یادداشت فنی

مدل‌سازی امواج برخوردی به موج شکن مستغرق با استفاده از روش المان مرزی

محمد رضا شکاری مهرآبادی[1*]، علی اکبر حکمت زاده[2]

[1] دانش آموخته دکتری مهندسی عمران،دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس؛ shekari.2291@gmail.com
[2] استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز؛ hekmatzadeh@sutech.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۲
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
روش المان مرزی
موج‌شکن شناور و مستغرق
بازتاب و عبور امواج

چکیده

موج‌شکن‌های مستغرق با هدف کنترل تغییرات مرفولوژی ساحل و حرکت رسوبات ساحلی در برابر حمله امواج ساخته می شوند. در تحقیق حاضر با استفاده از روش المان مرزی (BEM) مسأله تفرق امواج برخوردی به موج‌شکن‌های صلب شیبدار و عمودی موجود در زیر سطح آب مورد تحلیل قرار گرفته است. معادله انتگرالی المان مرزی با استفاده از المانهای مرزی ثابت و خطی جهت حل معادله لاپلاس (معادله‌ی سیال تراکم ناپذیر) توسط یک برنامه کامپیوتری که به زبان فرترن نوشته شده است، به حل مسأله مقدار مرزی می‌پردازد. تفرق امواج در دو نوع موج‌شکن شناور و مستغرق مطالعه شده است که جهت رسیدن به این هدف، مطالعه پارامتری روی ضرایب بازتاب و عبور و تغییرات تراز سطح آب تحت تأثیر شرایط مختلف موج برخوردی از جمله عدد موج، زاویه برخورد و تیزی موج، و شرایط مختلف سازه‌ای از جمله عرض و ارتفاع، و زاویه قرارگیری موج‌شکن انجام شده است.

Boundary Element Analysis of Incident Waves Passing a Submerged Breakwater

Mohammad Reza Shekari[1], Ali Akbar Hekmatzadeh[2]

[1] PhD, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, shekari.2291@gmail.com
[2]Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of technology, hekmatzadeh@sutech.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 Jul. 2014
Accepted: 3 Aug. 2015
Available online: 22 Sep. 2015

Keywords:
Boundary element method
Floating and submerged breakwater
wave reflection and transmission

ABSTRACT

The principle included in construction of submerged breakwater is to protect beach from morphological changes and the sediment transport against incoming waves. In the present study, boundary element method (BEM) is employed for solving the scattering problem of incident wave passing the vertical and inclined submerged breakwaters with rigid boundaries. The boundary element integral equation with constant and linear elements is used to solve the Laplace equation (for the incompressible fluids) in boundary value problems by development of a FORTRAN computer program. The diffraction of water waves has been investigated in floating and submerged breakwaters so that to gain this goal, a parametric study on the water wave reflection and transmission coefficients and the water surface elevation has been performed considering the influence of various sea states such as wave number, obliquely of waves and wave stippness, and several structural configurations such as width, depth and angle of inclination.

۱ - مقدمه

آسیب دیدگی مناطق ساحلی ناشی از پدیده‌های طبیعی و فرسایش سواحل، بعنوان بارزترین صدمات، باعث شد تا محققین زیادی به مطالعه و بررسی راهکارهای مختلف حفاظت سواحل بپردازند. از راهکارهای مهم می‌توان به احداث سازه‌هایی مثل موج‌شکن‌های دور از ساحل، دیوارهای ساحلی، صفحات مستغرق و موج‌شکن‌های مستغرق اشاره نمود. در شرایطی که فرسایش ساحل عمدتاً در جهت عمود بر ساحل باشد احداث سازه‌های

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]

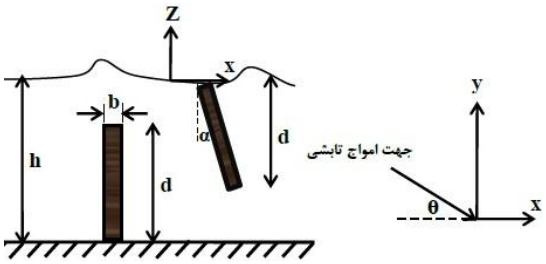
موازی ساحل مثل موج‌شکن‌ها در جهت حفاظت ساحل می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود. با طراحی و جانمایی مناسب موج‌شکن‌های مستغرق در نزدیکی ساحل می‌توان حرکت رسوبات ساحلی را کنترل نموده و به دنبال آن تغییرات مرفولوژی ساحل را محدود نمود [۱].

در طی دهه‌های اخیر بحث تفرق امواج تابشی به سازه‌های نزدیک ساحل مستغرق و میزان کاهش انرژی امواج عبوری از این سازه ها نظر بسیاری از محققان را به خود معطوف داشته است. شروع مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی موج‌شکن‌ها و دیواره های مستغرق به دهه نود میلادی برمی‌گردد که در این میان می توان به مطالعات لوسادا و پترسون [۲]، تسار و یوچ [۳]، ییپ و چوانگ [۴] اشاره کرد. پیشرفت های اخیر در زمینه روش های عددی و کاربرد آن در مسائل مربوط به مکانیک سیالات و امواج باعث استفاده از این روش‌ها در زمینه مدل کردن رفتار موج عبوری از موج‌شکن مستغرق شده است، که از میان روشهای عددی، روش‌های المان محدود و روش المان مرزی در مدل کردن این سازه‌ها بیشترین استفاده را داشته اند. روش المان های مرزی (BEM) که به روش انتگرال های مرزی نیز موسوم است را می‌توان به عنوان یک روش نیمه تحلیلی طبقه بندی کرد و از آنجاییکه برای معادله دیفرانسیل هارمونیک در محیط‌های همگن جواب‌های بسیار خوب نزدیک به نتایج تحلیلی می دهد، لذا نسبت به روش المان محدود بیشتر استفاده می شود. در سال ۱۹۸۳، ناکایاما مدل دو بعدی المان مرزی امواج غیر خطی را در مسائل مختلف مقدار مرزی براساس قضیه گرین مطالعه کرد و به ارائه فرمول های مختلف که با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی مقایسه و صحت سنجی شده بودند، پرداخت [۵]. در سال ۱۹۹۳، چن و هونگ به حل معادلات انتگرال های مرزی دوگانه پرداختند که نتیجه آن توسعه برنامه دو بعدی (BEPO2D) برای حل معادله لاپلاس بود [۶]. در ادامه چن و همکاران در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش المان مرزی دوگانه به تحلیل امواج عبوری از دیواره های صلب با ضخامت کم پرداختند که در تحقیق آنها عمق سیال ثابت و تراکم پذیری آن نیز در نظر گرفته شده بود [۷]. در واقع یکی از مهمترین مزایای روش المان مرزی این است که در آن، معادله دیفرانسیل حاکم بر یک قلمرو به یک معادله انتگرال مرزی تبدیل گشته و از ابعاد مسأله یکی کم می شود، که به تبع آن درجات آزادی مسأله کاهش یافته و حجم محاسبات نیز به مقدار قابل توجهی کمتر می شود [۸]. چن و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش المان مرزی به مطالعه تفرق امواج تابشی عمود بر دیواره‌های مستغرق پرداختند و تأثیر دیواره مستغرق در حالات مختلف صلبیت و نفوذپذیری را بر میزان تلفات انرژی عبوری ارزیابی کردند [۹]. در سال ۲۰۰۹، کائو و تنگ با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده به آنالیز امواج عبوری از روی سازه موج‌شکن با مقطع مستطیلی و دیواره صلب پرداختند و حجم محاسبات کمتر با تعداد المان های مورد نیاز کمتر در قلمرو مورد مطالعه نسبت به تحقیقات پیشین را از نقاط قوت مطالعه خود بیان نمودند [۱۰].

هدف از انجام این پژوهش تحلیل مسأله انتشار امواج برخوردی به موج‌شکن‌های مستغرق صلب شیبدار و عمودی است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد روش المان مرزی، مانند دقت و سرعت بالای آن به دلیل تعداد المان کمتر، نسبت به سایر روش های عددی، از این روش برای مدل کردن سیال پیرامون سازه مستغرق استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در زمینه بررسی اثرات موج‌شکن‌های مستغرق بر تفرق امواج، در مطالعات قبلی نیز که به کمک روش المان مرزی انجام شده، مطالعات پارامتریک با المان های ثابت و خطی انجام نشده است.

۲- روابط ریاضی حاکم بر تفرق امواج برخوردی به موج-شکن مستغرق

تئوری تفرق امواج با دامنه کوچک از یک مانع با ضخامت کم توسط محققین مختلفی از جمله لیو و عباسپور در سال ۱۹۸۲، و چن و همکارانش در سال ۲۰۰۲ مطالعه شده و به ارائه روابط حاکم در این زمینه پرداخته‌اند [۷ و۱۱]. شکل (۱) شمایی از یک قطار موج که با فرکانس σ و زاویه θ به سمت یک موج‌شکن مستغرق به ارتفاع (d) در عمق ثابت آب (h) حرکت می کند، را نشان می دهد.



شکل ۱- شمایی از مسأله عبور امواج مورب از یک موج‌شکن صلب در حالات مختلف مستغرق و شناور.

اگر سیال غیر قابل تراکم، غیر لزج و غیر چرخشی فرض شود، میدان سیال را می‌توان با تابع پتانسیل سرعت $\phi(x,y,z,t)$ جایگزین نمود که با فرضیات بیان شده معادله لاپلاس به شکل زیر را ارضاء می‌کند:

$$\nabla^2\phi(x,y,z,t)=0 \qquad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]

با توجه به محدودیت ارتفاع موج در مقایسه با طول موج و عمق آب و عدم تأثیر کف دریا، می‌توان امواج خطی در نظر گرفت و از حوضه زمان به حوضه فرکانس انتقال داد:

$$\phi(x,y,z,t) = u(x,y)e^{i(\lambda x - \sigma t)} \qquad (۲)$$

که در آن، $\lambda = k\sin(\theta)$ و k نیز عدد موج است. در واقع تابع مجهول $u(x,y)$ بیانگر نوسانات پتانسیل سرعت در صفحه xy است. با جایگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱) معادله‌ای به شکل زیر حاصل می‌شود که به معادله هلمولتز مشهور است:

$$\nabla^2 u(x,y) + \lambda^2 u(x,y) = 0 \qquad (۳)$$

جهت حل معادله دیفرانسیل حاکم بر قلمرو سیال و سازه شرایط مرزی زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- عوامل مؤثر در شرایط سطح آزاد دو مؤلفه ثقل و کشش سطحی است، که به علت قابل اغماض بودن تأثیر کشش سطحی نسبت به اثرات ثقل از این عبارت صرفنظر شده و تنها تأثیر ثقل بررسی می شود [۱۲]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \sigma^2 \frac{u}{g} = 0 \qquad (۴)$$

۲- شرایط مرزی در کف و دیواره موج‌شکن به دلیل صفر بودن مولفه سرعت عمود بر سطح به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \qquad (۵)$$

که در آن، n بردار نرمال عمود بر سطح است.

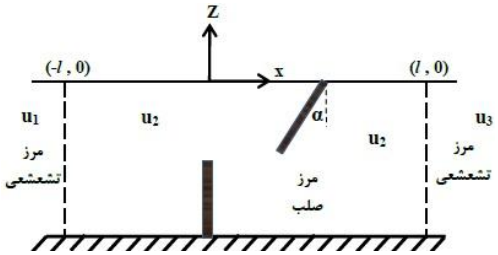
۳- در مدلسازی مرزهای دوردست قلمرو سیال از شرط مرزی تشعشعی سومرفلد [۱۳] استفاده می‌شود:

$$\lim_{S\to\infty}\left[\sqrt{S}\left(\frac{\partial u}{\partial S} - iku\right)\right] = 0 \quad , \quad S = \sqrt{(x^2+z^2)} \qquad (۶)$$

در شکل (۲) شرایط مرزی مختلف حاکم بر قلمرو سیال و موج-شکن در حالات مختلف مستغرق و شناور نشان داده شده‌است. اگر موج‌شکن در جهت عرضی بصورت نامحدود درنظر گرفته شود، قلمرو سیال و موج‌شکن را می‌توان به سه زیرناحیه تقسیم نمود که محدوده میانی (محدوده ۲) شامل طول‌های $\pm l$ در دوطرف دیواره موج‌شکن است (شکل ۲). با صرفنظر نمودن از تلفات انرژی می‌توان توابع پتانسیل سرعت در نواحی ۱ و ۳ را به صورت زیر تعریف نمود:

$$u_1(x,y) = (e^{i\lambda(x+l)} + \mathrm{Re}^{-i\lambda(x+l)})\frac{\cosh(k(h+y))}{\cosh(kh)} \qquad (۷)$$

$$u_3(x,y) = Te^{i\lambda(x+l)}\frac{\cosh(k(h+y))}{\cosh(kh)} \qquad (۸)$$



شکل ۲- شرایط مرزی سیال در تماس با موج‌شکن های مختلف مستغرق و شناور.

که در آن، R ضریب بازتاب و T ضریب عبور امواج است. از آنجاییکه در محل مرزهای تشعشعی باید شرایط مرزی در هر دو ناحیه یکسان باشد می‌توان نوشت:

$$u_1(-l,y) = u_2(-l,y)$$
$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad , \quad x = -l \qquad (۹)$$

$$u_2(l,y) = u_3(l,y)$$
$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = \frac{\partial u_3}{\partial x} \quad , \quad x = l \qquad (۱۰)$$

با ترکیب روابط (۷) تا (۱۰) می‌توان ضرایب بازتاب و عبور امواج را به صورت زیر استخراج نمود:

$$R = -1 + \frac{k}{\lambda_0 \sinh(kh)}\int_{-h}^{0} u_2(-l,y)\cosh(k(h+y))\,dy \qquad (۱۱)$$

$$T = \frac{k}{\lambda_0 \sinh(kh)}\int_{-h}^{0} u_2(l,y)\cosh(k(h+y))\,dy \qquad (۱۲)$$

که در آن، $\lambda_0 = \frac{1}{2}(1+\frac{2kh}{\sinh(2kh)})$ و، T و R بترتیب ضرایب بازتاب و عبور امواج می باشند.

با استفاده از روش المان مرزی می توان مقادیر مختلف تابع پتانسیل سرعت را به صورت زیر محاسبه کرد [۱۴]:

$$[H]\{u\} = [G]\{q\} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه $[H]$ و $[G]$ ماتریس‌های ضرایب روش المان مرزی با اندازه $N\times N$ (N تعداد المانها)، و $\{u\}$ و $\{q\}$ به ترتیب نشان دهنده بردارهای پتانسیل سرعت و شار (مشتق پتانسیل سرعت نسبت به بردار عمود بر سطح) است. درایه های ماتریس های $[H]$ و $[G]$ نیز از روابط زیر بدست می آیند:

$$H_{ij} = \int_{s_j} q_i^* ds_j \quad , \quad i \neq j \qquad (۱۴\text{-الف})$$

$$H_{ii} = -\frac{1}{2} + \int_{s_i} q_i^* ds_i \quad , \quad i = j \qquad (۱۴\text{-ب})$$

$$G_{ij} = \int_{s_j} u_i^* ds_j \qquad (۱۴\text{-ج})$$

که در آن، S_j مرز j امین المان، و u^* و q^* بترتیب حل اساسی معادله (۱۳) و مشتق آن می باشند و از روابط زیر بدست می آیند:

$$u^* = \frac{i}{4}H_0^{(2)}(kr) \qquad (۱۵\text{-الف})$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]

$$q^* = \frac{\partial u^*}{\partial n} = -\frac{ki}{4} H_1^{(2)}(kr) \qquad (۱۵\text{-ب})$$

که در آن $H_0^2(kr)$ ، تابع هنکل از مرتبه صفر و نوع دوم و $H_1^2(kr)$ تابع هنکل از مرتبه اول و نوع دوم بوده، و n بردار عمود بر سطح می باشد. رابطه اخیر را می‌توان به فرم مبسوط زیر نیز بازنویسی کرد [۸]:

$$\sum_{j=1}^{N} H^{ij} u^j = \sum_{j=1}^{N} G^{ij} q^j \qquad (۱۶)$$

با تقسیم مرزها به المانهای مختلف می‌توان مقدار پتانسیل سرعت را بر روی هر المان بدست آورد.

۳- شرح مطالعات عددی

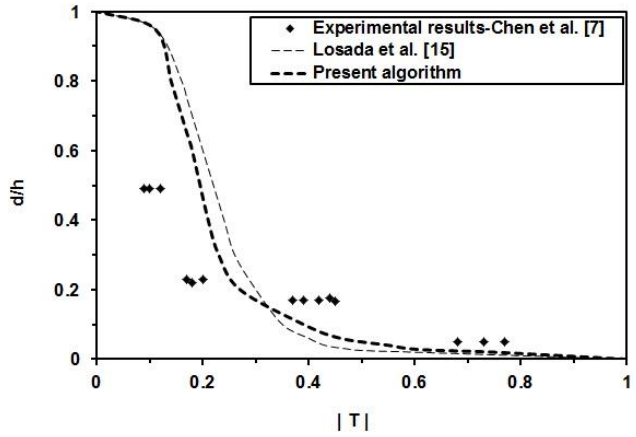
در این پژوهش، برای مطالعه دقیق رفتار امواج عبوری از موج-شکن از روش المان مرزی کمک گرفته شده و یک برنامه رایانه-ای بر اساس فرمول‌بندی توسعه داده شده در این مقاله، نوشته شده است. در این بخش، ابتدا صحت و اعتبار نتایج خروجی برنامه تهیه شده بررسی شده و در ادامه به بحث و مطالعات پارامتری در خصوص عبور امواج از موج‌شکن‌های مستغرق و شناور پرداخته می شود.

۳-۱- صحت سنجی برنامه برای مدل یک موج‌شکن شناور

برای صحت سنجی برنامه، از نتایج بررسی آزمایشگاهی چن و همکارانش [۷] و مدل تحلیلی لوسادا و همکارانش [۱۵] استفاده شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه گردید.

موج‌شکن عمودی مورد مطالعه دارای عمق شناوری d است که درون آب با عمق ثابت 1m قرار گرفته و امواج با k متغیر به آن برخورد می کنند.

شکل (۳) تغییرات ضریب عبور امواج در برابر پارامتر بدون بعد نسبت عمق شناوری موج‌شکن به عمق آب (d/h) برای تحقیقات مختلف، را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌گردد با کاهش عمق نسبی سازه مقدار ضریب عبور موج افزایش پیدا می‌کند، و همچنین نتایج الگوریتم حاضر در مقایسه با نتایج حل تحلیلی لوسادا و همکارانش [۱۵] به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.



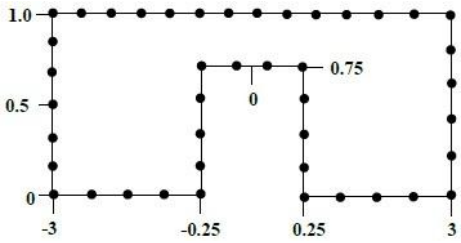
شکل ۳- مقایسه نتایج روش المان مرزی با نتایج مختلف تحلیلی و آزمایشگاهی (kh=4.272).

۳-۲- مطالعات پارامتری امواج عبوری از موج‌شکن‌های مستغرق

در این حالت مطالعه پارامتری بر روی پدیده تفرق امواج تحت تأثیر طول المان‌ها و نوع آنها و زاویه برخورد امواج انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها برای این حالت در بخش‌های زیر ارائه می-شود.

۳-۲-۱- بررسی تأثیر طول و نوع المان‌ها

شکل (۴) نحوه مش بندی قلمرو سیال و سازه برای نسبت های بدون بعد b/h=0.5، d/h=0.75 و kh=2 را نشان می‌دهد. جهت بررسی حساسیت نتایج نسبت به نوع المان های مرزی، از المان های ثابت و خطی با طول متغیر استفاده شده است.



شکل ۴- مدل المان مرزی دو بعدی موج‌شکن مستغرق.

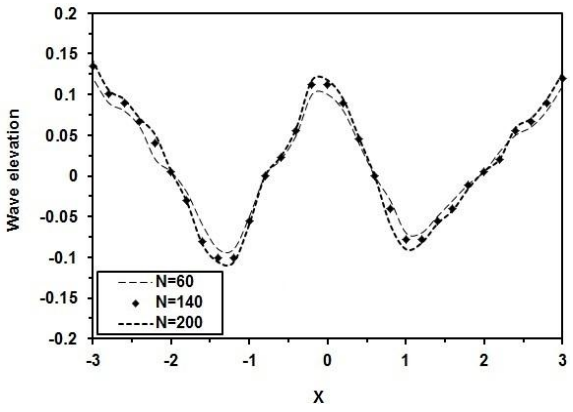
شکل (۵) تغییرات ارتفاع سطح آب را نسبت به نقاط طولی، در برخورد عمودی امواج و با در نظر گرفتن المان‌های مختلف نشان می دهد. در قسمت (الف) از این شکل، تغییرات تراز سطح آب با در نظر گرفته شدن ۶۰، ۱۴۰ و ۲۰۰ المان خطی نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، نتایج حاصل از روش المان مرزی به طول مش وابسته نیست.

همچنین تغییرات تراز سطح آب با در نظر گرفته شدن المان های ثابت و خطی به شرح قسمت (ب) از شکل مزبور نشان داده شده است. با توجه به نتایج شکل مزبور می‌توان دریافت، نتایج استفاده

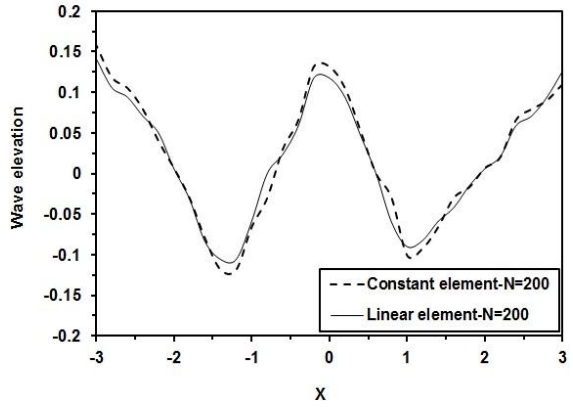
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]

از المانهای مرزی ثابت به المانهای مرزی خطی بسیار نزدیک است و در مسائل مقدار مرزی می توان از المان‌های ثابت با دقت مناسب استفاده نمود.



الف) طول متغیر المان



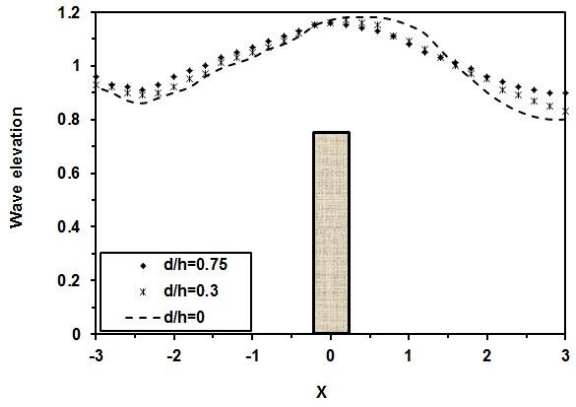
ب) المان ثابت و خطی

شکل ۵- تغییرات تراز موج برخوردی به موج‌شکن مستغرق با در نظر گرفتن المان های ثابت و خطی و انواع مش بندی

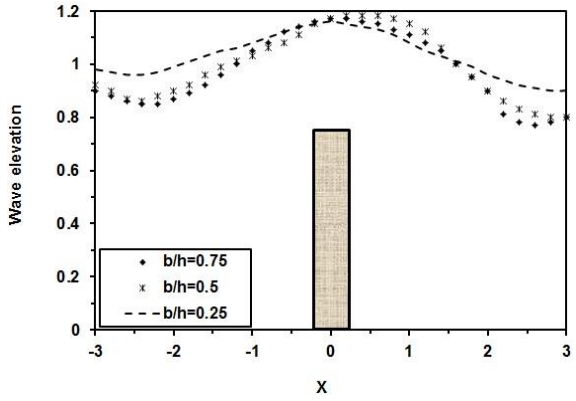
شکل (۶) مقایسه تراز سطح آب در برخورد عمودی امواج به موج-شکن‌های مستغرق با ابعاد مختلف، را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارها می‌توان دریافت، با افزایش ارتفاع دیواره موج‌شکن میزان بازتاب امواج افزایش می یابد و به دنبال آن میزان عبور امواج نیز کاهش پیدا می کند (قسمت الف). همچنین با افزایش عرض موج-شکن امواج دچار انکسار شده و میزان عبور امواج افزایش پیدا می-کند (قسمت ب).

جدول ۱- ضرایب بازتاب و عبور امواج مورب

θ	R		T	
	b/h=0.5	b/h=1	b/h=0.5	b/h=1
30^0	0.312	0.236	0.621	0.743
50^0	0.423	0.322	0.522	0.636
70^0	0.526	0.411	0.436	0.538



الف) عمق های مختلف (b/h=0.5)



ب) عرض های مختلف (d/h=0.75)

شکل ۶- تغییرات تراز موج برخوردی به موج‌شکن مستغرق با در نظر گرفتن عرض و ارتفاع های مختلف

۳-۲- ۲- بررسی تأثیر زاویه برخورد امواج

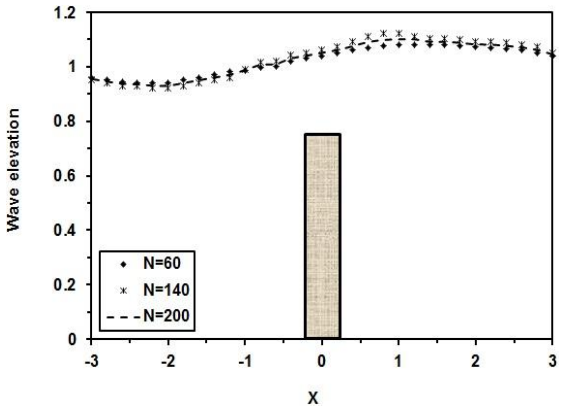
جهت بررسی تأثیر زاویه امواج برخوردی به موج‌شکن مستغرق زوایای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه نسبت به محور x ها (شکل ۱)، و نسبت های بدون بعد b/h=0.5, 1، d/h=0.75 و kh=3 در نظر گرفته شد. جدول (۱) مقادیر ضرایب بازتاب و عبور امواج را نسبت به زاویه برخورد امواج و عرض موج‌شکن نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه برخورد امواج ضریب بازتاب افزایش یافته و از مقدار ضریب عبور امواج کاسته می‌شود. در واقع، با افزایش زاویه موج تابشی شار انرژی در جهت موازی با محور سازه (جهت y در شکل ۱) افزایش یافته و در جهت عمودی نیز کاهش پیدا می‌کند و شکست امواج بیشتر اتفاق می‌افتد که نتیجه آن کاهش ضریب عبور امواج است. همچنین با افزایش عرض موج‌شکن امواج دچار انکسار شده و ضریب عبور امواج افزایش پیدا می کند [۱۶].

شکل (۷) تغییرات ارتفاع سطح آب را نسبت به نقاط طولی، در برخورد امواج مورب با زاویه ۷۰ درجه و با در نظر گرفتن انواع مش بندی و موج‌شکن‌ها با عمق های مختلف نشان می دهد.

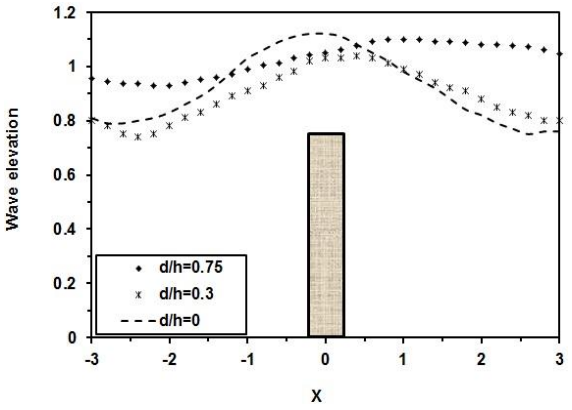
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تغییرات تراز سطح آب تقریباً مستقل از طول المان‌های مرزی انتخاب شده است.



الف) طول متغیر المان

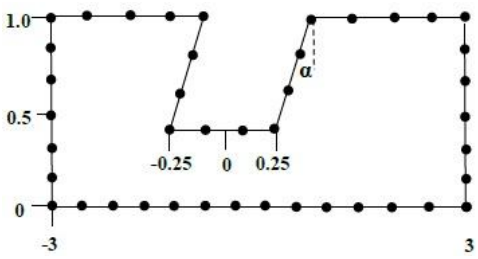


ب) عمق موج‌شکن

شکل ۷- تغییرات تراز موج برخوردی به موج‌شکن مستغرق با در نظر گرفتن انواع مش بندی و عمق موج‌شکن ($\theta=70^0$).

۳-۳- مطالعات پارامتری امواج عبوری از موج‌شکن‌های شناور

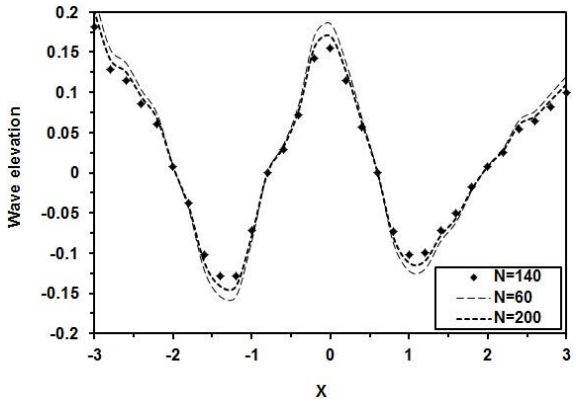
در این قسمت به بررسی اثرات پارامترهای مختلف از قبیل عمق شناوری موج‌شکن و خصوصیات موج تابشی بر پدیده تفرق امواج پرداخته می شود، که نتایج تحلیل‌ها برای این حالت در بخش‌های زیر ارائه می‌شود.



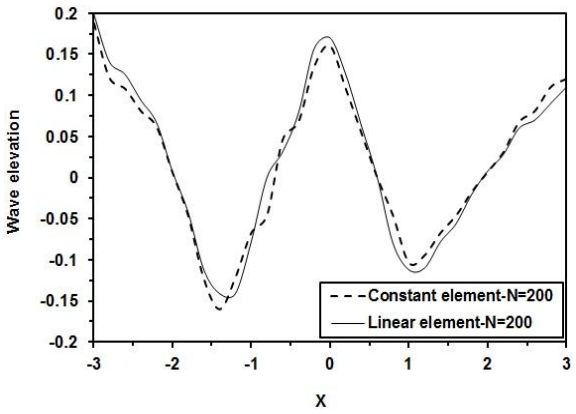
شکل ۸- مدل المان مرزی دو بعدی موج‌شکن شناور.

۳-۳-۱- نحوه مش بندی محیط و تأثیر طول المان ها

در شکل (۸) نحوه مش بندی قلمرو سیال و موج‌شکن شناور نشان داده شده است. مشابه بررسی های انجام شده در بخش ۳-۲-۱، در این بخش نیز به بررسی حساسیت نتایج نسبت به نوع المان های مرزی، از المان‌های ثابت و خطی با طول متغیر پرداخته شده است. شکل (۹) تغییرات ارتفاع سطح آب نسبت به نقاط طولی، در برخورد عمودی امواج و با در نظر گرفتن المان‌های مختلف و برای نسبت‌های بدون بعد $d/h=0.75$ و $kh=2$، را نشان می‌دهد.



الف) طول متغیر المان



ب) المان ثابت و خطی

شکل ۹- تغییرات تراز موج برخوردی به موج‌شکن شناور با در نظر گرفتن المان های ثابت و خطی و انواع مش بندی

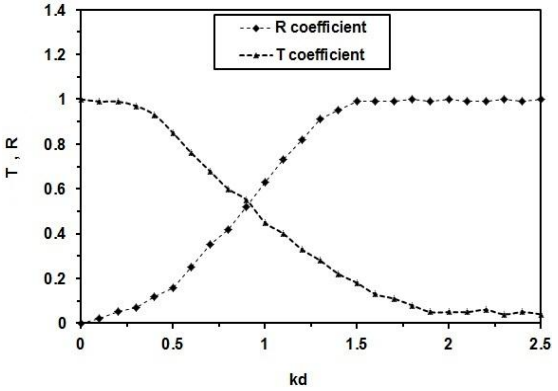
با توجه به مقایسه نتایج این قسمت و نتایج شکل (۵) در شرایط مشابه می توان دریافت که در حالت شناوری موج‌شکن مقدار بازتاب امواج بیشتر از حالت مستغرق است و به تبع آن تغییرات تراز سطح آب بعد از عبور موج از موج‌شکن به دلیل کمتر بودن ضریب عبور امواج کمتر است و، نتایج حاصل از روش المان مرزی به طول مش وابسته نیست. همچنین، نتایج استفاده از المانهای مرزی ثابت به المانهای مرزی خطی بسیار نزدیک است و می توان از المان‌های ثابت با دقت مناسب استفاده نمود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]

۳-۳-۲- بررسی تأثیر ابعاد موج‌شکن و زاویه قرارگیری

شکل (۱۰) تغییرات ضرایب عبور و بازتاب امواج از موج‌شکن شناور در برابر پارامتر بدون بعد kd برای مقدار kh=4.11، که در آن d عمق شناوری است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- ضرایب بازتاب و عبور امواج برای عمق‌های مختلف شناوری موج‌شکن (kh=4.11).

همانطور که از شکل مزبور پیدا است، به صورت کلی می‌توان گفت با افزایش مقدار kd طول دیواره بازتابی افزایش پیدا کرده و به دنبال آن ضریب بازتاب افزایش یافته و از مقدار ضریب عبور امواج کاسته می شود.

۴- نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف تحلیل مسأله انتشار امواج برخوردی به موج‌شکن‌های صلب شیبدار و عمودی موجود در زیر سطح آب با استفاده از روش المان مرزی انجام شده است. جهت حل معادله لاپلاس حاکم بر قلمرو سیال تراکم ناپذیر در تماس با سازه یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است که در آن، الگوریتم معادله انتگرالی المان مرزی با استفاده از گسسته سازی مرزها توسط هر دو نوع المان‌های ثابت و خطی برنامه ریزی شده است. نتایج برنامه تهیه شده با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و اطمینان از اعتبار آن حاصل شده است.

۵- مراجع

۱- هاشمی جوان، سید علی، (۱۳۸۶). "شبیه سازی عددی پدیده شکست موج بر روی موج شکن مستغرق." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران، گروه آب و محیط زیست.

2- Losada, I. J., Patterson, M. D. and Losada, M.A., (1997), *Harmonic generation past a submerged porous step*, Coastal Engineering., vol. 31, p. 281–304.

3-Tsaur, D. H., Yueh, C. Y., Chang, K. H. and Yang, Y. C., (2000), *A study on wave scattering by submerged plate-type breakwater with absorbing boundary*, Proc., 12th Hydraulic Engineering Conference, Taiwan, R.O.C., p. 168–174 in Chinese.

4-Yip, T. L. and Chwang, T., (1998), *Water wave control by submerged pitching porous plate*, Journal of Engineering Mechanics, p. 428–434.

5- Nakayama, T., (1983), *Boundary element analysis of nonlinear water wave problems*, International Journal for Numerical Methods in Engineering ., vol. 19, p. 953–970.

6- Chen, J.T. and Hong, H.-K., (1993), *On the dual integral representation of boundary value problem in Laplace equation*, Boundary Element Abstracts 3, p. 114–116.

7- Chen, K.H., Chen, J.T., Chou C.R. and Yueh C.Y., (2002), *Dual boundary element analysis of oblique incident wave passing a thin submerged breakwater*, Engineering Analysis with Boundary Elements, vol. 26, p.917–928.

8- Brebbia, C. and Dominguez, J., (1992), *Boundary Elements: An Introductory Course*, WIT Press, Computational Mechanics Publications.

9- Chen, K.H., Chen, J.T., Lin, S.Y. and Lee, Y.T., (2004), *Dual boundary element analysis of normal incident wave passing a thin submerged breakwater with rigid, absorbing and permeable boundaries*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, vol. 130 (4), p.179–190.

10- Cao, F. S. and Teng, B., (2009), *Analysis of Wave Passing a Submerged Breakwater by a Scaled Boundary Finite Element Method*, New Trends in Fluid Mechanics Research, p.296-299.

11- Liu, P. L. F. and Abbaspour, M., (1982), *Wave scattering by a rigid thin barrier*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 108, p.479–491.

12- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1984), *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

13- Sommerfeld, A., (1964), *Lectures on theoretical physics, Partial differential equations in physics*, Vol. VI, Chap. 28, Academic, New York.

14- Liu, P.L.F. and Abbaspour, M., (1982), *An integral equation method for the diffraction of oblique wave by an infinite cylinder*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 18, p.1497–1504.

15- Losada, I. J., Losada, M. A. and Roldan, J. (1992), *Propagation of oblique incident waves past rigid vertical thin barriers*, Applied Ocean Research, vol. 14, p. 191–199.

16- Baoxing, Wang, Ashwini K., Otta and rew J., Chadwick, (2007), *Transmission of obliquely incident waves at low-crested breakwaters*: Theoretical interpretations of experimental observations, Coastal Engineering, vol. 54, p.333–344.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.3.7]