، یک موج انعکاسی $C_{r,n}$ و اختلال در سیگنال بیان می‌شود. اگر فاصله از منبع موج تا سنسور در x_1 $p = 1$ و فاصله از سنسور در $n = 1$ تا سازه

آزمایش‌ها در فلوم موج آزمایشگاه شرکت اودنگ انجام شد. فلومی به طول ۱۶ متر، عرض و ارتفاع ۱ متر و عمق آب ۰٫۴ متر استفاده شد. فلوم دارای سیستم موجساز پیستونی با قابلیت تولید امواج منظم بر اساس ارتفاع و فرکانس ورودی و امواج نامنظم بر اساس طیف موج بود. در شکل (۱) شماتیکی از فلوم و سنسورهای اندازه گیری موج ارائه شده است. داده‌های سطح آب از ۶ سنسور مقاومتی با فرکانس ۱۰ هرتز و دقت یک میلیمتر ثبت می‌گردید. این سنسورها با کابل به قسمت پردازشگر متصل بوده و با راه‌اندازی نرم افزار به طور پیوسته تغییرات سطح آب، در محل هر سنسور در صفحه نمایش قابل مشاهده بود. یک سنسور نزدیک به موج ساز و ۵ سنسور دیگر به فاصله بیشتر از یک طول موج ماکزیمم از ساحل قرار گرفت. به علت محدود بودن عمق آب در قسمتهای ساحلی، از طیف جانسواپ استفاده شد. طیف جانسواپ ۵ پارامتری است که معمولاً سه پارامتر آن ثابت در نظر گرفته می‌شود. در اینجا با تغییر ۳ پارامتر فرکانس ماکزیمم f_p ، ارتفاع موج مشخصه H_s و ضریب γ طیف امواج تولید شد. برای انجام آزمایشها، ابتدا لازم بود که از مدلسازی درست طیفها اطمینان حاصل شود. لذا مدلسازی طیف موج، قبل از انجام آزمایشها صورت گرفت. در زمان این مدلسازی شرایط دیگر مانند عمق آب و ضخامت بستر همان شرایط زمان اجرای آزمایشها در نظر گرفته شد. برای مدلسازی طیف موج، سنسوری با فرکانس اندازه گیری ۱۰ هرتز تغییرات سطح آب را ثبت و ارسال می‌کرد، تا با داشتن پروفیل سطح آب و تغییرات آن، اصلاح طیف انجام شود. سپس با استفاده از طیف اصلاح شده مدل سازی انجام شد. فرآیند اصلاح تا دستیابی به خطای مساحت طیفی کمتر از ۵ درصد ادامه می‌یافت. سپس سری زمانی نهایی که تأیید شده بود به عنوان ورودی برای تست مذکور ثبت و ذخیره می‌شد. زمان مدلسازی هر طیف، با انتخاب جزء فرکانسی مناسب، حدود ۲۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در ادامه یک نمونه طیف اولیه وروری به پاروی موج در شکل (۲)، سری زمانی موجساز در شکل (۳) و شکل نهایی طیف در شکل (۴) نشان داده شده است. هدف از این قسمت طراحی و ارائه ساحلی نفوذپذیر با شیب مناسب جهت آزمایشگاههای با فلوم کوتاه بوده که دارای اثر جذب موج بیشتر و موج انعکاسی کوچکتری باشد. بدین ترتیب خطای بازگشت مجدد موج به دلیل کوتاه بودن طول فلوم رفع می‌گردد

$$\beta_n = \psi_{2,n} = k_n x_{12} \quad (38)$$

$$\gamma_n = \psi_{3,n} = k_n x_{13} \quad (39)$$

$$Z_{in} + Z_{rn} - B_{1,n} = \varepsilon_{1,n} \quad (40)$$

$$Z_{in} e^{i\beta_n} + Z_{rn} e^{-i\beta_n} - B_{2,n} = \varepsilon_{2,n} \quad (41)$$

$$Z_{in} e^{i\gamma_n} + Z_{rn} e^{-i\gamma_n} - B_{3,n} = \varepsilon_{3,n} \quad (42)$$

$$\varepsilon_{p,n} = -Z_{N,p,n} + f_e(Z_{in}, Z_{rn}) \quad (43)$$

با به کار بردن روش مینیمم مربعات مشخص است که مقادیر Z_{ik} و Z_{rk} زمانی حاصل می‌شود که مجموع مربعات $\varepsilon_{p,k}$ برای تمام p ها مینیمم شود. این مطابق است با زمانی که:

$$f_e(Z_{in}, Z_{rn}) = 0 \quad (44)$$

$$\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_{p,n})^2 = \sum_{p=1}^3 (Z_{in} e^{i\psi_{p,n}} + Z_{rn} e^{-i\psi_{p,n}} - B_{p,n})^2 \quad (45)$$

$$\frac{d(\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_{p,n})^2)}{dZ_{in}} = \frac{d(\sum_{p=1}^3 (\varepsilon_{p,n})^2)}{dZ_{rn}} = 0 \quad (46)$$

$$\sum_{p=1}^3 (Z_{in} e^{i\psi_{p,n}} + Z_{rn} e^{-i\psi_{p,n}} - B_{p,n}) e^{i\psi_{p,n}} = 0 \quad (47)$$

$$\sum_{p=1}^3 (Z_{in} e^{i\psi_{p,n}} + Z_{rn} e^{-i\psi_{p,n}} - B_{p,n}) e^{-i\psi_{p,n}} = 0 \quad (48)$$

$$Z_{in} (1 + e^{i2\beta_n} + e^{i2\gamma_n}) + 3Z_{rn} = B_{1,n} + B_{2,n} e^{i\beta_n} + B_{3,n} e^{i\gamma_n} \quad (49)$$

$$Z_{rn} (1 + e^{-i2\beta_n} + e^{-i2\gamma_n}) + 3Z_{in} = B_{1,n} + B_{2,n} e^{-i\beta_n} + B_{3,n} e^{-i\gamma_n} \quad (50)$$

Z_{rn} و Z_{in} بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$Z_{in} = \frac{1}{D_n} (B_{1,n}(R1 + iQ1) + B_{2,n}(R2 + iQ2) + B_{3,n}(R3 + iQ3)) \quad (51)$$

$$Z_{rn} = \frac{1}{D_n} (B_{1,n}(R1 - iQ1) + B_{2,n}(R2 - iQ2) + B_{3,n}(R3 - iQ3)) \quad (52)$$

$$D_n = 2(\sin^2 \beta_n + \sin^2 \gamma_n + \sin^2(\gamma_n - \beta_n)) \quad (53)$$

$$R1_n = \sin^2 \beta_n + \sin^2 \gamma_n \quad (54)$$

$$Q1 = \sin \beta_n \cos \beta_n + \sin \gamma_n \cos \gamma_n \quad (55)$$

$$R2 = \sin \gamma_n \sin(\gamma_n - \beta_n) \quad (56)$$

$$Q2 = \sin \gamma_n \cos(\gamma_n - \beta_n) - 2 \sin \beta_n \quad (57)$$

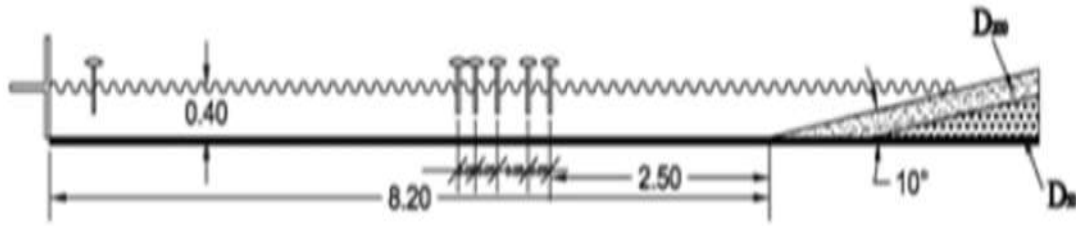
$$R3 = -\sin \gamma_n \sin(\gamma_n - \beta_n) \quad (58)$$

$$Q3 = \sin \gamma_n \cos(\gamma_n - \beta_n) - 2 \sin \gamma_n \quad (59)$$

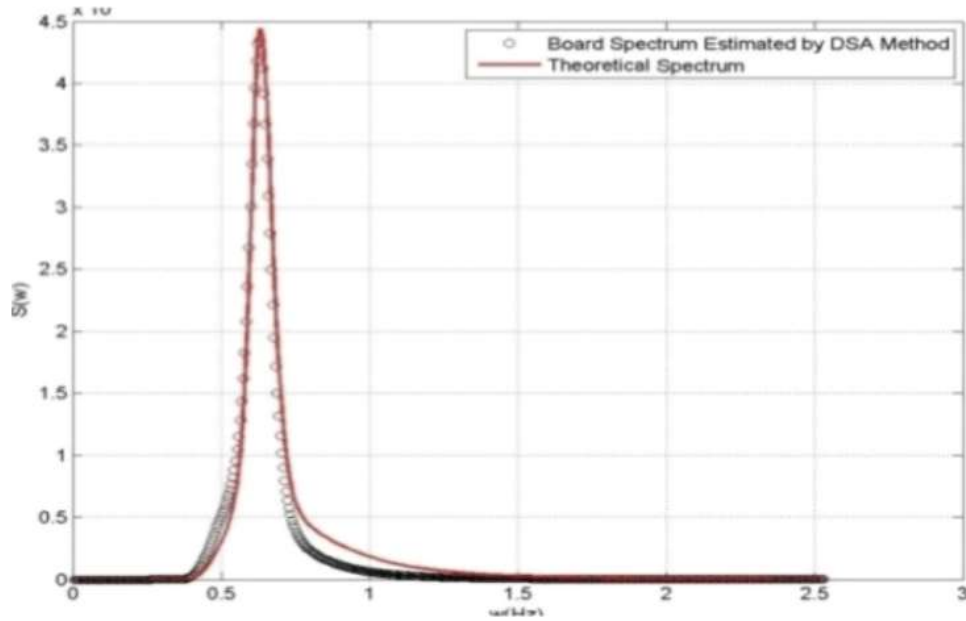
با به کار بردن روابط (۵۳) تا (۵۹) معادلات (۵۱) و (۵۲) تحلیل و سپس از معادله (۶۰) ضریب انعکاس محاسبه می‌شود [۲].

$$K_R = \frac{Z_{rn}}{Z_{in}} \quad (60)$$

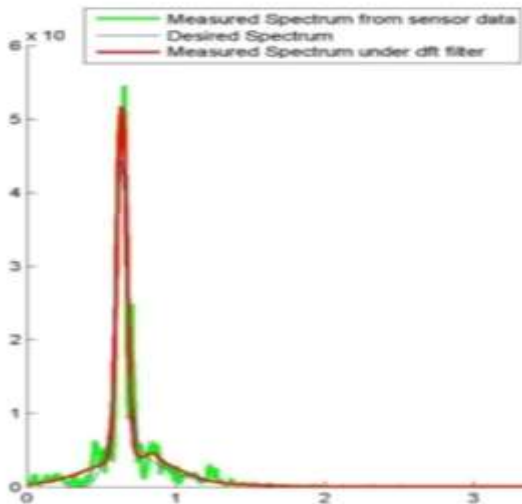
۳- مدل سازی فیزیکی و انجام آزمایشها



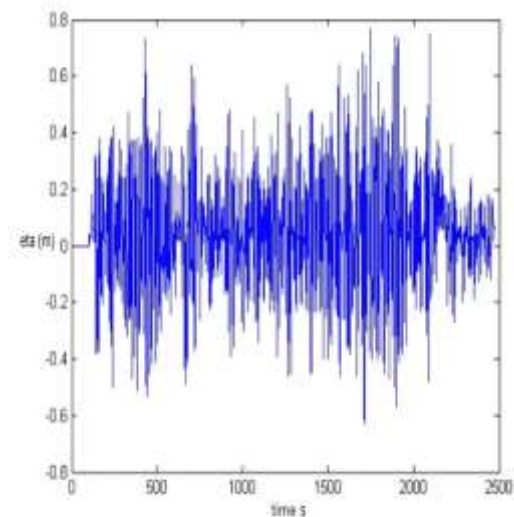
شکل (۱) شماتیک فلوم موج و آرایش سنسورها در آن جهت اندازه گیری انعکاس موج.



شکل (۲) طیف حرکت پاروی تولید موج.



شکل (۴) طیف ساخته شده نهایی.



شکل (۳) سری زمانی موج ساخته شده.

قابل پیشگیری است. ولی در فلومهای کوتاه وجود ساحل بهینه که جایگزین ساحل سنگریزه‌ای شود و فضای کمتری را اشغال کند و جاذب موج تابشی باشد مد نظر است. از این رو امواج بر روی چند ساحل مورد بررسی قرار گرفتند:

همچنین، بحث جذب موج توسط ساحل در فلومهای کوتاه برای جلوگیری از اثر بازتابش مجدد موج از پاروی موجساز حائز اهمیت است. در اکثر فلومها با قرار دادن چندین صفحه قائم فلزی مشبک با قطر متفاوت از بزرگ به کوچک این اثر

۴-۱- تاثیر روش اندازه گیری بر ضریب انعکاس

در شکل (۵) K_r بر روی ساحل سنگریزه‌ای به دو روش، در فواصل مختلف محاسبه شده است. در این شکل محور قائم ضریب انعکاس بدست آمده موج با ارتفاع ۱۰ متر و فرکانس ۱ هرتز و ضریب طیف جانسواپ $\gamma=8$ و محور افقی نسبت فاصله سنسورها به طول موج ماکزیمم در هر دو روش گودا و منسارد است. روش سه سنسور نسبت به فاصله بین سنسورها حساس نبوده و نسبت به روش دو سنسور نتایج بهتری می‌دهد. همچنین در روش گودا تا زمانی که فاصله سنسورها به طول موج در محدوده بین ۰,۲ تا ۰,۳ باشد نتایج حاصل از تحلیل منطقی به نظر می‌رسد. در بررسی ضریب انعکاس در دو روش مقایسه تحلیل حوزه زمان و حوزه فرکانس نیز داده‌ها نشان می‌دهد که روش حوزه فرکانس مقادیر ضریب انعکاس را بزرگتر نشان می‌دهد.

۴-۲- تاثیر فرکانس ماکزیمم

از مشخصه‌های اصلی یک طیف، فرکانس ماکزیمم است. جهت نشان دادن اثر این پارامتر بر انعکاس، امواجی با ارتفاع مشخصه ۸ متر و ضریب طیف جانسواپ $\gamma=8$ تولید شد. شکل (۶) نمونه‌ای از تاریخچه زمانی امواج نامنظم برخوردی و امواج برگشتی را برای فرکانس ۰,۷ نشان می‌دهد. در شکل (۷) ضریب انعکاس بر حسب فرکانس پیک طیف امواج آمده است. ملاحظه می‌شود که بر اساس این شکل با افزایش فرکانس ضریب انعکاس نیز افزایش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش فرکانس پیک تعداد موجهای برخوردی به ساحل در واحد زمان افزایش یافته و در برگشت امواج بیشتری بر هم سوار می‌شوند. بنابراین جذب انرژی ساحل کمتر شده و موج با ارتفاع بیشتری انعکاس می‌یابد.

۴-۳- تاثیر تیزی موج بر ضریب انعکاس

شکل (۸) رابطه بین تیزی موج و ضریب انعکاس مربوط به ساحل سنگریزه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضریب انعکاس موج از ساحل برای مقادیر کوچکتر تیزی موج بیشتر است و با افزایش تیزی، میزان بازتاب انرژی موج از ساحل کاهش می‌یابد. امواج تیزتر در برخورد با سنگ‌ها با نفوذ در خلل و فرج و ایجاد اغتشاش، زودتر می‌شکنند و میزان انرژی مستهلک شده بیشتر می‌شود. لذا ضریب انعکاس ساحل

- ساحل سنگریزه‌ای: ساحل سنگریزه‌ای با شیب ۱۰ درجه، دولایه با دانه بندی $D_{50} = 5\text{mm}$ $D_{50} = 20\text{mm}$ با ضریب نفوذپذیری ۰,۰۵

- ساحل فلزی نفوذناپذیر: ساحل فلزی صاف نفوذناپذیر با شیب ۳۰ درجه.

- ساحل فلزی نفوذپذیر: نفوذپذیر با سوراخ‌هایی به قطر ۶ میلی‌متر و در دو شیب متفاوت ۳۰ و ۴۵ درجه

۳-۲- آرایش سنسورها در روش دو سنسور

اگر عبارت $\text{sink} \Delta l$ در مخرج معادلات (۱۹) و (۲۰) به سمت صفر میل کند، نتایج تحلیل واگرا شده و هنگامی اتفاق می‌افتد که فاصله بین سنسورها عدد صحیحی از نصف طول موج باشد. برای حل این مشکل، چندین محدوده پیشنهاد شده است:

۱- پیشنهاد گودا و سوزوکی (۱۹۷۶) [۱]:

$$0.05\lambda_{\max} \leq \Delta l \leq 0.45\lambda_{\min} \quad (۶۱)$$

۲- پیشنهاد کیمورا (۱۹۸۵) [۱۳]:

$$0.15\lambda_{\max} \leq \Delta l \leq 0.35\lambda_{\min} \quad (۶۲)$$

۳-۳- آرایش سنسورها در روش سه سنسور

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط مارکو برای امواج تک فام، دامنه فاصله گذاری زیر پیشنهاد شده است [۲]:

$$x_{12} = \frac{\lambda_p}{10} < x_{13} < \frac{\lambda_p}{3} \quad (۶۳)$$

$$x_{13} \neq \frac{\lambda_p}{5} \quad x_{13} \neq \frac{3\lambda_p}{10} \quad (۶۴)$$

۳-۴- فاصله سنسورها از پاروی موجساز و از ساحل

ایشیدا (۱۹۷۲) و گودا و همکاران (۱۹۷۶) نشان داده‌اند که در آزمایشات اندر کنش موج و سازه ارتفاع موج در نزدیکی سازه نوسان می‌کند تا به یک حد مشخص و پایدار برسد. این نوسانات در فاصله یک طول موج تقریباً قابل اغماض است. بنابراین پیشنهاد کردند که سنسورها حداقل برابر یک طول موج (طول موج متناظر با فرکانس ماکزیمم) از سازه انعکاسی فاصله داشته باشند [۱].

۴- نتایج

در این قسمت نتایج آزمایشگاهی آمده است. تلاش کردیم نتایج مطالعه را از ابعاد مختلف بررسی نماییم.

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2\pi H_s/gT_m^2}} T_m = T_p/1.1 \quad (65)$$

$$K_r = \tanh(a \xi_0^b) \quad (66)$$

سنگی با افزایش تیزی موج کاهش چشمگیری را از خود نشان می‌دهد.

جدول (۱) پارامترهای فرمول زانوتی و وندرمیر.

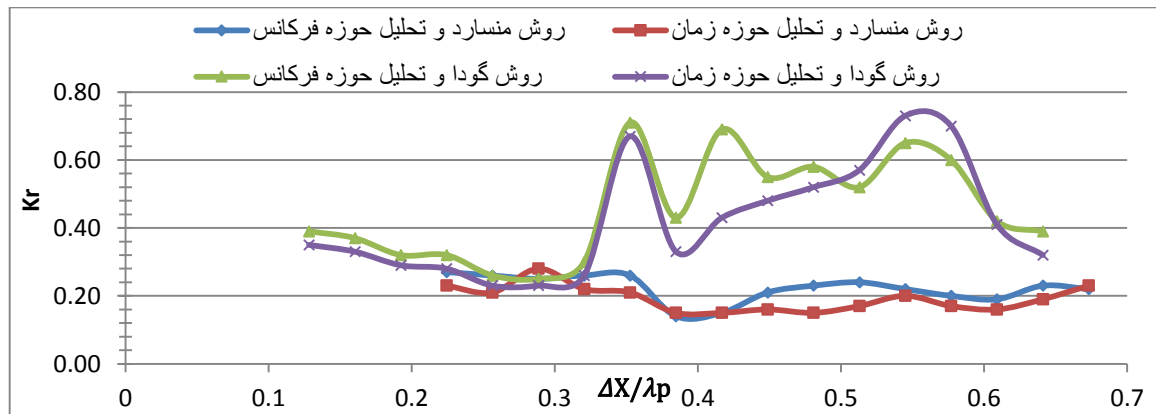
| نوع ساحل | a | b |
|----------------|------|------|
| سنگی نفوذ پذیر | ۰,۱۲ | ۰,۸۷ |
| صاف | ۰,۱۶ | ۱,۴۳ |

جدول (۲) K_r ساحل‌ها به روش باربارازانوتی.

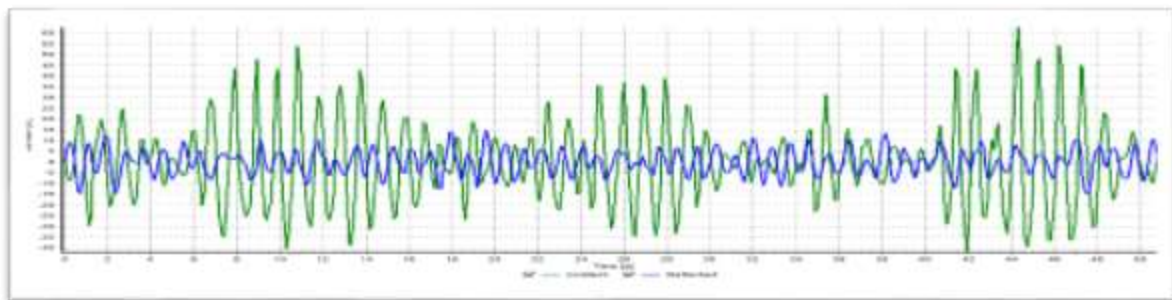
| مشخصات موج | ساحل صاف نفوذ ناپذیر با شیب ۴۵ درجه | ساحل صاف نفوذ ناپذیر با شیب ۳۰ درجه | ساحل سنگی نفوذ پذیر با شیب ۱۰ درجه |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| $H_s = 10$ $f_p = 0.7$ | ۰,۹۷ | ۰,۷۵ | ۰,۱۳ |
| $H_s = 10$ $f_p = 1$ | ۰,۸۶ | ۰,۵۳ | ۰,۱ |
| $H_s = 8$ $f_p = 0.7$ | ۰,۹۸ | ۰,۸۲ | ۰,۱۴ |
| $H_s = 8$ $f_p = 1$ | ۰,۹۱ | ۰,۶ | ۰,۱ |

۴-۴- تاثیر خصوصیات ساحل بر ضریب انعکاس

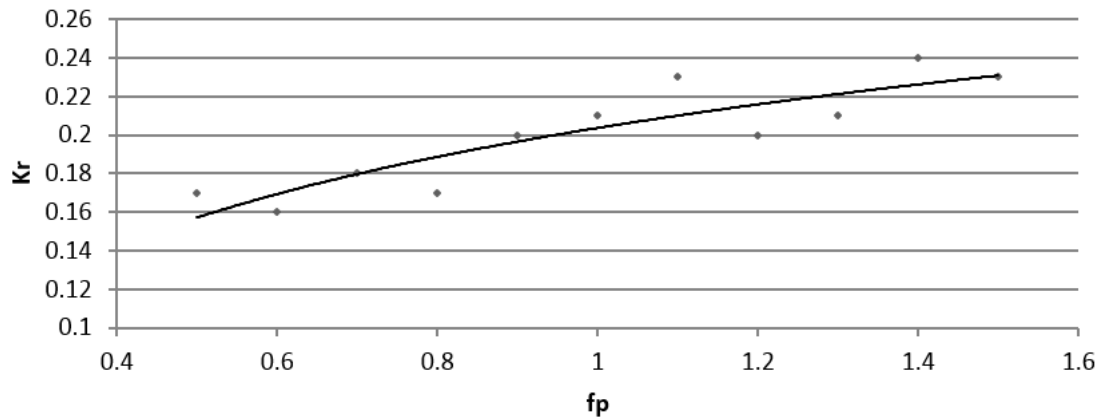
ضریب انعکاس توسط دیگر محققین به روش تجربی نیز بررسی شده است. در این روشها خصوصیات ساحل حائز اهمیت است. در اینجا برای معتبر سازی نتایج ابتدا با یکی از روشهای تجربی ضریب انعکاس تقریبی سواحل مورد بررسی، محاسبه شد. روابط زیر که توسط زانوتی و وندرمیر (۲۰۰۸) ارائه شده، مبنای کار قرار گرفت [۱۴]. در فرمول بیان شده α شیب ساحل و ξ_0 تیزی موج هستند. ضرائب a و b ثابت بوده و با توجه به جدول (۱) در محاسبات به کار می‌روند. ضریب انعکاس سواحل مورد بررسی به روش تجربی زانوتی و وندرمیر محاسبه و در جدول (۲) آمده‌اند.



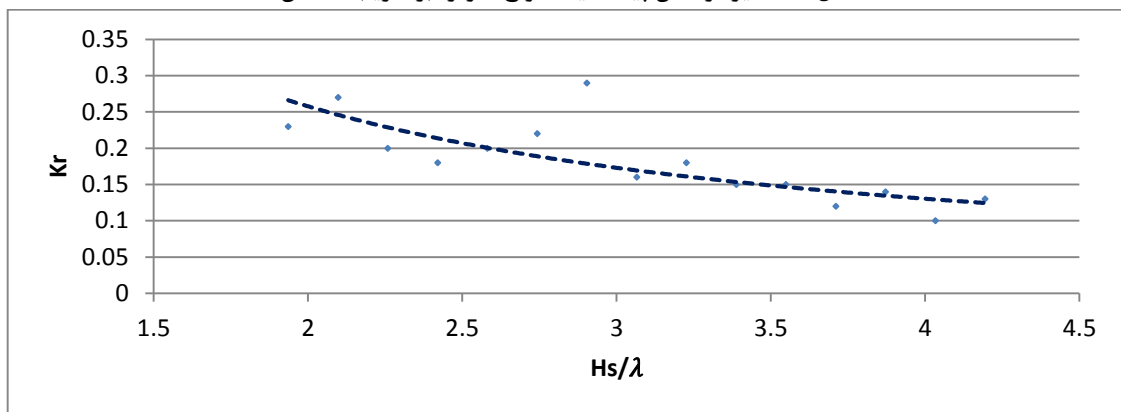
شکل (۵) اثر فاصله بین سنسورها بر ضریب انعکاس در دو روش حوزه زمان و حوزه فرکانس.



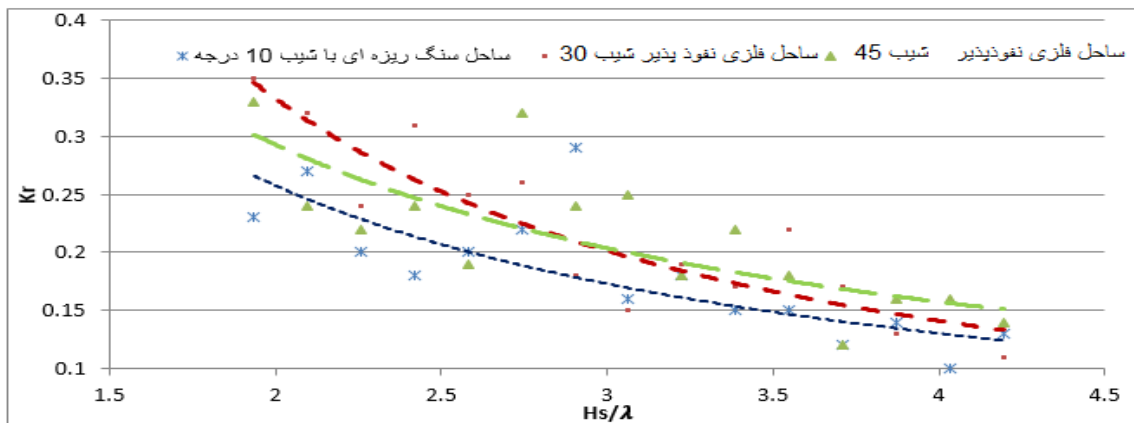
شکل (۶) سری زمانی امواج تابشی و انعکاسی.



شکل (۷) تاثیر فرکانس پیک طیف امواج (هرتز) بر ضریب انعکاس.



شکل (۸) تاثیر تیزی موج بر ضریب انعکاس.



شکل (۹) تاثیر نوع ساحل بر ضریب انعکاس.

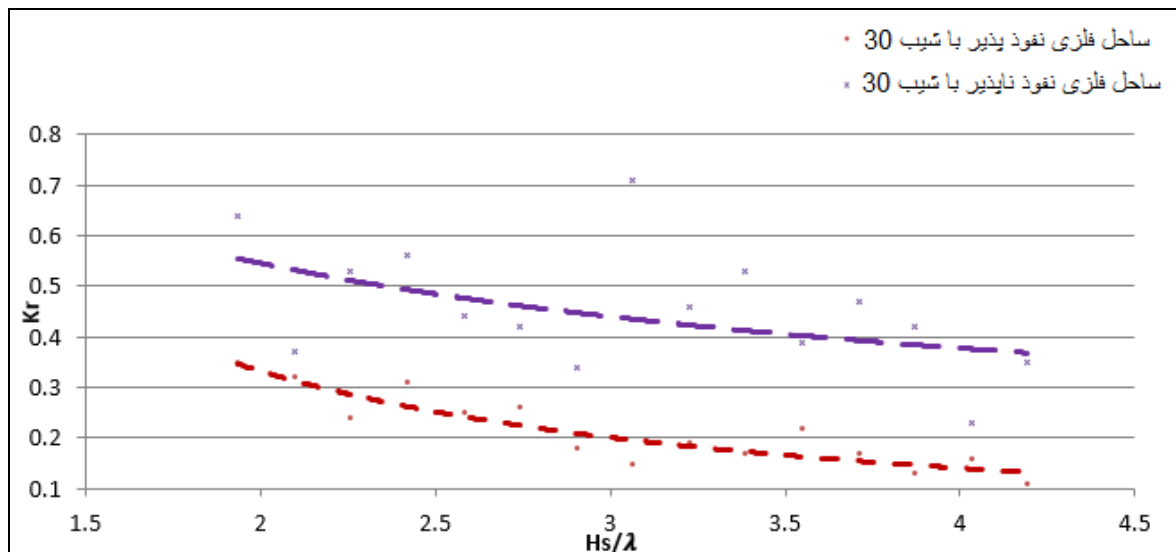
می کنند. در فلومهای کوتاه اثر انعکاس موج و دوباره بازگشت موج توسط پاروی موجساز بیشتر حائز اهمیت است. بنابراین در کارهای آزمایشگاهی فلوم موج ارائه ساحل بهینه با طول کمتر که فضای کمتری از فلوم را در بر بگیرد و همان اثر ساحل سنگریزه‌ای را داشته باشد، مدنظر است. شکل (۹) تغییرات ضریب انعکاس با تیزی موج را برای ساحلهای فلزی نفوذ پذیر و ساحل سنگریزه‌ای با زاویه‌های مختلف نشان می دهد. با توجه به این شکل که ساحل فلزی نفوذپذیر با شیب

۴-۵- ارائه ساحل بهینه برای فلومهای کوتاه

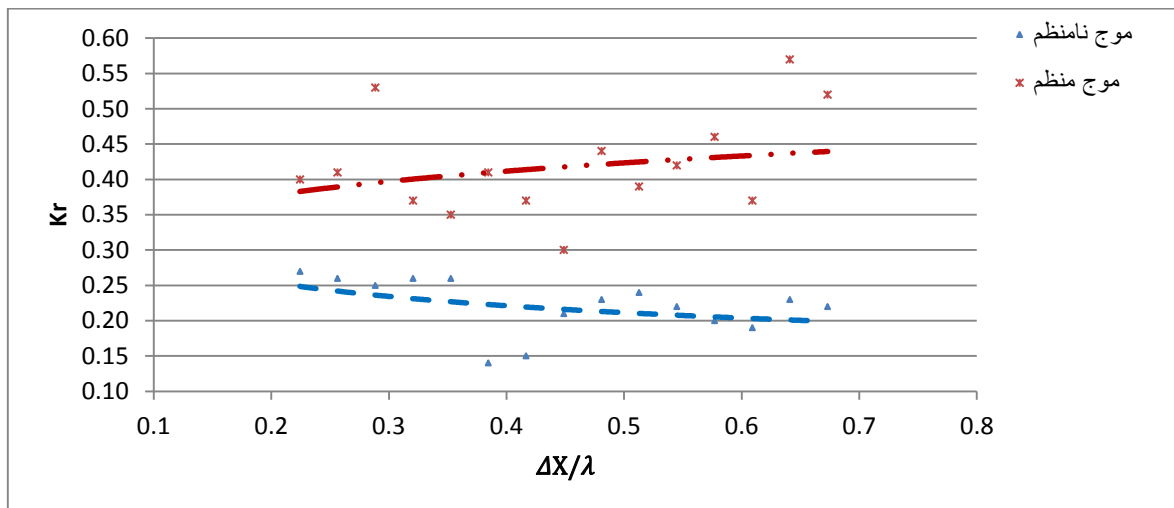
بحث جذب موج در انتهای فلوم در کارهای آزمایشگاهی مورد توجه بوده و هست. برای کاهش اثر انعکاس موج در فلوم می توان از ساحلهای مختلف سنگریزه‌ای با طول چند متر و یا چند دیوار قائم مشبک که با تغییر اندازه قطر سوراخها از بزرگ به کوچک در فاصله مشخص از هم قرار می گیرند، استفاده نمود. اما این جاذبهها طول زیادی از فلوم را اشغال

ساحل نفوذپذیر بعلت رد شدن آب از منافذ خیلی کمتر از زمانی است که ساحل نفوذناپذیر باشد. در مرحله بعدی امواج نامنظم و امواج منظم معادل آنها جهت برآورد ضریب انعکاس مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس شکل ۱۱ مشاهده می شود که ضریب انعکاس موج منظم معادل به مراتب بیشتر از موج نامنظم است. این امر را می توان بدین گونه توجیه نمود که در تابش موج منظم انرژی کمتری جذب ساحل می شود و بیشتر انعکاس می یابد.

۳۰ تا ۴۵ درجه با طول حدود ۱ تا ۱٫۵ متر کوتاهتر از ساحل سنگریزه ای جایگزین مناسبی برای آن است. هرچه ساحل نفوذپذیرتر باشد، میزان جذب انرژی موج بیشتر بوده K_r کمتر می شود. برای بررسی نقش نفوذپذیری در ضریب انعکاس از دو ساحل نفوذپذیر و نفوذناپذیر استفاده شد. این دو ساحل در زاویه ۳۰ درجه در انتهای فلوم قرار گرفتند و ضریب انعکاس برای موج یکسان برخوردی برآورد شد (شکل ۱۰). همانطور که در این شکل مشاهده می شود، انعکاس



شکل (۱۰) تاثیر نفوذپذیری بر ضریب انعکاس.



شکل (۱۱) تاثیر موج منظم و نامنظم بر ضریب انعکاس.

قرار گیرد. برای محاسبه ضریب انعکاس روش اندازه گیری، نوع موج و نوع ساحل را باید مد نظر قرار داد. روشهای اندازه گیری در این پروژه ۲ سنسور و ۳ سنسور ثابت بود. نتایج نشان داد که در مقایسه بین روشها، روش گودا از صحت

۵- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق کار آزمایشگاهی با استفاده از مدل های مختلف انعکاس موج در فلوم انجام شد. تست ها طوری برنامه ریزی شد تا با تغییر پارامترهای موثر، ضریب انعکاس مورد بررسی

- [6] Hughes, S. A., "Laboratory Wave Reflection Analysis Using Co Located Gages", Coastal Engineering, Vol. 20, pp. 223-247, 1993.
- [7] Frigaard, P., Brorsen, M., "A Time Domain Method for Separating Incident and Reflected Irregular Waves". Coastal Eng. Vol. 24, pp. 205-215, 1995.
- [8] Baldock, T.E., Simmonds, J.M., "Separation of Incident and Reflected Waves over Sloping Bathymetry". Coastal Engineering. Vol. 38, pp. 167-176, 1999.
- [9] Suh, K. D., Park, W. S., Park, S. P., "Separation of Incident and Reflected Waves in Wave-Current Flumes". Coastal Engineering. Vol. 43, pp.149-159, 2001.
- [10] Zhu, S., Chwang, A. T., "Estimation of Laboratory Wave Reflection by a Transfer Function Method". J. Engineering Mechanics. 2001.
- [11] Cang, H. K., Hsu, T. W., "A Two-Point Method For Estimating Wave Reflection Over a Sloping Beach". Ocean Engineering. Vol. 30, pp.1833-1847, 2003.
- [12] Ozeren, Y., Experimental and Numerical Investigations of Floating Breakwater Performance, Ph.D Thesis, the University of Mississippi. USA, 2009.
- [13] Dean, R.G., Dalrymple, R.A., "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist", World Scientific publisher, London, pp. 211-221, 1991.
- [14] Zanuttigh, B., Van der Meer, J. W., "Wave Reflection from Coastal Structures in Design Conditions". Coastal Engineering, Vol. 55, pp. 771-779, 2008.
- کمتری برخوردار است؛ و در اکثر موارد ضریب انعکاس را تا ۱۰ درصد بیشتر از روش منسارد نتیجه می‌دهد. برای اطمینان از صحت نتایج از روش تجربی باربارا زانوتی استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که روش منسارد نسبت به روش گودا به روش زانوتی نزدیک تر است. آزمایشها برای تعیین اثر فرکانس پیک طیف موج بر ضریب انعکاس نشان داد که هر چه فرکانس ماکزیمم طیف بزرگتر می‌شود، ضریب انعکاس افزایش می‌یابد. ضریب انعکاس ساحل برای مقادیر کوچکتر تیزی موج بیشتر است و با افزایش تیزی، میزان بازتاب انرژی موج از ساحل کاهش می‌یابد. آزمایشات روی ساحل نفوذ پذیر و نفوذ ناپذیر نشان داد که هر چه ساحل نفوذپذیرتر باشد بدلیل بیشتر شدن میزان آب عبوری انرژی موج کاهش یافته و بازگشت کمتر می‌شود. بر اساس کلیه این آزمایشات برای فلوم‌های کوتاه، می‌توان ساحل فلزی نفوذپذیر با زاویه ۳۰ تا ۴۵ را پیشنهاد داد که جایگزین ساحل سنگریزه‌ای با طول زیاد و شیب کم گردد. این نوع ساحل برای جذب امواج تابشی فضای کمتری از فلوم را در برمی‌گیرد. جهت بررسی اثر منظمی و نامنظمی موج بر ضریب انعکاس از دو دسته موج منظم و نامنظم برای آزمایش‌ها استفاده شد و نتایج نشان داد که هر چه موج منظم‌تر باشد؛ ضریب انعکاس بزرگتر می‌شود. همچنین در موجهای نامنظم هر چه تیزی موج بیشتر شود چون موج زودتر شکسته شده و انرژی آن مستهلک می‌شود ضریب انعکاس کاهش می‌یابد.

۸- مراجع

- [1] Goda, Y., Suzuki, Y. "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Waves". Proc. Int. 15th Conf. on Coastal Engineering, ASCE, New York, pp. 828-845. 1976.
- [2] Mansard, E.P.D., Funke, E.R. "The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method". Proc. Int. 17th Conf. on Coastal Engineering, ASCE, pp. 154-172, 1980.
- [3] Tatavarti, R.V., Huntley, D.A., Bowen, A.J. "Incoming and Outgoing Wave Interactions on Beaches". Proc. Int. 21st Conf. on Coastal Engineering, ASCE, pp. 136-150, 1988.
- [4] Kubota, S., Mizuguchi, M., and Takezawa, M. "Reflection from Swash Zone on Natural Beaches", Proceedings of the 22nd Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vol. 1, pp. 570-583, 1990.
- [5] Walton, T. L., "Wave Reflection from Natural Beaches", Ocean Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 239-258, 1992.