

مقایسه روش‌های تحلیلی تجزیه امواج به منظور محاسبه ضریب انعکاس موج

علی عبدالعلی^۱، مرتضی کلاهدوزان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در طراحی سازه‌های ساحلی، محاسبه مشخصات موج انعکاس یافته از مراحل مهم طراحی محسوب می‌شود. از طرفی پس از برخورد موج به سازه پدیده‌های پیچیده‌ای اتفاق می‌افتد که باعث تغییر در بعضی از مشخصات موج و سازه (انرژی جذب شده، انعکاس موج و ...) می‌گردد. بررسی این تغییرات در گرو تعیین مشخصات موج انعکاس یافته است، در حالیکه موج انعکاس یافته به تنهایی قابل اندازه‌گیری نیست. محققین روش‌های تحلیلی و تجربی مختلفی برای تجزیه موج حاصل از ترکیب موج برخوردی و انعکاس یافته ارائه نموده‌اند. یک روش تحلیلی در برآورد ضریب انعکاس، تحلیل در حوزه زمانی است. در این روش، امواجی که در دو جهت مخالف در حال انتشار هستند توسط روش گذر از نقطه صفر جدا می‌شوند. روش دیگر، استفاده از تحلیل فوریه سریع در تجزیه امواج ترکیبی تحت عنوان تحلیل طیفی است. در این تحقیق و با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی، نتایج حاصل از دو روش تحلیلی مذکور مقایسه شده‌اند. به منظور مقایسه نتایج این دو روش از اندازه‌گیری‌های تراز سطح آب انجام شده که در طی یک برنامه مدل سازی فیزیکی برداشت گردیده، استفاده شده است. نتایج مبتنی بر روش‌های تجزیه امواج ترکیبی، نشانگر آن است که روش تحلیل طیفی در مقایسه با روش تحلیل در حوزه زمانی، مقادیر بزرگ‌تری را به عنوان ارتفاع موج برخوردی و انعکاسی ارائه می‌کند. با این وجود، ضرایب انعکاس در هر دو روش مقادیر نزدیکی دارند. همچنین، در مقایسه با روش تحلیل طیفی، روش تحلیل در حوزه زمانی مقادیر نزدیک‌تری را برای ارتفاع موج برخوردی نسبت به ارتفاع موج تولیدی در مدل فیزیکی و همچنین محاسبه شده توسط تئوری موج ساز نتیجه می‌دهد.

کلمات کلیدی: ضریب انتقال موج، تحلیل طیفی، تحلیل در حوزه زمانی، مدل سازی فیزیکی

Comparison of Analytical Methods of Wave Decomposition for Evaluating Reflection Coefficient

A. Abdolali¹, M. Kolahdoozan²

1- MSc, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University

2- Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir Univ.

Abstract

Calculation of the reflected waves against obstacles is a prominent step in designing coastal structures. In addition, a complex process occurs during wave collision with beaches or breakwaters. These processes cause wave characteristics to be (energy dissipation, reflected wave, etc.). The new wave characteristics are dependent on reflected wave height straightly which are not measureable. In other words, finding an appropriate method for identifying reflected waves is an essential part of each marine project.

* نویسنده مسوول مقاله mklhdzan@aut.ac.ir

In recent years analytical and experimental methods have been established for the decomposition of incident and reflected waves. An analytical solution for estimation of the reflection coefficient is time domain analysis. In this method, waves which radiate in opposite directions could be separated by zero crossing method. Alternative analytical way is using fast Fourier method which is called spectrum analysis. In this paper, above methods are compared by using experimental data. Two-dimensional experimental studies are carried out in the Hydraulic laboratory of Amirkabir University of Technology (Tehran, Polytechnic) to collect appropriate time series. Results reveal that although spectrum analysis, compared with time domain analysis, allocates higher wave height for both incident as well as reflected waves, reflection coefficients are virtually same in both methods. Furthermore, evaluated incident wave height in time domain analysis is close to wave height in wave maker theory.

Keywords: reflection coefficient, spectrum analysis, time domain analysis, physical modeling

۱- مقدمه

از اولین و مهم‌ترین مراحل بررسی پدیده‌های هیدرودینامیکی حاکم بر مناطق ساحلی با امواج کوتاه، تجزیه امواج ترکیبی حاصل از انعکاس است. در طبیعت امواج منظم وجود ندارد. همچنین انعکاس از ساحل و سایر سازه‌های دریایی مانند موجشکن‌ها موجب ترکیب یک سری موج که در جهات مختلف انتشار می‌یابند می‌شود. لذا ارائه روشی برای تجزیه موج حاصل از اجتماع امواج ضروری است. در این راستا پژوهشگران مختلفی از جمله تورنتون و کالون (۱۹۷۲)، گودا و سوزوکی (۱۹۷۶)، منسارد و فانک (۱۹۸۰)، آی آ اچ ار/پیانک (۱۹۹۶) و بالداک و سیموندز (۱۹۹۹) روش‌های متفاوتی برای تجزیه امواج برخوردی و انعکاس یافته به منظور برآورد ضریب انعکاس موج معرفی کرده‌اند [۱، ۲، ۳، ۴، ۵].

در نظر برخی از این محققان، تحلیل طیفی سری‌های زمانی تراز سطح آب قادر به تجزیه امواج برخوردی و انعکاسی است. در این روش یک موج نامنظم را می‌توان به صورت ترکیب چند موج منظم با دوره‌های تناوب مختلف نشان داد. در آنالیز طیفی، انتشار انرژی توسط هر یک از امواج منظم فرض شده با استفاده از اطلاعات ثبت شده از پروفیل سطح آب در روش حوزه زمانی و انتقال آن به روش حوزه فرکانسی محاسبه می‌شود. این فرایند با تکنیک تبدیل فوریه سریع^۱ صورت می‌گیرد. از طرف دیگر در روش تحلیل در حوزه زمانی به شناخت امواج منفرد سری‌های زمانی ثبت شده پرداخته می‌شود و مشخصات هر موج شامل ارتفاع و دوره تناوب آن بر اساس ضوابط این روش محاسبه می‌شود [۲]. روش‌های

ذکر شده محدودیت‌هایی دارند که شامل محدودیت در حداقل تعداد سری زمانی تراز سطح آب و همچنین محدودیت در فاصله بین محل‌های اندازه‌گیری تراز سطح آب هستند.

در بررسی پدیده انعکاس در مناطق ساحلی، ضریب بدون بعد انعکاس نشان دهنده نسبت ارتفاع موج انعکاس یافته به ارتفاع موج برخوردی است. در این مقاله، مقادیر محاسبه شده برای ارتفاع امواج منفرد برخوردی و انعکاسی، همچنین ضریب انعکاس موج محاسبه شده به دو روش تحلیل طیفی و حوزه زمانی ارائه می‌شود و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

۲- ترکیب امواج

معادله تراز سطح آب برای حالتیکه دو موج با هم ترکیب شده‌اند بر حسب زمان و مکان طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود. شکل ۱ موج حاصل از ترکیب امواج برخوردی و انعکاس یافته را نشان می‌دهد [۶]

$$\eta_T = \eta_i + \eta_r = \frac{H_i}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H_r}{2} \cos(kx + \omega t + \varepsilon) \quad (1)$$

با استفاده از معادلات مثلثاتی پروفیل سطح آب از معادله (۲) حاصل می‌شود.

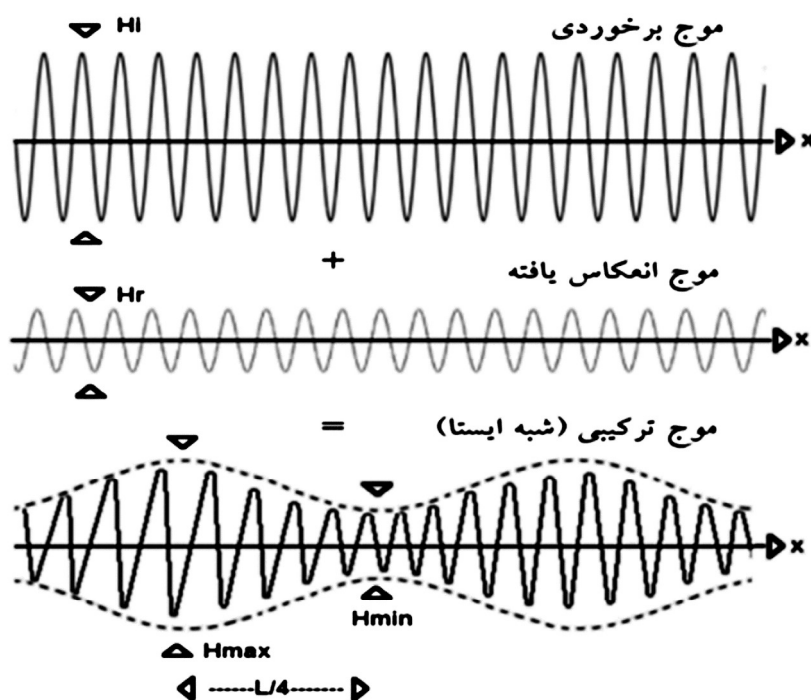
سطح آب در نقاطی با فواصل مشخص همواره برابر صفر (گره) و یا دو برابر ارتفاع موج برخوردی (پادگره) است. لازم به یادآوری است که چنین امواجی از انعکاس کامل موج پیش‌رونده به دیوار یا مانع حاصل می‌شوند. اما در طبیعت همه انرژی موج منعکس نمی‌شود بلکه بخشی از آن منعکس می‌شود. لذا پروفیل سطح آب به صورت حاصل جمع موج برخوردی و بازتابی حاصل می‌شود که دارای گره و پادگره ناقص هستند. به عبارت دیگر، تغییر فاز ایجاد شده توسط فرآیند انعکاس، موجب تشکیل نشدن گره حقیقی در پروفیل موج می‌شود. موج حاصل به صورت حاصل جمع امواج در نظر گرفته می‌شود که در هر نقطه یک پوش بر آن مماس می‌باشد. لازم است حداکثر و حداقل مقادیر این پوش، که در شکل ۱ به صورت نقطه چین رسم شده است را محاسبه نمود.

$$\eta_T = \left(\frac{H_i}{2} \cos kx + \frac{H_r}{2} \cos(kx + \varepsilon) \right) \cos \omega t + \left(\frac{H_i}{2} \sin kx - \frac{H_r}{2} \sin(kx + \varepsilon) \right) \sin \omega t \quad (2)$$

به منظور سادگی، معادلات بالا به صورت مجموع معادلات مثلثاتی با ضرایب مشخص در معادله (۳) نوشته می‌شود.

$$\eta_T = I(x) \cos \omega t + F(x) \sin \omega t \quad (3)$$

در این معادلات، k عدد موج، x فاصله افقی از مبدأ، σ بسامد زاویه‌ای، ε فاز اولیه، H_i ارتفاع موج برخوردی و H_r ارتفاع موج انعکاس یافته است. در صورتی که ارتفاع موج انعکاس یافته با موج برخوردی برابر باشد ($H_i = H_r$) و فاز اولیه برابر صفر باشد ($\varepsilon = 0$) موج تشکیل شده موجی ایستا است. در امواج ایستا، تراز



شکل ۱- طرح شماتیک از چگونگی ترکیب موج برخوردی (شکل بالا) و انعکاسی (شکل میانی) و تشکیل موج ترکیبی (شکل پایین)

$$H_i = \eta_{T_{\max}} + \eta_{T_{\min}} \quad (9)$$

$$H_r = \eta_{T_{\max}} - \eta_{T_{\min}} \quad (10)$$

$$k_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (11)$$

برای محاسبه فاز اولیه کافی است فاصله مبدأ تا نزدیک‌ترین شبه گره و شبه پاد گره را پیدا کرده و یکی از معادلات (۱۲) را حل نمود.

$$(12)$$

$$2kx + \varepsilon = \begin{cases} 2n\pi, n = 0, 1, 2, \dots \text{ for the maximum} \\ (2n+1)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \text{ for the minimum} \end{cases}$$

۳- امواج نامنظم

در طبیعت عامل اصلی ایجاد امواج کوتاه وزش باد روی سطح آزاد آب است. امواج موجود در طبیعت از نوع منظم (ارتفاع، دوره تناوب و فاز ثابت) نیستند. در حقیقت، موج واقعی از ترکیب امواج با ارتفاع، دوره تناوب و جهت مختلف تشکیل می‌شود [۷]. لذا مطابق شکل ۲، پروفیل سطح آب به صورت تصادفی و نامنظم در مکان و زمان است. بر خلاف امواج منظم که با یک معادله نشان داده می‌شوند، امواج نامنظم با یک سری زمانی نمایش داده می‌شوند.

به منظور تجزیه امواج ترکیبی، مطالعه سری زمانی امواج نامنظم، به دو روش حوزه زمانی^۲ (قطار موج) و حوزه فرکانسی^۳ (طیفی) امکان پذیر است. در این مقاله، پس از بررسی محدودیت و الزامات این روش‌ها، سری‌های زمانی اندازه گیری شده در آزمایشگاه، با دو روش مذکور تجزیه و نتایج مقایسه می‌شوند.

۳-۱- روش حوزه زمانی

۳-۱-۱- روش گذر از صفر^۴

در این روش، بین دو نقطه متوالی که در آن‌ها سطح آب از خط صفر (خط تراز در حالت رکود) رد می‌شود، امواج منفرد جدا می‌شوند.

به طور معمول با گرفتن مشتق اول و دوم و برابر صفر قرار دادن آن‌ها می‌توان این مقادیر را از معادله (۴) محاسبه نمود [۶].

$$\frac{\partial \eta_T}{\partial t} = -I(x)\omega \sin \omega t + F(x)\omega \cos \omega t = 0 \quad (4)$$

حداکثر و حداقل مقادیر این پوش یا همان کرانه‌های سطح آب $[\eta_T(x)]_m$ به صورت معادله (۵) است

$$[\eta_T(x)]_m = \mp \sqrt{\frac{H_i^2}{2} + \frac{H_r^2}{2} + \frac{H_i H_r}{2} \cos(2kx + \varepsilon)} \quad (5)$$

معادله (۵) نشان می‌دهد که کرانه‌ها متناسب با فاصله به صورت متناوب تغییر می‌کند. ارتفاع امواج در نقاط شبه گره و شبه شکم به صورت معادلات (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

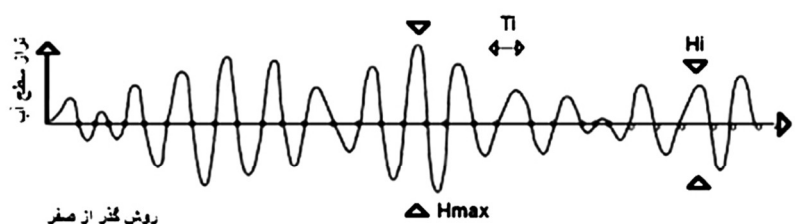
$$\eta_{T_{\max}} = \frac{1}{2}(H_i + H_r) \quad (6)$$

$$\eta_{T_{\min}} = \frac{1}{2}(H_i - H_r) \quad (7)$$

مطابق معادله (۸) فاصله دو شبه گره و شبه پاد گره از اختلاف فاز این نقاط محاسبه می‌شود.

$$(2kx_2 + \varepsilon) - (2kx_1 + \varepsilon) = \pi \rightarrow x_2 - x_1 = L/4 \quad (8)$$

یک راه حل تقریبی در تحقیقات آزمایشگاهی، حرکت دادن یک موج سنج در طول مخزن برای محاسبه ضریب انعکاس مانع است. در این روش ارتفاع بیشینه موج در هر نقطه اندازه گیری می‌شود. طبق معادله (۹) و (۱۰)، با استفاده از بیشترین و کمترین مقادیر، ارتفاع موج برخوردی و انعکاس یافته محاسبه می‌شوند. همچنین معادله (۱۱) ضریب انعکاس مانع را نشان می‌دهد [۱] لازم به ذکر است، با توجه به احتمال ترکیب بیش از دو موج در مدل سازی فیزیکی و همچنین تأثیر عوامل خارجی شامل خطای اندازه گیری بر نتایج، این روش دارای تقریب خواهد بود. لذا یافتن روش‌های قابل اعتمادتر امری ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۲- سری زمانی امواج نامنظم

امواج به دلیل شکست موج و آثار تغییرات عمق آب از توزیع رایلی پیروی نمی‌کنند [۲]. تحقیقات موجود در ادبیات فنی نشان داده است که در بعضی نقاط اطلاعات ثبت شده در یک حوضچه بر توزیع رایلی منطبق است. لازم به ذکر است که ارتفاع امواج با مجذور میانگین مربعات یکنواخت شده است. تابع توزیع چگالی احتمال برای توزیع رایلی به صورت معادله (۱۳) است [۶].

$$p\left(\frac{H}{H_{rms}}\right) = \frac{\pi}{2} e^{\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right]} \quad (13)$$

۳-۱-۲- روش حوزه فرکانسی (تحلیل طیفی)

طبق فرضیات انجام شده در این روش، یک موج نامنظم را می‌توان به صورت ترکیب چند موج منظم با دوره‌های تناوب مختلف نشان داد. همچنین انرژی مشخصی توسط هر یک از این امواج منتقل می‌شود که مجموع آن‌ها برابر انرژی کل منتقل شده توسط موج نامنظم است. این روش بر مبنای آنالیز طیفی امواج را جدا می‌کند. در آنالیز طیفی، انتشار انرژی توسط هر یک از امواج منظم فرض شده با استفاده از اطلاعات ثبت شده از پروفیل سطح آب در روش حوزه زمانی و انتقال آن به روش حوزه فرکانسی محاسبه می‌شود. این فرایند با تکنیک تبدیل فوریه سریع صورت می‌گیرد. همچنین، واریانس تغییرات تراز سطح آب حول نقطه مبدأ از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود [۲].

$$Var = \sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \eta^2(t) dt = \frac{1}{2} a^2 \quad (14)$$

در این معادله σ^2 = واریانس، T = دوره تناوب، a = اندازه موج و $\eta(t)$ = سری زمانی تراز سطح آب است.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، سطح آب می‌تواند از تراز میانگین با شیب مثبت و یا منفی عبور کند. به گذر با شیب مثبت عبور بالا و با شیب منفی عبور پایین گویند. شایان ذکر است، هر دو روش عبور بالا و پایین نتایج مشابهی دارند [۸]. در این روش ارتفاع امواج منفرد از اختلاف بیشترین و کمترین مقادیر سطح آب اندازه‌گیری شده (بین دو صفر با شیب منفی) محاسبه می‌شوند (H_{max}). همچنین دوره تناوب این امواج فاصله زمانی دو صفر یا دو قله موج متوالی است (T_l). در این روش قله‌های محلی در نظر گرفته نمی‌شوند. مشکل اصلی این روش این است که به تعداد زیادی سری زمانی برای تایید صحت محاسبات نیاز است. برای انجام تحقیقات عملی، عمدتاً از امواج با اندازه کوچک در مقایسه با امواج بلندتر صرف نظر می‌شود. پارامترهای مورد استفاده متداول در این روش H_s یا عبارتی میانگین ارتفاع در بین یک سوم از بلندترین امواج (ارتفاع عمده^۵) ثبت شده و میانگین یک سوم بالایی دوره‌های تناوب (دوره تناوب عمده^۶) هستند.

تحقیقات نشان داده است که مقادیر محاسبه شده با استفاده از دوره تناوب عمده، تا حدودی بزرگ‌تر از مقادیر متناظر بدست آمده از میانگین دوره‌های تناوب هستند. لذا برای اجتناب از این خطا استفاده از دوره تناوب میانگین متداول است [۲]. استدلال روش حوزه زمانی این است که ارتفاع امواج منفرد از توزیع رایلی پیروی می‌کنند و همچنین فرض شده است که تراز سطح آب از توزیع گوسی تبعیت می‌کند [۹]. در اینجا انرژی موج در یک بازه کوتاه از دوره‌های تناوب متمرکز شده است. مقادیر تئوری استخراج شده از توزیع رایلی منطبق بر این فرض است. اما در آب‌های کم عمق،

۴- جداسازی امواج با استفاده از سری‌های زمانی ثبت شده در دو نقطه

بر طبق تئوری خطی، معادلات موج برخوردی و انعکاس یافته به صورت معادلات (۱۹) و (۲۰) است. در این معادلات ε_r و ε_i فازهای اولیه امواج برخوردی و انعکاسی هستند.

$$\eta_i = H_i \cos(kx - \omega t + \varepsilon_i) \quad (19)$$

$$\eta_r = H_r \cos(kx + \omega t + \varepsilon_r) \quad (20)$$

در صورتی که دو موج نگار در فاصله Δx از هم سری زمانی تراز سطح آب را برداشت کنند، معادلات تراز سطح آب در این دو نقطه به صورت معادلات (۲۱) و (۲۲) قابل نمایش هستند. در این معادلات x_2 و x_1 محل قرار گرفتن دو موج نگار هستند، بطوریکه $\Delta x = x_2 - x_1$ ضرایب موجود در این معادلات در معادله (۲۳) و (۲۴) آمده است (شکل ۳).

$$(21)$$

$$\eta(x_1, t) = (\eta_i + \eta_r)_{x=1} = A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t)$$

$$(22)$$

$$\eta(x_2, t) = (\eta_i + \eta_r)_{x=2} = A_2 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t)$$

که در آن:

انرژی و واریانس طبق معادله (۱۵) و به صورت مستقیم با هم ارتباط دارند.

$$E = \gamma_w L \sigma^2 \quad (15)$$

مرحله نخست در تبدیل فوریه سریع معادل قرار دادن سری زمانی سطح آب موج نامنظم با مجموع یک سری نامحدود از امواج منظم سینوسی با بزرگی a بسامد زاویه‌ای ω و فاز اولیه δ است (معادله ۱۶).

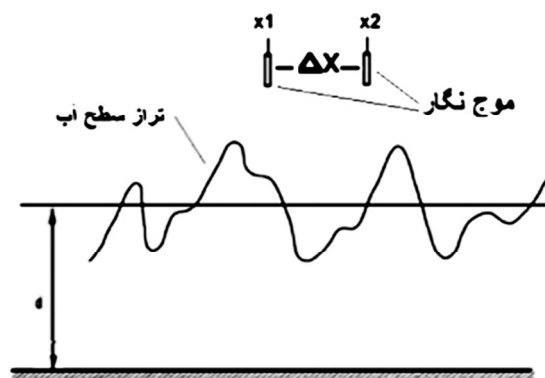
$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t + \delta_i) \quad (16)$$

$S(f)$ را چگالی طیفی انرژی موج یا به طور ساده‌تر طیف موج نیز می‌نامند. لذا معادله (۱۷) بین طیف موج و واریانس نوشته می‌شود.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i^2}{2} = \int_0^{\infty} S(f_i) df \quad (17)$$

نتیجه معادله (۱۸)، سطح زیر طیف موج به عنوان صفرمین ممان طیف (m_0) است. همچنین، سایر ممان‌های این طیف پیوسته از معادله (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i S(f) df \quad (18)$$



شکل ۳- جانمایی موج نگار به منظور ثبت تراز سطح آب در دو نقطه

$$f_{\min} = \frac{\Delta x}{L} = 0.05 \quad (27)$$

$$f_{\max} = \frac{\Delta x}{L} = 0.45 \quad (28)$$

در این مقاله، ضوابط حاکم بر روش‌های تحلیلی بررسی می‌شود. همچنین، موج ترکیبی تولید شده در آزمایشگاه با استفاده از روش‌های تحلیلی تجزیه می‌شوند. در نهایت، نتایج بدست آمده به عنوان ارتفاع امواج برخوردی و انعکاس یافته مقایسه می‌شوند.

۵- مدل‌سازی فیزیکی

جهت بررسی و مقایسه روش‌های تحلیلی تجزیه امواج، آزمایشاتی در یک کانال موج ساز در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) انجام شده است (شکل ۴). این مدل آزمایشگاهی برای بررسی پدیده‌های هیدرودینامیکی در آب‌های کم عمق و با عمق متوسط طراحی شده است. این کانال مجهز به سه عدد موج نگار با دقت ۱ میلی‌متر و فرکانس برداشت ۲۰ داده در ثانیه است. مولد موج مورد استفاده از نوع باله‌ای بوده که توانایی تولید موج با دوره تناوب بزرگ‌تر از ۱/۵ ثانیه و ارتفاع کمتر از ۱۸ سانتیمتر را داراست. از آنجایی که پس از برخورد موج تولید شده به جاذب موج موجود در انتهای دیگر کانال، انعکاس رخ می‌دهد، موج حاصل ترکیبی از موج برخوردی و انعکاس یافته است. شکل ۵ محل قرار گیری موج نگارها را نشان می‌دهد. در این شکل، L1 و L2 فاصله بین موج نگارها را نشان می‌دهد

اشکال ۶، ۷ و ۸ مقادیر برداشت شده تراز سطح آب در ۳ نقطه در طول کانال برای موج تولیدی توسط مولد موج ساز با دوره تناوب ۱/۸ ثانیه و طول موج ۲/۸۹ بین موج نگارها برابر ۵۰ سانتی متر است.

(23)

$$\begin{cases} A_1 = H_i \cos \phi_i + H_r \cos \phi_r \\ B_1 = H_i \sin \phi_i + H_r \sin \phi_r \\ A_2 = H_i \cos(k\Delta x + \phi_i) + H_r \cos(k\Delta x + \phi_r) \\ B_2 = H_i \sin(k\Delta x + \phi_i) - H_r \sin(k\Delta x + \phi_r) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_i = kx_1 + \varepsilon_i \\ \phi_r = kx_1 + \varepsilon_r \end{cases} \quad (24)$$

با حل معادلات فوق ارتفاع موج برخوردی و انعکاسی بدست می‌آید:

(25)

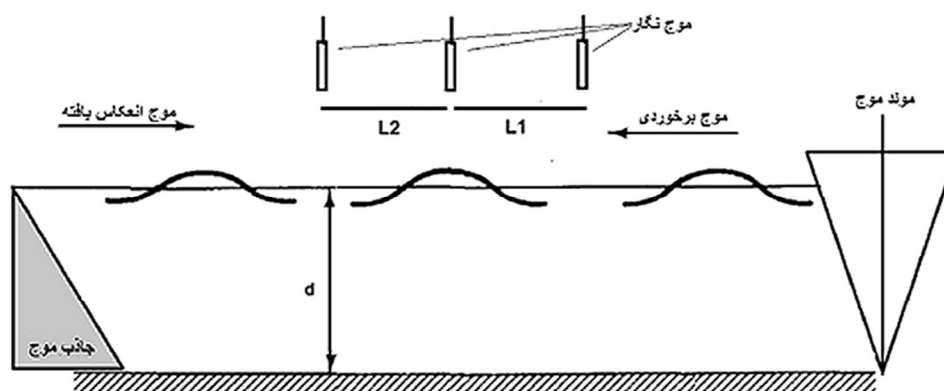
$$H_i = \frac{1}{2|\sin k\Delta x|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta x - B_1 \sin k\Delta x)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta x - B_1 \cos k\Delta x)^2} \quad (26)$$

$$H_r = \frac{1}{2|\sin k\Delta x|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta x + B_1 \sin k\Delta x)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta x - B_1 \cos k\Delta x)^2}$$

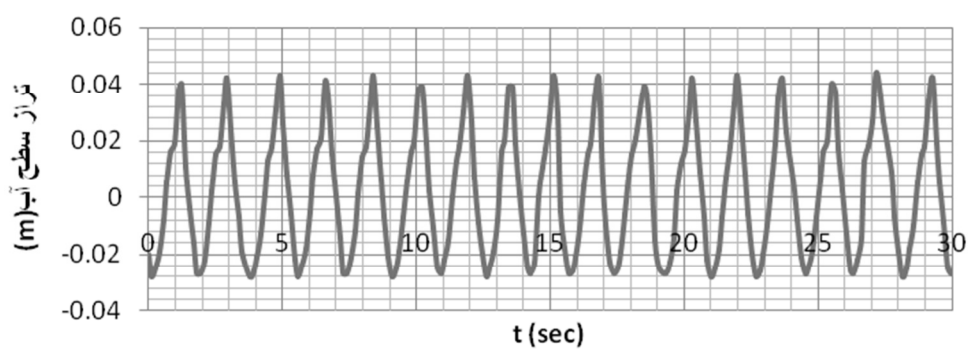
در امواج منظم روند محاسبه موج برخوردی و انعکاسی به این صورت است که با تحلیل فوریه مقادیر A_1 ، B_1 ، A_2 و B_2 برای هارمونی‌های بالاتر و بسامدهای پایه محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از معادلات (۲۵) و (۲۶) ارتفاع موج برخوردی و انعکاسی بدست می‌آیند. لازم به ذکر است که پروفیل امواج واقعی دارای هارمونی‌های بالاتری هستند. در طرف مقابل و برای امواج نامنظم، از آنجاییکه موج نامنظم ترکیبی از امواج با ارتفاع و دوره تناوب مشخص است، تعداد امواجی که در موج نامنظم می‌توان آنالیز کرد برابر تعداد سری‌های زمانی اندازه گیری شده است. سپس با روش تحلیل فوریه سریع، می‌توان ضرایب A_1 تا B_2 را حساب کرده و ارتفاع امواج برخوردی و انعکاسی محاسبه گردد. طیف موج برخوردی و بازتابی با هموار سازی گراف دوره تناوب بر اساس H_i و H_r محاسبه می‌شوند. بر اساس تحقیقات انجام شده [۱۰]، بیشترین و کم‌ترین فاصله مجاز بین دو موج نگار برای رسیدن به نتایج مطلوب مطابق معادلات (۲۷) و (۲۸) است.



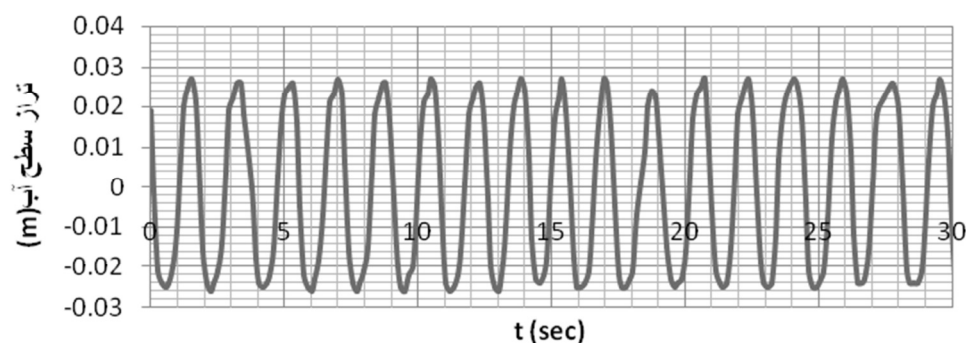
شکل ۴- نمای کلی کانال موج ساز در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر



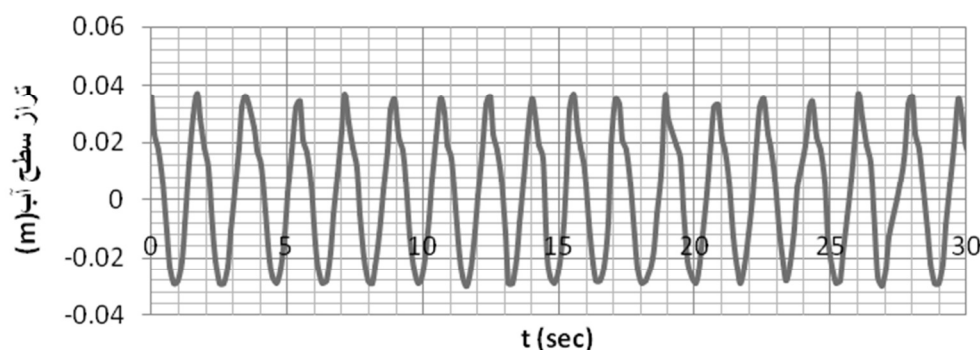
شکل ۵- نمای شماتیک از محل قرار گرفتن موج نگار در کانال موج ساز



شکل ۶- تراز سطح آب برای موج نگار شماره ۱



شکل ۷- تراز سطح آب برای موج نگار شماره ۲



شکل ۸- تراز سطح آب برای موج نگار شماره ۳

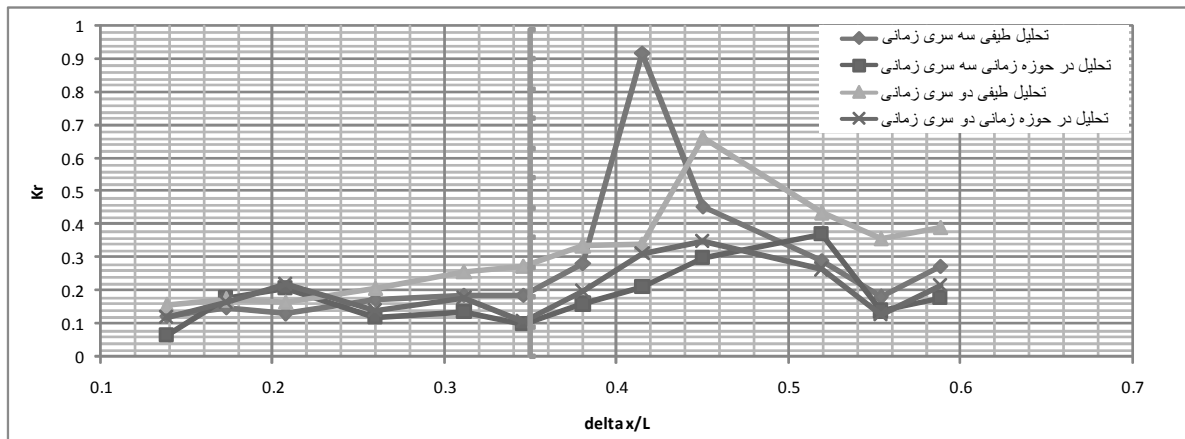
۶- نتایج

گام اول در ارائه و تحلیل نتایج، بررسی اثر فاصله قرار گیری موج نگارها بر نتایج تحلیل است، لذا موجی با دوره تناوب $1/8$ ثانیه و طول موج $2/89$ متر تولید و سری‌های زمانی برداشت شده در سه نقطه آنالیز شد. آزمایش برای مقادیر مختلف $\frac{\Delta x}{L}$ تکرار شد. نتایج حاصل در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج استنتاج می‌شود، مقدار مجاز برای $\frac{\Delta x}{L} < 0.35$ است. لذا آزمایشاتی که در ادامه نتایج آنها ارائه شده است با توجه به معیار فوق الذکر طراحی شده‌اند.

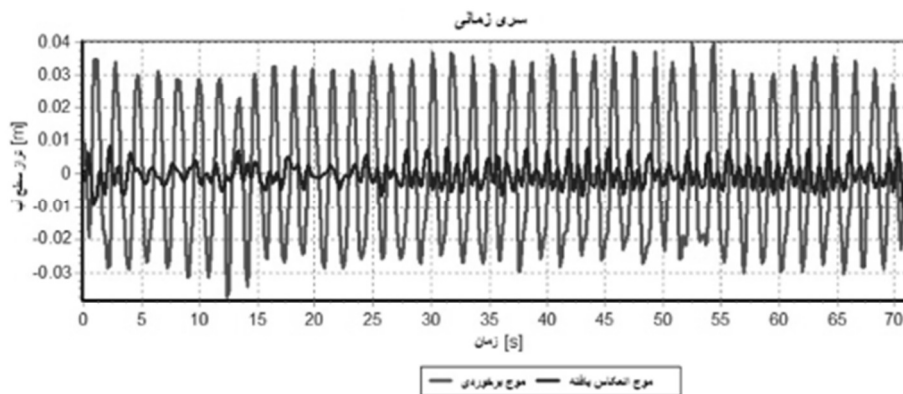
۶-۱- تحلیل در حوزه زمانی

نتایج حاصل از آزمایشات فوق‌الذکر به وسیله روش تحلیل در حوزه زمانی مورد بررسی قرار گرفتند و موج ترکیبی به وجود آمده در آزمایشات به دو موج

برخوردی و انعکاس یافته تجزیه شد. شکل ۱۰ ارتفاع امواج برخوردی و انعکاس یافته را نشان می‌دهد. سری‌های زمانی تراز سطح آب در این آزمایش، در سه نقطه که به اندازه ۵۰ سانتیمتر از هم فاصله داشتند اندازه گیری شد. موج تولیدی توسط مولد موج ساز، دارای دوره تناوب $1/8$ ثانیه و طول موج $2/89$ متر در عمق آب ۳۰ سانتی متری بود. بخشی از موج برخوردی پس از برخورد به جاذب موج شیب‌داری با شیب $1:2/5$ منعکس و در خلاف جهت موج تولیدی انتشار می‌یافت. طی این فرایند، موج شبه ایستا تشکیل می‌شد. در این شکل، خط سبز رنگ موج برخوردی و خط آبی رنگ موج انعکاس یافته است. ارتفاع موج برخوردی برابر ۶ سانتیمتر و ارتفاع موج انعکاس یافته در حدود $0/9$ سانتیمتر است.



شکل ۹- اثر فاصله بین موج نگارها بر ضریب انعکاس موج

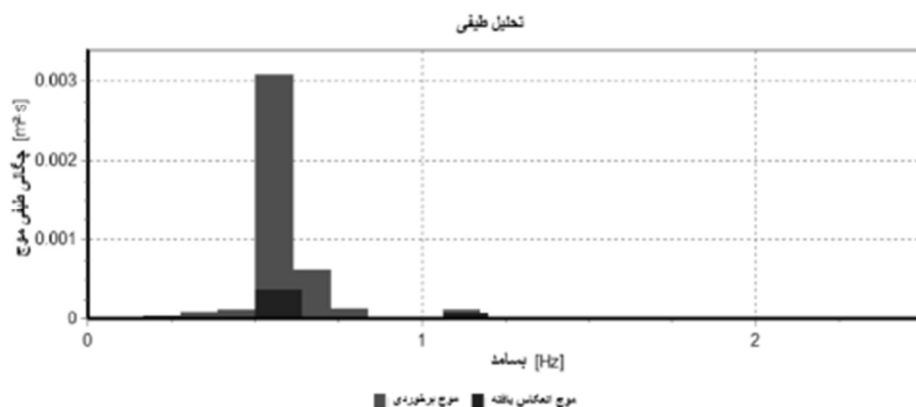


شکل ۱۰- سری زمانی امواج برخوردی و انعکاس یافته

۲-۶- تحلیل طیفی

نتایج حاصل از آزمایشات ارائه شده در قسمت قبل توسط روش تحلیل طیفی سری‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته و موج ترکیبی به دو موج برخوردی و انعکاس یافته تجزیه شد. شکل ۱۱ طیف این دو موج را نشان می‌دهد. در این شکل، سطح سبز رنگ طیف موج برخوردی و سطح آبی رنگ طیف موج انعکاس یافته است. طبق این روش، ارتفاع موج برخوردی و انعکاس یافته به ترتیب در حدود $8/4$ و $1/4$ سانتی متر است. نتایج حاصل از تحلیل به دو روش تحلیل طیفی و حوزه زمانی، با استفاده از دو و سه سری زمانی تراز سطح آب اندازه گیری شده در آزمایشگاه، در جدول ۱ آمده است.

ستون اول، روش تحلیل سری‌های زمانی اندازه گیری شده را مشخص می‌کند. همچنین در ستون دوم، تعداد سری زمانی آورده شده است. مقادیر محاسبه شده در هر روش برای ارتفاع موج برخوردی، انعکاس یافته و ضریب انعکاس در ستون‌های سوم، چهارم و پنجم آورده شده است. در این آزمایش، فاصله قرار گیری هر دو موج نگار متوالی برابر 50 سانتیمتر است که در بازه مجاز $\frac{\Delta x}{L}$ قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد ضریب انعکاس موج برای آزمایش صورت گرفته در هر دو روش تقریباً برابر $16/5$ درصد است.



شکل ۱۱- طیف موج برخوردی و انعکاس یافته

جدول ۱- نتایج تحلیل طیفی و حوزه زمانی سری زمانی تراز سطح آب

ضریب انعکاس	ارتفاع موج انعکاس یافته	ارتفاع موج برخوردی	تعداد موج نگار	روش تحلیل
۸۵۰/۱	۰/۰۱۳	۰/۰۸۵	۳	طیفی
۰/۱۷۶	۰/۰۱۵	۰/۰۸۳	۲	طیفی
۰/۱۷۵	۰/۰۰۹	۰/۰۶۰	۳	حوزه زمانی
۰/۱۶۴	۰/۰۰۸	۰/۰۶۰	۲	حوزه زمانی

۷- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل سری‌های زمانی در مقاله حاضر، می‌توان نتیجه گرفت تحلیل طیفی مقادیر بزرگ‌تری را به عنوان ارتفاع موج برخوردی و انعکاسی پیش بینی می‌کند. شایان ذکر است، مقادیر ارائه شده توسط روش تحلیل در حوزه زمانی برای امواج برخوردی، به مقادیر ارتفاع موج طبق تئوری موج ساز نزدیک‌تر است. بر اساس این تئوری، ارتفاع موج تولیدی در کانال موج ساز، در حالتیکه بازه جابجایی باله موج ساز برابر ۱۸ سانتی متر و دوره تناوب برابر ۱/۸ ثانیه است، برابر ۶ سانتی متر است [۱۱ و ۱۲]. با این وجود، از آنجایی که مقادیر ارتفاع موج برخوردی و انعکاسی به یک مقدار کوچک تغییر کرده‌اند (معادله ۲۹)، ضرایب انعکاس در هر دو روش تحلیل مقادیر تقریباً مشابهی را ارائه می‌دهند.

فهرست علائم

N	تعداد امواج
$S(f)$	چگالی طیفی موج
T	دوره تناوب موج
$\bar{T}$	دوره تناوب میانگین

$$k_r = \frac{H_r}{H_i} = \frac{H_r + \Delta}{H_i + \Delta} \quad (29)$$

همچنین نتایج نشان می‌دهد، در صورتیکه موج ترکیبی مجموع دو موج باشد، تحلیل دو و سه سری زمانی

- 7-CERC, U.S., (2006), Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- 8-IAHR/PIANC, (1986), List of Sea State Parameters, Supplement to Bulletin No. 52 of the Permanent International Association of Navigation Congresses, Brussels.
- 9-Longuet-Higgins, M.S., A, (1969), Non-Linear Mechanism for the Generation of Sea Waves, Proceeding of the Royal Society of London, Series A, 311, 371-389.
- 10-Goda Y. and Ippen A. T., (1963), Theoretical and Experimental Investigations of Wave Energy Dissipators Composed of Wire Mesh Screens, report No. 60, Hydrodynamics Laboratory Report, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 58 pages.
- 11-Ursell F. R. G. Dean and Y. S. Yu (1960), Forced small amplitude water waves; A comparison of Theory and Experiment, J. Fluid Mech. Vol. 12 Pt. 1.
- 12-Galvin C. J., (1964), Wave-Height prediction for wave generators in shallow water, Tech. Memo 4 U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Mar.

T_s	دوره تناوب عمده
ω	بسامد زاویه‌ای
γ_w	وزن مخصوص آب
σ^2	واریانس
$\delta, \phi, \varepsilon$	فاز اولیه
η_i	تراز موج برخوردی
η_r	تراز موج انعکاس یافته
η_t	تراز موج ترکیبی
a_i	ارتفاع موج i ام
d	عمق آب
E	انرژی موج
f	بسامد
H_{rms}	مجذور مجموع مربعات ارتفاع امواج
$H_s, H_{1/3}$	ارتفاع عمده
H_i	ارتفاع موج برخوردی
H_r	ارتفاع موج انعکاس یافته
$H_{1/10}$	میانگین ارتفاع امواج از بین ۱۰ درصد بالایی بلندترین امواج
K_r	ضریب انعکاس موج
k	عدد موج
L	طول موج
m_i	آمین ممان طیف

۸- مراجع

- 1-Isaacson, M., (1991), Measurement Of Regular Wave Reflection, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 117, No. 6.
- 2-Ozeren, Y., (2009), Experimental and Numerical Investigations of Floating Breakwater Performance, Ph.D Thesis, The University of Mississippi. USA.
- 3-Mansard, E.P.D and Funke, E.R., (1980), The Measurement of Incident and Reflected Spectra using a Least Squares Method, Proceedings of the 17th Coastal Engineering conference, p 154-172
- 4-Madsen, P. A., (1983), Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber, Coastal Engineering, 7:381-396.
- 5-KOFTIS, T. H., (2006), 2D-V hydrodynamics of wave-floating breakwater interaction, Journal of Hydraulic Research Vol. 44, No. 4 , p. 451-469
- 6-Dean, G. D. and Dalrymple, R. A., (1991), Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World Scientific.