

## مدل سازی امواج برخوردی به موج شکن مستغرق با استفاده از روش المان مرزی

محمد رضا شکاری مهرآبادی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر حکمت زاده<sup>۲</sup><sup>۱</sup> دانش آموخته دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس؛ shekari.2291@gmail.com<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز؛ hekmatzadeh@sutech.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
موج شکن های مستغرق با هدف کنترل تغییرات مورفولوژی 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 موج شکن های 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 (معادله سیال تراکم ناپذیر) توسط یک برنامه کامپیوتری که به زبان فرترن نوشته شده است، به حل مسأله مقدار مرزی می پردازد. تفرق امواج در دو نوع موج شکن 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 سازه ای از جمله عرض و ارتفاع، و زاویه قرارگیری موج شکن انجام شده است.	ناریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۲ تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱ کلمات کلیدی: روش المان مرزی موج شکن شناور و مستغرق بازتاب و عبور امواج

## Boundary Element Analysis of Incident Waves Passing a Submerged Breakwater

Mohammad Reza Shekari<sup>1</sup>, Ali Akbar Hekmatzadeh<sup>2</sup><sup>1</sup> PhD, Department of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, shekari.2291@gmail.com<sup>2</sup> 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 steepness, and several structural configurations such as width, depth and angle of inclination.

بپردازند. از راهکارهای مهم می توان به احداث سازه های مثل موج شکن های دور از ساحل، دیوارهای ساحلی، صفحات مستغرق و موج شکن های مستغرق اشاره نمود. در شرایطی که فرسایش ساحل عمدتاً در جهت عمود بر ساحل باشد احداث سازه های

## ۱ - مقدمه

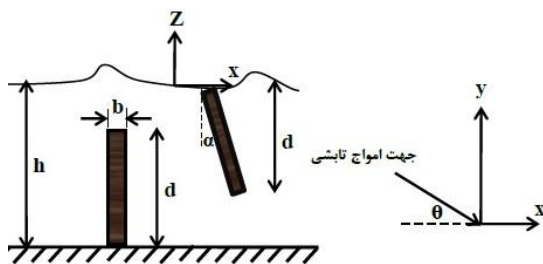
آسیب دیدگی مناطق ساحلی ناشی از پدیده های طبیعی و فرسایش سواحل، بعنوان بارزترین صدمات، باعث شد تا محققین زیادی به مطالعه و بررسی راهکارهای مختلف حفاظت سواحل

از روش المان محدود مرزی مقیاس شده به آنالیز امواج عبوری از روی سازه موج شکن 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 موج شکن های مستغرق صلب شیبدار و عمودی است. با توجه به ویژگی های 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 می شود. شایان ذکر است که در زمینه بررسی اثرات موج شکن های 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 پرداخته اند [۷ و ۱۱]. شکل (۱) شمایی از یک قطار موج که با فرکانس  $\sigma$  و زاویه  $\theta$  به سمت یک موج شکن مستغرق به ارتفاع (d) در عمق ثابت آب (h) حرکت می کند، را نشان می دهد.



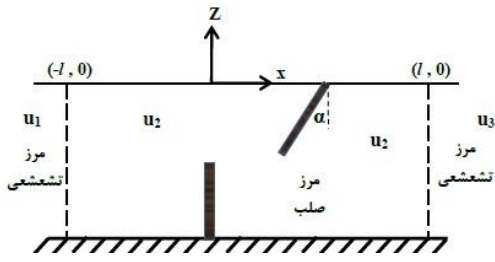
شکل ۱- شمایی از مسأله عبور امواج مورب از یک موج شکن صلب در حالات مختلف مستغرق و شناور.

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

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

موازی ساحل مثل موج شکن ها در جهت حفاظت ساحل می تواند بسیار مؤثر واقع شود. با طراحی و جانمایی مناسب موج شکن های مستغرق در نزدیکی ساحل می توان حرکت رسوبات ساحلی را کنترل نموده و به دنبال آن تغییرات مرفولوژی ساحل را محدود نمود [۱].

در طی دهه های اخیر بحث تفرق امواج تابشی به سازه های 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 موج شکن ها و دیواره های مستغرق به دهه نود میلادی برمی گردد که در این میان می توان به مطالعات لوسادا و پترسون [۲]، تسار و یوچ [۳]، بیپ 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 روش ها در زمینه مدل کردن رفتار موج عبوری از موج شکن مستغرق شده است، که از میان روشهای عددی، روش های المان محدود و روش المان مرزی در مدل کردن این سازه ها بیشترین استفاده را داشته اند. روش المان های مرزی (BEM) که به روش انتگرال های مرزی نیز موسوم است را می توان به عنوان یک روش نیمه تحلیلی طبقه بندی کرد و از آنجاییکه برای معادله دیفرانسیل هارمونیک در محیط های همگن جواب های 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 داده های 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 دیواره های 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



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

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

$$u_1(-l, y) = u_2(-l, y) \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u_2}{\partial x}, \quad x = -l$$

$$u_2(l, y) = u_3(l, y) \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = \frac{\partial u_3}{\partial x}, \quad x = l$$

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

$$R = -1 + \frac{k}{\lambda_0 \sinh(kh)} \int_{-h}^0 u_2(-l, y) \cosh(k(h+y)) dy \quad (11)$$

$$T = \frac{k}{\lambda_0 \sinh(kh)} \int_{-h}^0 u_2(l, y) \cosh(k(h+y)) dy \quad (12)$$

که در آن،  $\lambda_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$  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]:

$$[H]\{u\} = [G]\{q\} \quad (13)$$

در این رابطه  $[H]$  و  $[G]$  ماتریس های ضرایب روش المان مرزی با اندازه  $N \times N$  (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:

$$H_{ij} = \int_{s_j} q_i^* ds_j, \quad i \neq j \quad (14-الف)$$

$$H_{ii} = -\frac{1}{2} + \int_{s_i} q_i^* ds_i, \quad i = j \quad (14-ب)$$

$$G_{ij} = \int_{s_j} u_i^* ds_j \quad (14-ج)$$

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:

$$u^* = \frac{i}{4} H_0^{(2)}(kr) \quad (15-الف)$$

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

$$\phi(x, y, z, t) = u(x, y) e^{i(\lambda x - \sigma t)} \quad (2)$$

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) معادله ای به شکل زیر حاصل می شود که به معادله هلمولتز مشهور است:

$$\nabla^2 u(x, y) + \lambda^2 u(x, y) = 0 \quad (3)$$

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

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]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \sigma^2 \frac{u}{g} = 0 \quad (4)$$

۲- شرایط مرزی در کف و دیواره موج شکن به دلیل صفر بودن مؤلفه سرعت عمود بر سطح به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

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

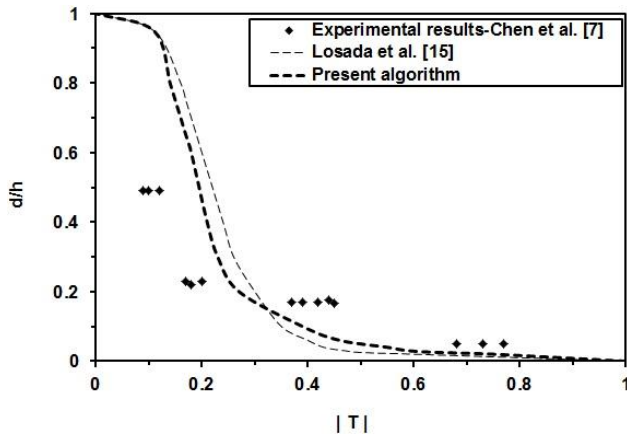
۳- در مدلسازی مرزهای دوردست قلمرو سیال از شرط مرزی تشعشی سومرفلد [۱۳] استفاده می شود:

$$\lim_{S \rightarrow \infty} \left[ \sqrt{S} \left( \frac{\partial u}{\partial S} - iku \right) \right] = 0, \quad S = \sqrt{(x^2 + z^2)} \quad (6)$$

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

$$u_1(x, y) = (e^{i\lambda(x+l)} + \text{Re}^{-i\lambda(x+l)}) \frac{\cosh(k(h+y))}{\cosh(kh)} \quad (7)$$

$$u_3(x, y) = T e^{i\lambda(x+l)} \frac{\cosh(k(h+y))}{\cosh(kh)} \quad (8)$$



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

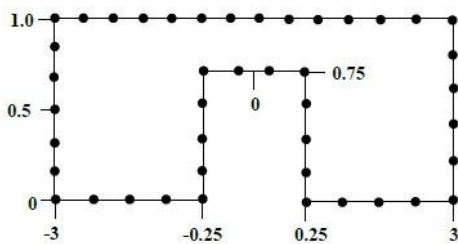
### ۲-۳- مطالعات پارامتری امواج عبوری از موج شکن های

#### مستغرق

در این حالت مطالعه پارامتری بر روی پدیده تفرق امواج تحت تأثیر طول المان ها و نوع آنها و زاویه برخورد امواج انجام شده است. نتایج تحلیل ها برای این حالت در بخش های زیر ارائه می شود.

#### ۲-۳-۱- بررسی تأثیر طول و نوع المان ها

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 می دهد. 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 موج شکن مستغرق.

شکل (۵) تغییرات ارتفاع سطح آب را نسبت به نقاط طولی، در برخورد عمودی امواج و با در نظر گرفتن المان های 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 می دهد، 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 می توان دریافت، نتایج استفاده

$$q^* = \frac{\partial u^*}{\partial n} = -\frac{ki}{4} H_1^{(2)}(kr) \quad (15-b)$$

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 می توان به فرم مبسوط زیر نیز بازنویسی کرد [۸]:

$$\sum_{j=1}^N H^{ij} u^j = \sum_{j=1}^N G^{ij} q^j \quad (16)$$

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

### ۳- شرح مطالعات عددی

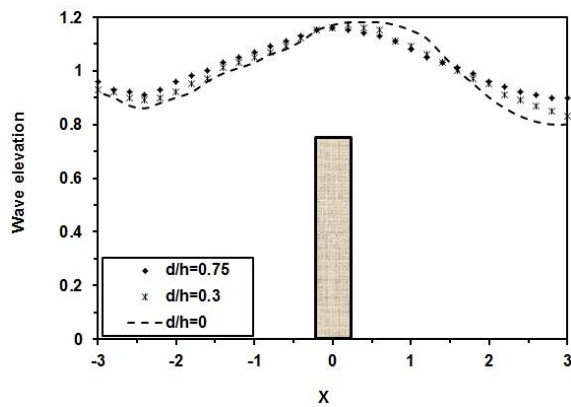
در این پژوهش، برای مطالعه دقیق رفتار امواج عبوری از موج شکن از روش المان مرزی کمک گرفته شده و یک برنامه رایانه ای بر اساس فرمول بندی توسعه داده شده در این مقاله، نوشته شده است. در این بخش، ابتدا صحت و اعتبار نتایج خروجی برنامه تهیه شده بررسی شده و در ادامه به بحث و مطالعات پارامتری در خصوص عبور امواج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

#### ۳-۱- صحت سنجی برنامه برای مدل یک موج شکن شناور

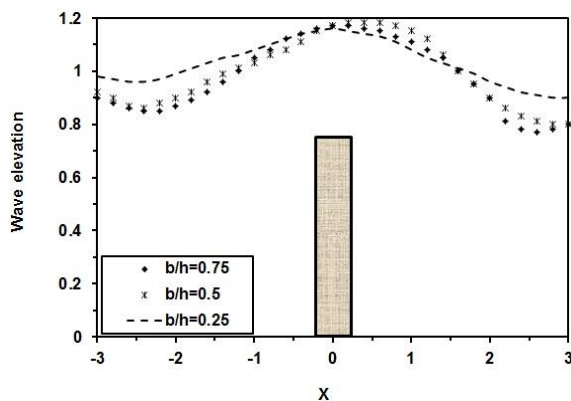
برای صحت سنجی برنامه، از نتایج بررسی آزمایشگاهی چن و همکارانش [۷] و مدل تحلیلی لوسادا و همکارانش [۱۵] استفاده شده و نتایج حاصل از مدل سازی عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه گردید.

موج شکن 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 موج شکن به عمق آب  $(d/h)$  برای تحقیقات مختلف، را نشان می دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می گردد با کاهش عمق نسبی سازه مقدار ضریب عبور موج افزایش پیدا می کند، و همچنین نتایج الگوریتم حاضر در مقایسه با نتایج حل تحلیلی لوسادا و همکارانش [۱۵] به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر است.



الف) عمق های مختلف ( $b/h=0.5$ )



ب) عرض های مختلف ( $d/h=0.75$ )

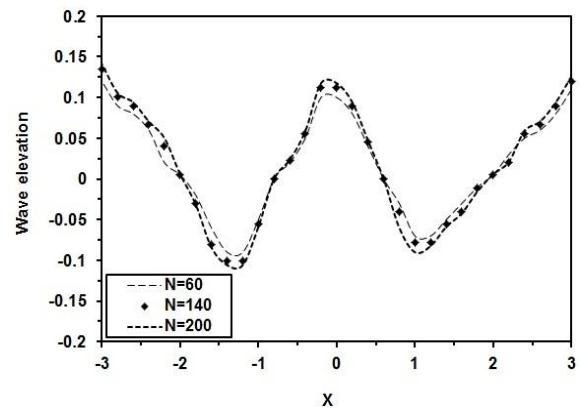
شکل ۶- تغییرات تراز موج برخوردی به موج شکن مستغرق با در نظر گرفتن عرض و ارتفاع های مختلف

### ۳-۲-۲- بررسی تأثیر زاویه برخورد امواج

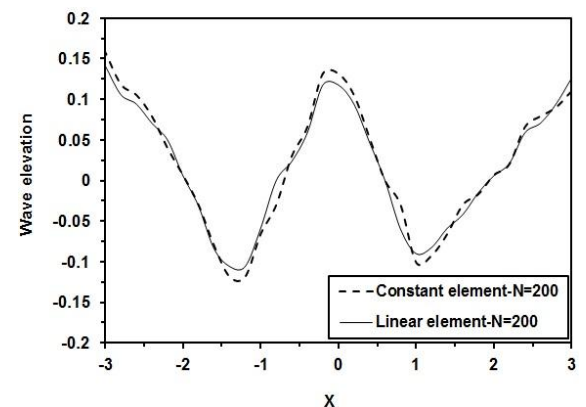
جهت بررسی تأثیر زاویه امواج برخوردی به موج شکن مستغرق زوایای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه نسبت به محور X ها (شکل ۱)، و نسبت های بدون بعد 1،  $b/h=0.5$ ،  $d/h=0.75$  و  $kh=3$  در نظر گرفته شد. جدول (۱) مقادیر ضرایب بازتاب و عبور امواج را نسبت به زاویه برخورد امواج و عرض موج شکن نشان می دهد. همانطور که در جدول مشاهده می شود، با افزایش زاویه برخورد امواج ضریب بازتاب افزایش یافته و از مقدار ضریب عبور امواج کاسته می شود. 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 می کند و شکست امواج بیشتر اتفاق می افتد که نتیجه آن کاهش ضریب عبور امواج است. همچنین با افزایش عرض موج شکن 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 موج شکن ها با عمق های مختلف نشان می دهد.

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 موج شکن مستغرق با در نظر گرفتن المان های ثابت و خطی و انواع مش بندی

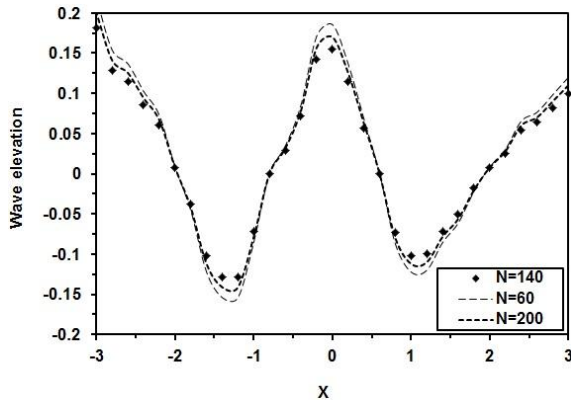
شکل (۶) مقایسه تراز سطح آب در برخورد عمودی امواج به موج شکن های مستغرق با ابعاد مختلف، را نشان می دهد. با مقایسه نمودارها می توان دریافت، با افزایش ارتفاع دیواره موج شکن میزان بازتاب امواج افزایش می یابد و به دنبال آن میزان عبور امواج نیز کاهش پیدا می کند (قسمت الف). همچنین با افزایش عرض موج شکن امواج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

جدول ۱- ضرایب بازتاب و عبور امواج مورب

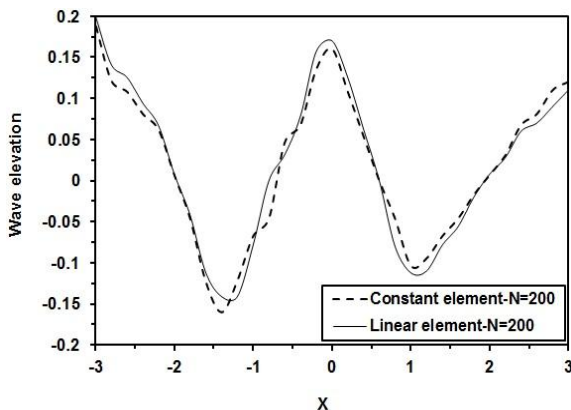
$\theta$	R		T	
	$b/h=0.5$	$b/h=1$	$b/h=0.5$	$b/h=1$
$30^0$	0.312	0.236	0.621	0.743
$50^0$	0.423	0.322	0.522	0.636
$70^0$	0.526	0.411	0.436	0.538

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

در شکل (۸) نحوه مش بندی قلمرو سیال و موج شکن 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 المان های 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 المان های مختلف و برای نسبت های بدون بعد  $kh=2$  و  $d/h=0.75$ ، را نشان می دهد.



الف) طول متغیر المان

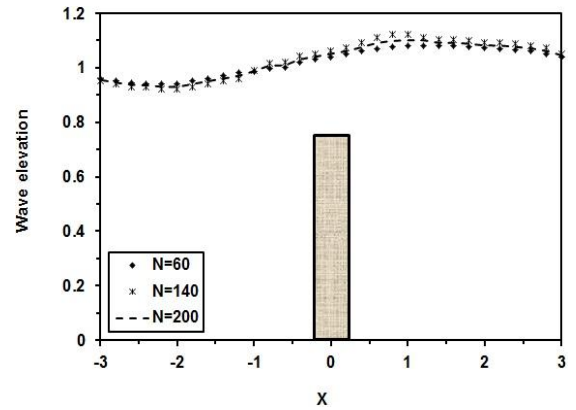


ب) المان ثابت و خطی

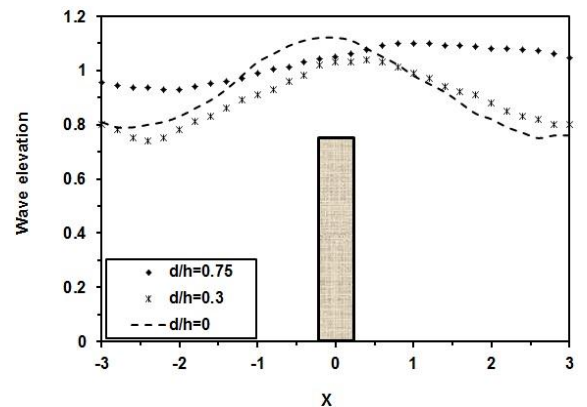
شکل ۹- تغییرات تراز موج برخوردی به موج شکن شناور با در نظر گرفتن المان های ثابت و خطی و انواع مش بندی

با توجه به مقایسه نتایج این قسمت و نتایج شکل (۵) در شرایط مشابه می توان دریافت که در حالت شناوری موج شکن مقدار بازتاب امواج بیشتر از حالت مستغرق است و به تبع آن تغییرات تراز سطح آب بعد از عبور موج از موج شکن 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 المان های ثابت با دقت مناسب استفاده نمود.

همانطور که نتایج نشان می دهد، تغییرات تراز سطح آب تقریباً مستقل از طول المان های مرزی انتخاب شده است.



الف) طول متغیر المان

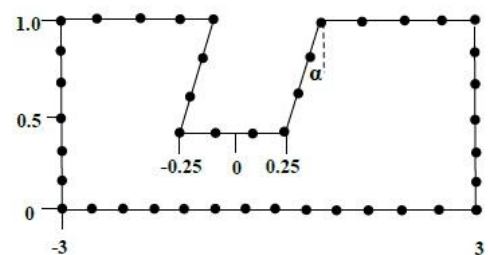


ب) عمق موج شکن

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

### ۳-۳-۲- مطالعات پارامتری امواج عبوری از موج شکن های شناور

در این قسمت به بررسی اثرات پارامترهای مختلف از قبیل عمق شناوری موج شکن و خصوصیات موج تابشی بر پدیده تفرق امواج پرداخته می شود، که نتایج تحلیل ها برای این حالت در بخش های زیر ارائه می شود.



شکل ۸- مدل المان مرزی دو بعدی موج شکن شناور.

*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.

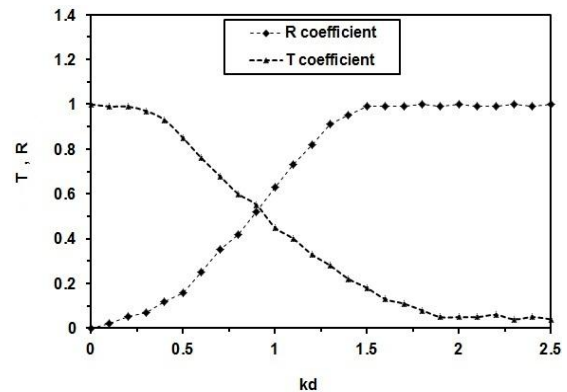
14- Liu, P.L.F. and Abbaspour, M., (1982), *An integral equation method for the diffraction of oblique wave by an infinite cylinder*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 18, p.1497–1504.

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.

### ۳-۲- بررسی تأثیر ابعاد موج شکن و زاویه قرارگیری

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



شکل ۱۰- ضرایب بازتاب و عبور امواج برای عمق های مختلف شناوری موج شکن ( $kh=4.11$ ).

همانطور که از شکل مزبور پیدا است، به صورت کلی می توان 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 موج شکن های صلب شیب دار 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 المان های 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). "شبه 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*