

ارزیابی آزمایشگاهی اندرکنش میان دیوارهای ساحلی

شکل پذیر قائم و امواج تصادفی دریا

رامین وفايي پور سرخابي^{۱*}، عليرضا ناصري^۲

۱- استادیار ۲- مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

(دریافت: ۹۲/۱۲/۲۱، پذیرش: ۹۴/۰۵/۰۴)

چکیده

دیوارهای ساحلی برای محافظت از خطوط ساحلی در برابر نیروهای امواج، استفاده می‌شود. طوفان، حرکت شناورها و مسائلی از این قبیل می‌تواند سبب ایجاد امواج تصادفی در مناطق با اهمیت بندر شود. با توجه به تصادفی بودن رفتار امواج، استفاده از مدل‌های فیزیکی برای بیان اندرکنش دیوارهای ساحلی و امواج بسیار کارآمد خواهد بود. در این تحقیق ضمن تولید امواج تصادفی در آزمایشگاه، مدل فیزیکی دیوارهای نازک شکل‌پذیر ساخته شده و در درون فلوم موج‌ساز در مواجهه با امواج تصادفی قرار گرفت. به هنگام تأثیر امواج داده‌های مربوط به تراز سطح آب و کرنش پای دیوار توسط حسگرها برداشت و با بررسی موج به موج به روش بالا‌گذری از تراز صفر، رابطه بین کرنش و ارتفاع موج به دست آمد. نتایج حاکی از ارتباط نسبتاً خطی بین ارتفاع موج و کرنش دارد. از آنجایی که رفتار دیوار در محدوده ارتجاعی قرار دارد رابطه بین کرنش و لنگر خمشی پای دیوار از قانون هوک تبعیت کرده و بر همین مبنا ارتباط بین ارتفاع موج و لنگر خمشی پای دیوار به دست آمد.

کلید واژه‌ها: دیوارهای ساحلی، امواج تصادفی، کرنش، ارتفاع موج، لنگر خمشی

Experimental Investigation of the Interaction between Vertical Flexible Seawall and Random Sea Waves

R. Vafaiepour Sorkhabi^{*}, A. Naseri

Islamic Azad University, Tabriz Branch

(Received: 12/03/2014; Accepted: 26/07/2015)

Abstract

Seawalls are sheltering structures used for protecting the coastal regions against wave induced forces. Storm, movement of the ships, explosions caused by the attacks to the platforms and issues like these could result in the creation of random waves in significant areas of the port. Because of random nature of the wave behavior, the application of physical models for the study of wave-structure interaction can be quite efficient. In the present research, physical models of thin flexible walls were constructed and tested in a wave flume subject to generated random waves. The water surface variations and the strains at the base of the wall were recorded using sensors; and the relationship between the strain and the wave height was obtained using the zero up-crossing method. The results indicate that the strain-wave height relationship is linear. Since the behavior of the wall is within the elastic region, the relationship between the strain and the flexural moment at the base of the wall follows the Hook's Law; and accordingly the relationship between the wave height and flexural moment at the base of the wall was obtained.

Keywords: Seawall, Random Waves, Strain, Wave Height, Flexural Moment

^{*}Corresponding Author E-mail: raminvafaiei@yahoo.com

۱. مقدمه

اشل را در مطالعات خودش مورد بررسی قرار داد. مشهورترین مطالعات انجام‌یافته در زمینه تأثیر امواج وارد بر دیوارهای ساحلی و موج شکن‌های قائم مربوط به کارهای گودا است [۴] که مورد استفاده بسیاری از مهندسان در طراحی می‌باشد و در اکثر مقالات و کتاب‌ها به‌عنوان مرجع از آن استفاده شده است. ویجاکاریشما و همکاران [۵]، در یک مطالعه آزمایشگاهی به اشل ۱ به ۲۰، تحلیل پاسخ دینامیکی دیوار در برابر امواج منظم را در برابر سازه‌های جاذب انرژی مورد بررسی قرار دادند.

هیوج [۶]، به بررسی لنگر خمشی ایجادشده در سازه‌های ساحلی در برابر امواج پرداخته است. نیلامانی و همکاران [۷]، تأثیر زبری بر روی دیوارهای ساحلی که به دو صورت بلوک‌های شطرنجی پیش‌آمده و پس‌رفته روی دیوار در نظر گرفته شده بود را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند و بالاروی و پایین‌روی موج و همچنین تأثیر آن‌ها بر نیروی وارده از طرف امواج را بررسی کردند. دیوار به‌کاررفته در کارایشان نازک شکل‌پذیر بوده و پشت دیوار خالی در نظر گرفته شده بود. مزیت کار ایشان در به‌کارگیری امواج تصادفی و دیوارهای شیب‌دار با شیب‌های مختلف است.

کومو و همکاران [۸]، تشابه عدد فرود بین مدل و پروتوتیپ در دیوارهای ساحلی در برابر امواج شکسته را مورد بررسی قرار داد. نتیجه کار ایشان نشان داد که مقدار نیروی فشار وارده بر دیوارهای ساحلی که از آنالیز ابعادی برای پروتوتیپ به‌دست می‌آیند زیادتر از مقدار واقعی است که در طبیعت اتفاق می‌افتد. دلیل این امر، وارد شدن فاز هوا به هنگام وارد شدن ضربه موج می‌باشد، که می‌تواند به‌عنوان عاملی برای کاهش نیرو در نظر گرفته شود که تأثیر این امر در آزمایشگاه ناچیز است. همچنین ایشان، مقدار نیرو و لنگر حاصل بر روی دیوار در مقابل امواج شکسته را با استفاده از انتگرال‌گیری عددی فشار بر روی دیوار در نظر گرفتند و با استفاده از فلوم ۱۰۰ متری مولد موج، فشار را در ارتفاع‌های مختلف دیوار اندازه‌گیری کردند. تعداد فشارسنج‌های در نظر گرفته‌شده در آزمایش ایشان ۸ عدد در ارتفاع دیوار و عرض دیوار تقریباً هم عرض فلوم، ۳ متر بود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. اندرکنش امواج و دیوارهای ساحلی

در شکل‌های (۱ و ۲) دیوارهای ضخیم و نازک معرفی و سازوکار خرابی آن‌ها نشان داده شده است. در دیوارهای ضخیم لنگر محرک که باعث واژگونی دیوار می‌شود، ناشی از لنگر نیروهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی موج، حول پاشنه دیوار است که می‌بایست از لنگر ناشی از وزن دیوار حول پاشنه به‌عنوان لنگر مقاوم کمتر باشد تا دیوار واژگون نشود. همچنین وزن دیوار و سطح تماس آن با کف می‌بایست نیروی اصطکاکی بیش از نیروی موج را تولید کند تا مانع لغزش شود.

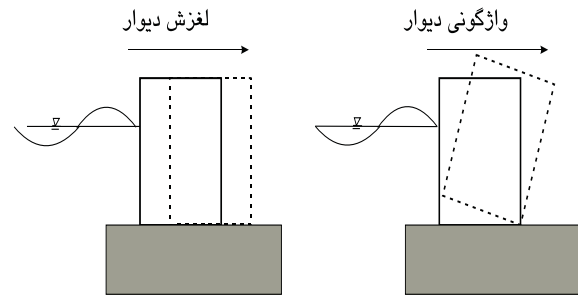
آب‌های جنوبی ایران یکی از مناطق استراتژیک بوده و محل قرارگیری بنادر تجاری و مخازن و تاسیسات نفتی می‌باشد؛ از طرفی به‌دلیل بحران‌های به‌وجودآمده در منطقه اهمیت امنیتی و آرامش این سواحل را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در قسمت‌های جنوبی خلیج فارس پایگاه‌های متعدد نظامی قرار داشته و ناوهای جنگی داخلی و خارجی به‌طور مداوم در این آب‌ها در حال حرکت می‌باشند. در طول تاریخ نیز منطقه‌ی خلیج فارس اهمیت خاصی داشته و آبستن جنگ‌های متعددی بوده است؛ بر این مبنای وجود سواحل امن ضرورتی انکارناپذیر است. در این راستا دیوارهای ساحلی یکی از مهم‌ترین سازه‌هایی هستند که در حفاظت سواحل نقش اساسی دارد. این دیوارها علاوه بر تحمل نیروهای امواج دریا که به‌صورت تصادفی بر آن وارد می‌گردند بایستی بتوانند با توجه به شرایط محیطی، نیروهای دیگر نظیر زلزله، جریان‌های دریایی، باد و تأثیر امواج ناشی از حرکت‌های شناورها و امواج ناشی از انفجارهای احتمالی را تحمل کنند. یکی از مهم‌ترین ابزارهای موجود برای بررسی اندرکنش، استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌باشند که اخیراً به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده محققان و مهندسان قرار گرفته است. پایه نظری این مدل‌ها در قرن پانزدهم توسط لئوناردو داوینچی پایه‌ریزی و سپس در قرن هفدهم توسط اسحاق نیوتن به‌طور جامع‌تری ارائه شد. یک مطالعه جامع آزمایشگاهی فقط به جمع‌آوری صحیح داده، منطبق بر شرایط فیزیکی مسئله محدود نمی‌شود و می‌بایست از اطلاعات جمع‌آوری‌شده نهایت استفاده را کرد. به همین منظور پردازش داده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه ابزارهای مناسبی در این زمینه در اختیار پژوهشگران وجود دارد. روش‌های عددی و پردازش سیگنال به‌عنوان روش‌های قدرتمند برای پردازش داده‌ها، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

علی‌رغم تحقیقات انجام‌یافته بر روی اندرکنش میان دیوارهای ساحلی و امواج تصادفی دریا، مطالعات زیادی در تعیین ارتباط بین موج و نیروهای داخلی دیوار صورت نگرفته است. در این تحقیق با تعیین کرنش بر روی دیوار به‌هنگام برخورد موج تصادفی، کرنش و لنگر خمشی دیوار اندازه‌گیری‌شده و ارتباط بین آن‌ها با استفاده از مدل آزمایشگاهی تعیین شده است.

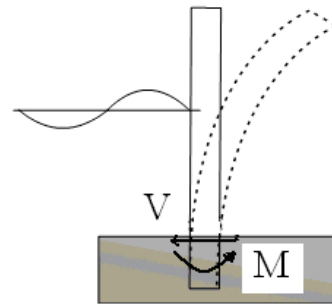
سنفلو [۱]، از اولین محققانی است که روشی را برای تعیین فشار ناشی از امواج ناشکنا ارائه کرده است. مزیت روش ایشان راحتی کاربرد آن است. با استفاده از این روش توزیع فشار را می‌توان به‌طور تقریبی با یک خط مستقیم برآورد کرد. راندرگین [۲]، با انجام کارهای آزمایشگاهی نشان داد که روش سنفلو، نیروی حاصل از برخورد امواج ناشکنا را بیش از حد واقعی نشان می‌دهد. تئوری مینی‌کین [۳]، بر مبنای مشاهدات تجربی بر روی دیوارهای بزرگ مقیاس تحت تأثیر امواج منظم شکسته ارائه شد. در حقیقت کار مینی‌کین، از اولین کارهای آزمایشگاهی بود که به‌صورت جامع، تأثیر

کف کانال، V_t مقدار برش پایه و M_t مقدار لنگر خمشی پای دیوار است. در طول مدت زمان تابش موج لنگر و برش تاریخچه زمانی نظیر را خواهند داشت [۱۰].

در روش کرنش‌سنجی، کرنش خمشی و برشی پای دیوار با استفاده از سنسورهای کرنش‌سنج به‌طور مستقیم برداشت می‌شود. برای اندازه‌گیری خمش در دیوار، کرنش‌سنج‌ها مطابق شکل (۳) در پای دیوار نصب و کرنش‌ها قرائت می‌شوند و لنگر خمشی از معادلات (۳-۶) به‌دست می‌آید در حقیقت یک کرنش‌سنج در جلوی دیوار نصب می‌شود که به کشش کار می‌کند و کرنش‌سنج دیگر در همان نقطه در پشت دیوار نصب می‌شود که به فشار کار خواهد کرد. در حالت ایده‌آل، می‌بایست از لحاظ قدر مطلق مقادیر این دو کرنش با هم برابر شوند ولی با توجه به شرایط آزمایشگاهی تفاوت جزئی بین این دو کرنش اندازه‌گیری شده وجود خواهد داشت. بنا به توصیه شرکت سازنده این کرنش‌سنج‌ها (TML)، برای پایین آوردن خطا و بالا بردن دقت، مقدار متوسط این دو کرنش به عنوان ملاک عمل قرار می‌گیرد [۱۱].



شکل ۱. لغزش و واژگونی در دیوارهای ضخیم



شکل ۲. نیروهای داخلی در دیوارهای نازک

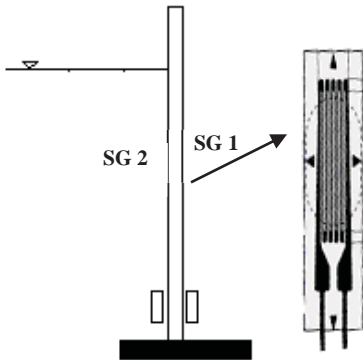
در دیوارهای نازک سازوکار پایداری در گیرداری بین کف و دیوار است که می‌تواند مثلاً با در نظر گرفتن طول کافی نفوذ دیوار در کف تأمین شود. لنگر خمشی پای دیوار (M) باعث به‌وجود آمدن تنش‌های خمشی و برش پایه (V) تنش‌های برشی پای دیوار را باعث می‌شوند. در تحقیق حاضر از مدل فیزیکی دیوارهای نازک استفاده شده است. با توجه به اینکه دیوارهای ساحلی در امتداد ساحل ساخته می‌شوند، بنابراین طول دیوار نسبت به ارتفاع و ابعاد مقطع بسیار بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین رفتار دیوار در برابر نیروی موج، کرنش مسطح خواهد بود [۹]. به همین دلیل می‌توان با در نظر گرفتن واحد طول دیوار و تعیین ارتفاع و ابعاد مقطع بر مبنای تشابه فرود، رفتار دیوار را بررسی کرد. در این راستا تعیین لنگر خمشی و نیروی برشی در بررسی رفتار سازه‌ای دیوار مهم‌تر از بقیه پارامترها خواهد بود.

با توجه به این‌که نیروی ضربه‌ای موج در نزدیکی سطح آب اثر می‌کند، بنابراین معمولاً لنگر خمشی پای دیوار با افزایش ارتفاع دیوار تعیین‌کننده‌تر از برش پایه خواهد بود. در مدل‌های فیزیکی برای تعیین لنگر و برش از دو روش فشارسنجی و کرنش‌سنجی می‌توان استفاده کرد. در روش فشارسنجی مقادیر فشار در نقاط منظم در ارتفاع دیوار با استفاده از سنسورهای تعیین فشار و یا پیزومترهای حساس تعیین و از روی سطح زیر نمودار فشار، لنگر و برش از معادلات (۱ و ۲) به‌دست می‌آیند.

$$V_t = \sum_{k=1}^{k=n} P_{kt} \cdot \Delta z \quad (1)$$

$$M_t = \sum_{k=1}^{k=n} P_{kt} \cdot \Delta z \cdot z_k \quad (2)$$

مقدار فشار P_{kt} اندازه‌گیری شده از فشارسنج k ام روی دیوار در گام زمانی t ، Δz فاصله بین فشارسنج‌ها، z_k فاصله فشارسنج k ام از



شکل ۳. نحوه قرارگیری کرنش‌سنج خمشی بر روی دیوار

$$|\varepsilon_{1t}| \# |\varepsilon_{2t}| \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{|\varepsilon_{1t}| + |\varepsilon_{2t}|}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_t = E \cdot \bar{\varepsilon}_t \quad (5)$$

$$M_t = \sigma_t \cdot W \quad (6)$$

در معادلات فوق، ε_{1t} و ε_{2t} کرنش‌های اندازه‌گیری شده در گام زمانی t ، E مدول الاستیسیته، σ_t تنش خمشی و W اساس مقطع در محل نصب کرنش‌سنج‌ها می‌باشد. می‌بایست در نظر داشت که روابط فوق در محدوده خطی تنش-کرنش معتبر است. بنابراین می‌بایست مقطع دیوار طوری انتخاب شود که تنش از این محدوده تجاوز نکند. کرنش‌سنج‌های برشی مطابق شکل (۴) نصب می‌شوند و مقدار برش پایه از روابط (۷-۹) به‌دست می‌آیند.

$$\gamma_{\max t} = \sqrt{2[(\varepsilon_{1t} - \varepsilon_{3t})^2 + (\varepsilon_{2t} - \varepsilon_{3t})^2]} \quad (7)$$

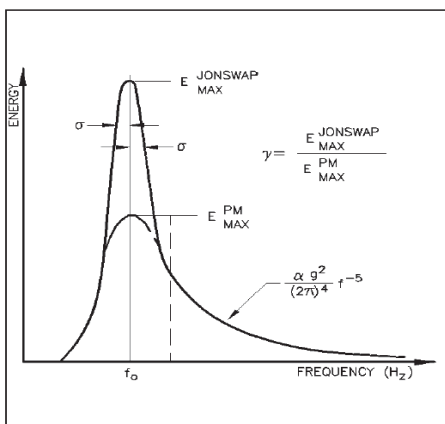
[۱۱]. براین مبنا، طیف‌های مختلفی نظیر طیف Bretschneider در سال ۱۹۵۹، P-M در سال ۱۹۶۴، TMA در سال ۱۹۸۵ و طیف JONSWAP در سال ۱۹۷۴ از روی داده‌های ثبت شده تعریف شده‌اند. سورنسن، طیف JONSWAP را یکی از پرکاربردترین طیف‌ها برای طراحی در سازه‌های ساحلی معرفی کرده است [۱۲]. تحقیقات جدیدی درباره ساخت طیف متناسب با شرایط اقلیمی ایران شروع شده است ولی در نبود این طیف می‌توان از طیف‌های مذکور استفاده کرد که در تحقیق حاضر از طیف JONSWAP استفاده شده است. معادله (۱۰) چگالی انرژی طیف JONSWAP و شکل (۶) طیف JONSWAP را نشان می‌دهد.

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1.25(f_p/f)^4} \gamma a \quad (10)$$

در این طیف، ضریب γ معمولاً مقادیری بین ۱/۶ تا ۶ دارد اما عدد ۳/۳ توصیه می‌شود. ضریب γ ، نسبت چگالی در فرکانس حداکثر برای طیف JONSWAP به طیف P-M است [۹]. در معادله

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{-0.22}, a = e^{-\left[\frac{(f-f_p)}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad (10)$$

در معادلات فوق F طول موج‌گاه، f_p می‌باشند. در معادلات فوق F طول موج‌گاه، W سرعت باد، f فرکانس و f_p فرکانس پیک موج است [۱۳].



شکل ۶. طیف موج JONSWAP

۳-۲. مدل فیزیکی و روند آزمایش‌ها

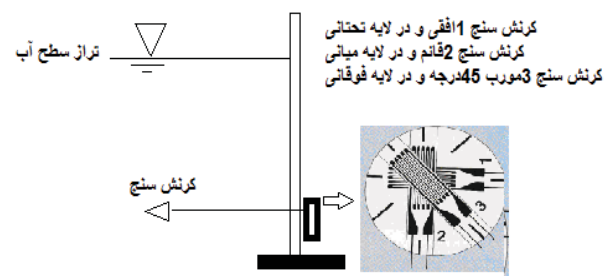
مشخصات به‌منظور انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر، فلوم موج در آزمایشگاه سازه‌های دریایی دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. مشخصات استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها به شرح زیر است (شکل (۷)).

- طول فلوم: ۱۲/۵ متر
- عرض فلوم: ۱/۱۵ متر
- ارتفاع قرارگیری کف فلوم از تراز سطح زمین: ۷۵ سانتی‌متر
- ارتفاع داخل فلوم: ۱/۰۵ متر
- عمق آب (d): ۶۰ سانتی‌متر
- نوع موج‌ساز: لولایی

$$\tau_{\max t} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{\max t} \quad (8)$$

$$V_t = \frac{\tau_{\max t} \cdot I \cdot T}{Q} \quad (9)$$

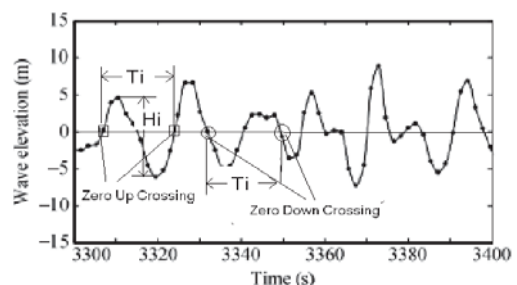
در معادلات فوق، ϵ_{3t} ، ϵ_{2t} ، ϵ_{1t} کرنش‌های قرائت‌شده از کرنش‌سنج‌های ۱، ۲ و ۳، $\gamma_{\max t}$ کرنش بیشینه برشی، ν ضریب پواسون، $\tau_{\max t}$ تنش بیشینه برشی مقطع، I ممان اینرسی مقطع، T ضخامت مفید مقطع و Q گشتاور استاتیکی نصف مقطع نسبت به میان‌تار است [۸].



شکل ۴. نحوه قرارگیری کرنش‌سنج برشی بر روی دیوار

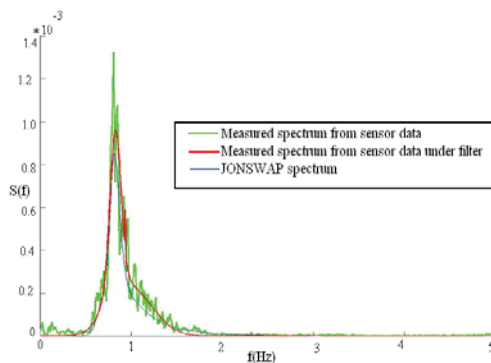
۲-۲. امواج تصادفی

در حالت کلی امواج به دو دسته امواج منظم و تصادفی طبقه‌بندی می‌شوند که امواج تصادفی می‌توانند به‌وسیله ترکیبی از امواج منظم تعریف شوند. امواج دریا، در حالت طوفانی از نوع امواج تصادفی بوده و تراز سطح آب، به‌صورت غیرمنظم است. در برداشت‌های آزمایشگاهی و میدانی موج حالت موج تصادفی غیرخطی را خواهد داشت. در این حالت تمام امواج برداشت شده به‌صورت موج به موج می‌بایست مد نظر قرار گیرند. در این حالت معمولاً به روش بلاگذری از تراز صفر یا پایین‌گذری از تراز صفر، خصوصیات هیدرو دینامیکی موج برداشت می‌شود. استفاده از روش بالاگذری از تراز صفر مرسوم‌تر بوده و در تحقیق حاضر از آن استفاده شده است. در شکل (۵) نحوه برداشت موج به روش بلاگذری از تراز صفر رو به بالا نشان داده شده است.



شکل ۵. موج تصادفی غیرخطی (امواج میدانی و آزمایشگاهی)

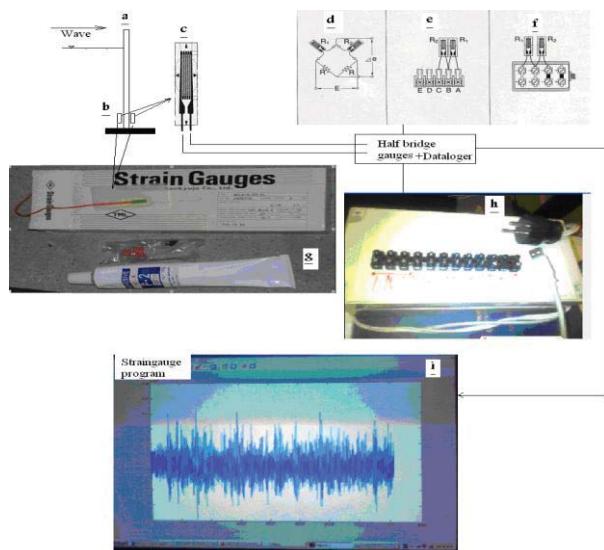
امواج تصادفی را می‌توان با استفاده از تحلیل‌های طیفی روی امواج ثبت‌شده مورد بررسی قرار داد که در این راستا می‌توان با چگالی طیفی توجیه جامعی از امواج تابیده‌شده در شرایط دریا را بیان نمود



شکل ۹. طیف اصلاح شده (اندازه‌گیری شده، فیلتر شده و تئوریک)

۲-۵. برداشت کرنش

کرنش‌سنج‌های به کار رفته از نوع TML Metal Pam E- 101R است که برای اندازه‌گیری لنگر خمشی، به صورت نیم پل به کار می‌روند. دامنه نمونه‌برداری این کرنش‌سنج صفر تا ۱۰۰ هرتز است. با توجه به اینکه ارتعاش دیوار سریع‌تر از نوسان سطح آب است، بنابراین می‌بایست در انتخاب فرکانس نمونه‌برداری از پاسخ دیوار دقت کرد تا مسئله نامطلوب الیاسینگ به وجود نیاید. در تحقیق حاضر فرکانس نمونه‌برداری کرنش ۵۰ هرتز است. نحوه اتصال نیم‌پل و جزئیات اتصال کرنش‌سنج‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰. برداشت کرنش از دیوار: a: دیوار، b: محل نصب کرنش‌سنج روی دیوار، c: شکل شماتیک کرنش‌سنج، d: اتصال نیم پل، e: اتصال کرنش‌سنج به دیتالاگر دو طرفه، g: تصویر واقعی کرنش‌سنج به همراه چسب مخصوص، h: دیتالاگر، i: تصویر داده‌های برداشت شده از کرنش‌سنج

۲-۶. آزمایش‌های انجام یافته

آزمایش‌های انجام یافته در جدول (۱)، معرفی شده‌اند. تغییرات ارتفاع مؤثر، H_s از ۳/۹ تا ۹/۲ سانتی‌متر و فرکانس پیک، f_p از ۰/۸ تا ۱/۲۴ هرتز می‌باشند.

- نوع دیوار: فلزی، نفوذ ناپذیر، بدون سرریزی موج، گیردار در کف، آزاد در کناره‌ها
- موج استفاده شده: تصادفی تحت طیف JONSWAP
- فرکانس نمونه‌برداری از سطح آب: حدود ۱۰ هرتز
- فرکانس نمونه‌برداری از کرنش دیوار: حدود ۵۰ هرتز



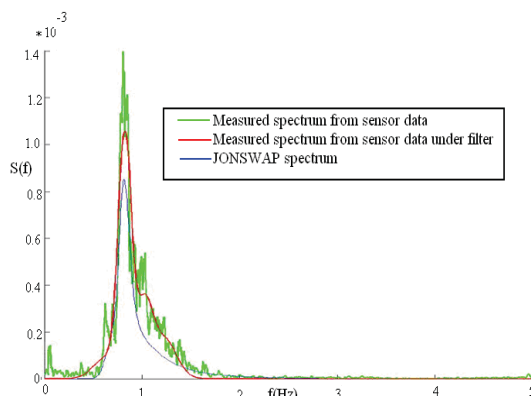
شکل ۷. نمای کلی از فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک

۲-۴. تولید و برداشت موج

داده‌های ورودی مطابق با طیف موج JONSWAP توسط یک فایل ورودی به نرم‌افزار دستگاه موج‌ساز، وارد می‌شود و پدل شروع به حرکت بر مبنای داده‌های داده شده می‌نماید. از آنجایی که طیف حاصل از داده‌های عددی، دارای ناصافی‌های جزئی روی منحنی طیف است که تولید این حرکت‌های بسیار جزئی برای پدل ناممکن است و می‌بایست حذف شوند. بنابراین با یک فیلتر مناسب، ناصافی‌ها از روی منحنی حذف شدند.

تولید موج در سه مرحله خلاصه می‌شود (شکل‌های (۸) و (۹)).

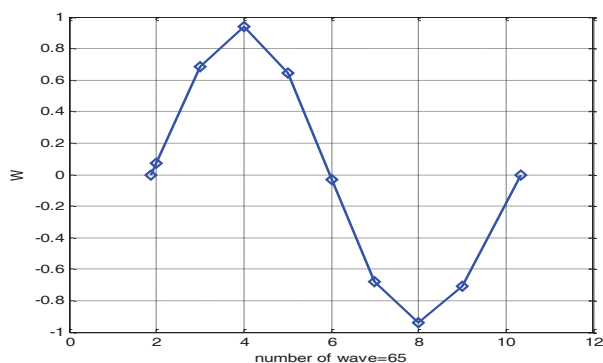
- تولید اولیه موج بر اساس مدل عددی DSA و به دست آوردن طیف حاصل از داده‌های برداشت شده از سنسور ۱ (MOD0).
- اصلاح طیف به دست آمده از مرحله ۱ با توجه به طیف تئوریک (MOD1).
- تکرار مرحله ۲، به منظور کمتر کردن اختلاف بین طیف به دست آمده و طیف تئوریک (MOD2,3,...).



شکل ۸. طیف اولیه (اندازه‌گیری شده، فیلتر شده و تئوریک)

۳- نتایج و بحث

برای به‌دست آوردن بسیاری از پارامترهای موج نظیر ارتفاع، طول و خواص آماری موج، تحلیل موج به موج صورت می‌گیرد. همچنین به منظور بررسی اندرکنش بین دیوار و امواج تحلیل موج به موج برای کرنش ضروری خواهد بود. همچنین در طراحی لازم است به‌ازای گذر هر موج، بیشترین تأثیر روی کرنش تعیین شود که این امر با مقایسه تأثیر مقدار پیک هر موج روی نوسانات کرنش صورت می‌پذیرد. برای بررسی رابطه بین تاریخچه زمانی بین کرنش (E) با تراز سطح آب (W) این داده‌ها را به روش موج به موج، جدا کرده (طبق روش بالا گذری از تراز صفر) شده و برای هر موج به طور مجزا مقادیر دامنه حداکثر مثبت (بالای سطح صفر آب) و دامنه حداکثر منفی (زیر سطح صفر آب) به‌دست آیند. در این حالت می‌توان ارتفاع موج k ام را از رابطه $H_k = \max(|(a_{\max}^+)_k| + |(a_{\max}^-)_k|)$ به‌دست آورد. در تحلیل کرنش، مقدار کرنش در موج k ام از رابطه $\varepsilon_k = \max(|(\varepsilon_{\max}^+)_k|, |(\varepsilon_{\max}^-)_k|)$ به‌دست می‌آید که در رابطه فوق $(\varepsilon_{\max}^+)_k$ مقدار کرنش حداکثر در خمش دیوار در جهت امتداد تأثیر موج و $(\varepsilon_{\max}^-)_k$ مقدار کرنش حداکثر در خمش دیوار در خلاف جهت امتداد تأثیر موج می‌باشد. بدین ترتیب کرنش نظیر ارتفاع H_k ، ε_k خواهد شد. به همین منظور برنامه‌ای تحت عنوان wavebywavevafaiei.m در نرم‌افزار متلب نوشته شده که می‌تواند هم به‌صورت بالاگذری از تراز صفر و هم به‌صورت پایین‌گذری از تراز صفر، ضمن شناسایی امواج آن‌ها را به‌صورت موج به موج سوا کرده و برای هر کدام دامنه حداکثر مثبت (بالای سطح صفر آب) و دامنه حداکثر منفی (زیر سطح صفر آب) و ارتفاع بیشینه موج و طول و پریود آن موج را به‌دست آورد. برای جداسازی هر موج، در ابتدای آن داده آخر از موج قبل را به داده اول وصل و معادله خط گذرنده از این نقطه را با سطح ساکن آب قطع می‌شود. این نقطه معرف نقطه آغازین بوده و در انتهای هر موج، داده آخر از این موج را به داده اول از موج بعدی وصل و معادله خط گذرنده از این نقطه را با سطح ساکن آب قطع می‌نمایند که این نقطه معرف نقطه پایانی آن موج می‌باشد. شکل (۱۱) موجی که دارای ارتفاع بیشینه بوده و از تحلیل موج به موج تاریخچه زمانی تراز سطح آب به‌دست‌آمده نشان می‌دهد. این موج به‌ازای ۶۵ امین موج، حاصل شده و تعداد کل امواج به‌دست‌آمده ۲۲۸ عدد می‌باشد.



شکل ۱۱. موج شماره ۶۵ به‌دست‌آمده تحلیل موج به موج تاریخچه زمانی تراز سطح آب

جدول ۱. مشخصات موج تصادفی تولیدی با طیف

JONSWAP بر مبنای ارتفاع مؤثر موج و فرکانس پیک

شماره آزمایش	H_s	f_p
۱	۵	۰/۸
۲	۵/۲	۱/۲۴
۳	۵	۱
۴	۵/۶	۱/۲۳
۵	۷/۳	۱/۲۲
۶	۳/۹	۱/۲۳
۷	۵/۴	۱
۸	۵/۴	۱/۲
۹	۴/۳	۱/۲۳
۱۰	۷/۷	۱/۲۱
۱۱	۶	۱/۲۳
۱۲	۷/۵	۱/۲۳
۱۳	۹/۲	۱/۲۳
۱۴	۵/۶	۱/۲۴
۱۵	۷/۵	۱/۲۱

برداشت‌های انجام‌یافته برای تعیین موج از سنسورهای تعیین تراز سطح آب که تعداد این سنسورها ۵ عدد است، برای هر یک از ۱۵ موج تعریف شده در جدول (۱) انجام یافت. به‌عنوان نمونه در این جدول برای موج شماره ۸ با ارتفاع ۵/۴ سانتی‌متر و فرکانس پیک ۱/۲ هرترز آزمایش‌ها تراز سطح آب آمده است. به‌منظور تعیین دقیق تراز سطح آب در هر آزمایش، برداشتی از سطح ساکن آب صورت گرفته و در فایل مجزایی ذخیره شده است. فایل‌های به‌دست‌آمده حالت سری‌زمانی را خواهند داشت.

برداشت کرنش هم‌زمان با برداشت سطح آب انجام پذیرفته است. به‌منظور تعیین کرنش خالص برای موج، از حالت ساکن دیوار نیز برداشت صورت گرفته است. بنابراین برداشت‌های کرنش متناظر با جدول (۲) برای موج شماره ۸ جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به این که فقط یک کرنش سنج بر روی دیوار نصب شده است، بنابراین صرفاً یک فایل سری‌زمانی از کرنش وجود خواهد داشت.

جدول ۲. برداشت‌های انجام یافته برای تعیین موج از سنسورهای تعیین تراز سطح آب

سنسور	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5
نام فایل تراز سطح آب	W1	W2	W3	W4	W5
نام فایل تراز سطح ساکن آب	W001	W002	W003	W004	W005

جدول ۳. برداشت‌های انجام یافته برای تعیین کرنش از کرنش‌سنج نصب

شده بر روی دیوار

سنسور	SG1
نام فایل کرنش	E1
نام فایل کرنش برای حالت ساکن دیوار	E001

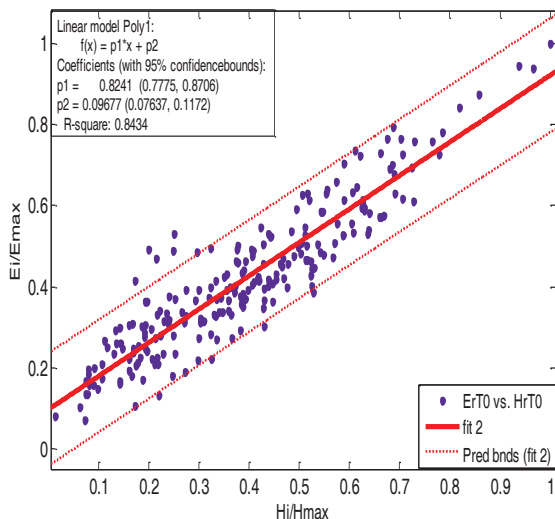
نمودار شکل (۱۳) مقادير کرنش در برابر ارتفاع متناظر آن نشان می‌دهد. این نمودارها، رفتار خطی مناسب را ارائه کرده است. مقدار R2 در این نمودارها ۰/۸۴۳۴ بوده و نقاط بسیار اندکی در خارج از محدوده باندهای ۰/۹۵٪ قرار می‌گیرند. همان‌طوری که در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود، بین ارتفاع موج و کرنش رابطه (۱۱) برقرار است. این رابطه به‌صورت بی‌بعد نوشته شده است.

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\max}} = 0.8241 \frac{H_i}{H_{\max}} + 0.09677 \quad (11)$$

در این رابطه، H_i ارتفاع موج، H_{\max} ارتفاع بیشینه در تاریخچه زمانی، ε_i کرنش نظیر H_i و ε_{\max} کرنش بیشینه در تاریخچه مربوطه است. در این دیوار، $H_{\max} = 11.813 \text{ cm}$ و $\varepsilon_{\max} = 2.2017 * 10^{-4}$ می‌باشد که کرنش مقدار حالت دینامیکی در اثر ضربه موج بوده و مقادیر استاتیکی در آن لحاظ نشده‌اند.

با توجه به رابطه $M_{\text{dyn}} = E\varepsilon_{\text{dyn}}W$ ، رابطه بین لنگر پای دیوار در حالت دینامیکی و ارتفاع موج به‌صورت معادله (۱۲) خواهد بود.

$$M = 625.48H + 867.63 \quad (12)$$

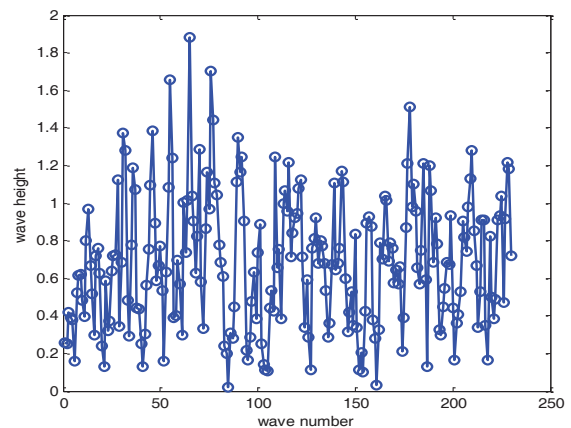


شکل ۱۳. نمودار کرنش پای دیوار در برابر ارتفاع موج

در شکل (۱۴) طیف تراز سطح آب و در شکل (۱۵) طیف کرنش به وجود آمده در دیوار در نتیجه برخورد موج تصادفی نشان داده شده‌اند. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود فرکانس پیک دو طیف به همدیگر نزدیک بوده و انرژی فرکانسی طیف کرنش حدود ۱۷ درصد بیشتر از انرژی تراز سطح آب است.

با توجه به مشابه بودن شکل طیف‌ها و محدوده‌های فرکانس حاکم بر آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط بین تغییرات کرنش با تراز سطح آب نسبتاً خطی است که این موضوع در تحلیل‌های مربوط به سری زمانی (شکل (۱۳)) نیز قابل مشاهده است.

موج بیشینه به‌دست آمده در شکل (۱۱) از تاریخچه زمانی نرمالیزه شده سطح آب به‌دست آمده است. مقدار دامنه مثبت این موج $(a_{\max})_{\text{norm}} = 0.9404$ ، دامنه منفی $(a_{\min})_{\text{norm}} = -0.9601$ ، ارتفاع موج $(H_{\max})_{\text{norm}} = 1.8809$ می‌باشد. برای به‌دست آوردن مقادیر واقعی می‌بایست این اعداد به عکس عددی که نرمال‌سازی شده بودند ضرب شوند. در این حالت $a_{\max} = 6.300 \text{ cm}$ ، $a_{\min} = -5.600 \text{ cm}$ ، $H_{\max} = |6.300| + |-5.600| = 11.9 \text{ cm}$ و بیشینه طول موج $L_{\max} = 84.698 \text{ cm}$ خواهد شد. با توجه به این‌که عمق آب $d = 60 \text{ cm}$ است با در نظر گرفتن نسبت عمق آب به طول موج $\frac{d}{L} = 0.710 > 0.5$ ، فرض عمیق بودن آب صحیح خواهد بود. برای تمام امواج روی تاریخچه زمانی نیز این پارامترها را می‌توان به‌دست آورد. در شکل (۱۲) نمودار ارتفاع موج بر حسب شماره موج آمده است.



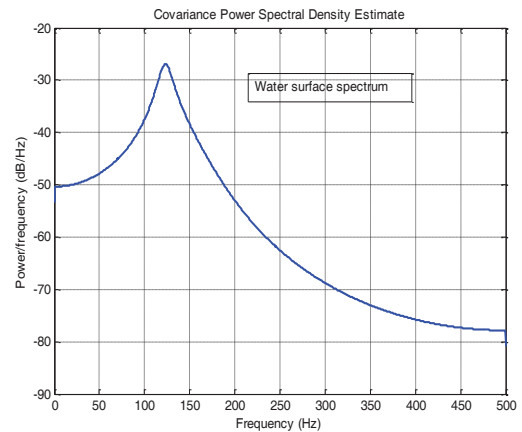
شکل ۱۲. نمودار ارتفاع امواج برای یک تاریخچه زمانی سطح آب

در صورتی که ارتفاع امواج به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب شوند، ارتفاع موج متوسط $H_{\text{ave}} = 4.49 \text{ cm}$ ، ارتفاع موج یک سوم بزرگ‌ترین امواج، $H_{1/3} = 5.79 \text{ cm}$ ، ارتفاع موج جذر میانگین مربعات، $H_{\text{rms}} = 5.15 \text{ cm}$ به‌دست خواهد آمد. در تولید این موج مقدار ارتفاع مؤثر موج $5/4$ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود که با توجه به نتایج به‌دست آمده این مقدار $5/79$ سانتی‌متر حاصل شد که ۹ درصد خطای موجود، قابل قبول به نظر می‌رسد. در تحلیل موج به موج کرنش مقدار حد اکثر کرنش در حالت دینامیکی $\varepsilon_{\text{dyn}} = 2.2017 * 10^{-4}$ حاصل شد که در این حالت مقدار لنگر خمشی در حالت دینامیکی به‌صورت زیر محاسبه خواهد شد.

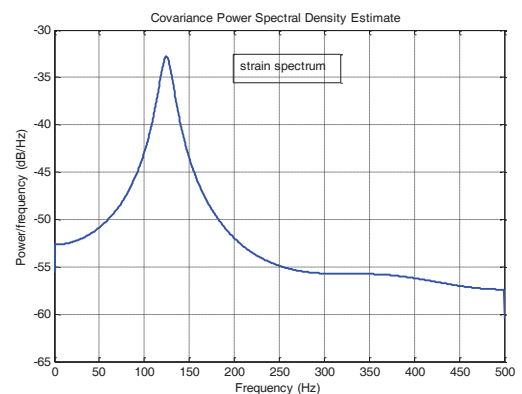
$$M_{\text{dyn}} = E\varepsilon_{\text{dyn}}W = 2 * 10^6 * 2.201 * 10^{-4} * 21.33 = 9386 \text{ kg.cm} = 94 \text{ kg.m}$$

البته می‌بایست توجه داشت که لنگر به‌دست آمده در تراز ۱۰ سانتی‌متری از کف و در محل نصب کرنش‌سنج حاصل شده است و به دلیل قرار داشتن دیوار روی دو پایه نصف لنگر دینامیکی کل دیوار را نشان می‌دهد. به‌ازای ارتفاع موج، کرنش نظیر آن موج به‌دست می‌آید، بنابراین می‌توان از روی ارتفاع موج، کرنش نظیرش را در دیوارهای مختلف پیش‌بینی کرد.

- [3] Minikin, R. R. "Wind Waves and Maritime Structures: Studies in Harbor Making and in Protection of Coasts"; Charles Griffin & Company, London, 1963, 224-304.
- [4] Yung fang, C.; Jawguei, L.; Shangchun, C. "An Experimental Study of Wave Forces on Vertical Break Water"; J. Marine Sci. Tech. 2007, 15, 158-170.
- [5] Vijayakrishna, E.; Natarajan, R.; Neelamani, S. "Experimental Investigation on the Dynamic Response of a Moored Wave Energy Device under Regular Sea Waves"; Ocean Eng. 2004, 31, 725-743.
- [6] Hughes, S. A. "Wave Momentum Flux Parameter: A Descriptor for Near Shore Waves"; Coastal Eng. 2004, 51, 1067-1084.
- [7] Neelamani, S.; Schuttrumpf, H. M.; Oumeraci, H. "Prediction of Wave Pressures on Smooth Impermeable Seawall"; Ocean Engineering 1994, 26, 739-765.
- [8] Cumo, G.; Allsop, W.; Takahashi, S. "Scaling Wave Impact Pressures on Vertical Wall"; Coastal Eng. 2010, 57, 604-609.
- [9] Vafaeipour, R.; Lotfollahi, M.; Aminfar, M. "The Effect of Random Waves Period on Coastal Wall Reaction with Various Geometrical Shapes with Numerical Method"; J. Oceanography 2011, 8, 69-78.
- [10] Strain Gauge TML Pam E-101R, Sokki Kenkyujo Company, Ltd. Tokyo, 2009.
- [11] SPM, Shore Protection Manual, Coastal Engineer's Research Center, U.S Army Corps, 1984.
- [12] Sorensen, R. M. "Basic Wave Mechanic for Coastal and Ocean Engineering"; Jon Wiley, 1993.
- [13] Iran's Ports and Marine Structures Design Manual, Transportation Research Institute, 2006, 300-10.



شکل ۱۴. طیف تراز سطح آب



شکل ۱۵. طیف کرنش

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که رفتار کرنش و ارتفاع موج تقریباً خطی با ضریب رگرسیون حدود ۸۵ درصد است. فرض تولید موج در آب عمیق برای پدل موج‌ساز لولایی بر مبنای نتایج اخذ شده از روش موج به موج به روش بالاگذری از تراز صفر ($\frac{d}{L} = 0.710 > 0.5$) تأیید شد. از طرف دیگر مشخص شده که در مراحل اصلاح موج تولیدی در فلوم بعد از ۲ یا ۳ مرحله معمولاً جواب مناسبی را می‌توان دریافت کرد ولی در مراحل بالاتر با آنکه تطابق در قله طیف بهتر می‌شود ولی انحرافات در قسمت‌های با فرکانس‌های بالای طیف بیشتر می‌شود. یافته دیگر این بود که پیک فرکانس طیف تراز سطح آب تقریباً با طیف کرنش برابر است. ارتباط خطی بین کرنش و تراز سطح آب را می‌توان از تحلیل سری‌های زمانی و همچنین مقایسه طیف‌ها مشاهده کرد.

۵. مراجع

- [1] Chegini, V. "Manual on the Design of Breakwaters"; Jahad Water and Watershed Management Research Company, 1998 (In Persian).
- [2] Rundgren, L. "Wave Force, Bulletin 549 Royal Institute of Technology"; Division of Hydraulics, Stockholm, Sweden, 1958.