

عملکرد هیدرودینامیکی موج شکنهای شناور ثابت در حضور امواج منظم

الهه کاکاوند^۱، مرتضی کلاهدوزان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

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

* تهران، خیابان حافظ، شماره ۴۲۴

mklhdzan@aut.ac.ir

چکیده- موج شکنهای شناور سازه‌هایی هستند که به منظور ایجاد محیطی آرام و کم تلاطم در کنار سواحل ساخته می‌شوند. هزینه پایین‌تر ساخت، امکان ساخت در شرایط دشوار و سرعت بالای اجرا، از مزایای این موج شکنها نسبت به موج شکنهای ثابت متصل به بستر دریا است. این مزیت‌ها موجب شده که استفاده از این نوع سازه‌ها در بنادر، به‌ویژه در بنادر تفریحی و ماهیگیری رشد چشمگیری داشته باشد. با توجه به اثر موج شکنهای شناور بر شرایط هیدرودینامیکی مناطق مجاور، مطالعه عملکرد آنها در برابر امواج ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، تحلیل جریان سیال با حل دو بعدی معادلات ناویر استوکس آشفته و حل معادله انتقال VOF برای ردیابی سطح آزاد جریان با مدل‌سازی عددی انجام شده است. امواج از نوع منظم انتخاب شده و با برنامه‌نویسی جانبی در نرم‌افزار فلونت تولید شده است. ارزیابی عملکرد موج شکنهای شناور در شکلهای مختلف با بررسی مقادیر ضریب انتقال موج انجام شده است. صحت مدل‌سازی موج شکنهای شناور، با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی موجود، بررسی و تأیید شده است. سپس عملکرد موج شکنهای پانتونی ساده، دوگانه، موج شکن با دیواره کناری مایل و موج شکنهایی که صفحه‌ای نازک و نفوذناپذیر به زیر آنها متصل شده، ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس مدل‌سازیهای انجام شده، عملکرد موج شکنهایی که از اتصال یک صفحه به جلوی آنها ساخته می‌شود، با توجه به افزایش عمق نسبی ناشی از اتصال صفحه، بهتر از موج شکنهای پانتونی ساده است. موج شکنهای دوگانه نیز، به دلیل افزایش استهلاك انرژی، کارایی بالاتری نسبت به موج شکن تک دارند. لیکن موج شکنهای شناور با دیواره کناری مایل با داشتن ضریب انتقال حداقل ۰/۱۵، بالاترین کارایی را در میان دیگر موج شکنهای شناور دارند.

کلید واژگان: موج شکن شناور، موج منظم، مدل عددی، معادلات ناویر استوکس آشفته، VOF، ضریب انتقال.

۱- مقدمه

موج شکنهای شناور به منظور ایجاد محیطی امن و کم تلاطم ساخته شده و جایگزین مناسبی برای موج شکنهای ثابت، به ویژه در بنادر ماهیگیری و تفریحی محسوب می شوند. این نوع موج شکنها - که نسبت به سایر انواع آنها کمترین تأثیرگذاری بر محیط زیست را دارند- در سالهای اخیر به طور گسترده ای استفاده شده اند. عملکرد موج شکن شناور با استفاده از ضریبی به نام ضریب انتقال ارزیابی می شود که نسبت ارتفاع موج عبوری (H_t) از موج شکن به ارتفاع موج تابشی (H_i) ($C_t = \frac{H_t}{H_i}$) است. این ضریب به پارامترهای هندسی، مانند عمق نسبی موج شکن (نسبت عمق آبخور به عمق آب (dr/d)) و نسبت طول موج شکن در راستای تابش موج به طول موج تابشی (B/L) بستگی دارد. مطابق نتایج به دست آمده از مطالعات گذشته، افزایش این پارامترها موجب کاهش ضریب انتقال و افزایش کارایی موج شکن شناور می شود.

مطالعه تحلیلی موج شکنهای شناور، مدل سازی عددی و مدل سازی آزمایشگاهی موج شکن مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. Bruce و McCartney در سال ۱۹۸۵ موج شکنهای شناور را با توجه به جنس مصالح، محدودیتهای آنها و ملاحظات طراحی طبقه بندی کردند. آنها همچنین تغییرات ضریب انتقال موج (C_t) را نسبت به B/L در موج شکنهای شناور با شکل های مختلف به شکل بردارهایی ارائه کردند (Koutandos, 2005).

Lighthill در سال ۱۹۸۶ ایده ای را ارائه کرد که در آن نیروی وارد شده از طرف موج به سازه های دور از ساحل، متشکل از دو نیروی ناشی از وجود چرخابه های جریان و نیروی ناشی از جریان پتانسیل فرض شده است.

Isaacson در سال ۱۹۹۳، راهکارهایی کلی برای طراحی موج شکنهای شناور ارائه داد (Koutandos, 2005).

مدل های ریاضی مختلفی برای حل جریان در اطراف موج شکنهای شناور ارائه شده است. Isaacson (۱۹۸۲) نوعی مدل عددی را که بر تئوری پتانسیل و معادلات حرکت جسم صلب بنا شده برای بررسی رفتار جریان در اطراف موج شکن شناور استفاده کرد. Natale و Fugazza (۱۹۸۸) با استفاده از ترکیب خطی معادلات حل شده، نوعی راه حل را ارائه کردند که ترکیبی از معادلات حرکت جسم و معادلات تفرق موج به منظور کاهش خطاهای موجود در محاسبات، بود. McDougal و Williams در سال ۱۹۹۶ نوعی مدل دو بعدی را ارائه کرده و با استفاده از آن موج شکنهای شناور با مقطع مربع را مطالعه کردند. در این مدل مهارکننده ها به شکل فنرهایی مدل سازی شدند. Williams و Abul-Azm (۱۹۹۷) عملکرد جفت موج شکنهای پانتونی شناور را با به کارگیری تئوری پتانسیل و با استفاده از روش معادلات انتگرال مرزی بررسی کردند. Kriezi و همکاران (۲۰۰۱) نوعی مدل خطی پراکنندگی^۱ را بر مبنای تئوری بوسینسک ارائه کردند که در آن ویژگیهای موج قبل و پس از برخورد به سازه مطالعه شده است. Koutandos (۲۰۰۴) اندرکنش موج و موج شکن شناور را با استفاده از معادلات بوسینسک و معادلات تئوری پتانسیل بررسی کرد.

همچنین مطالعات آزمایشگاهی مختلفی به منظور بررسی عملکرد موج شکنهای شناور انجام شده که از آن میان می توان به آزمایشهای علی یاری و همکاران (۱۳۸۶)، Jung و همکاران (۲۰۰۴ و ۲۰۰۵)، Koutandos و همکاران (۲۰۰۵)، Koftis و همکاران (۲۰۰۶)، بهزاد و اکبری (۲۰۰۷)، Dong و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. Koutandos و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از مدل های آزمایشگاهی، ضرایب انتقال، انعکاس و پخش انرژی موج

1. Dispersion

آزمایشگاهی مدل‌سازی کردند. آنها از مدل SOLA-VOF برای مدل‌سازی عددی استفاده کردند. Koftis و همکاران (۲۰۰۶) نیز آزمایشهایی را بر روی موج‌شکنهای ثابت با و بدون در نظر گرفتن صفحاتی در جلوی موج‌شکن انجام دادند. موج در نظر گرفته شده در این آزمایشها، موج منظم است که با دوره‌های تناوب متفاوتی به موج‌شکن شناور برخورد می‌کند. Koftis و همکاران علاوه بر مدل‌سازی آزمایشگاهی جریان در اطراف موج‌شکنهای شناور، با استفاده از مدل عددی COBRAS، جریان را در اطراف موج‌شکنها مدل‌سازی کردند. این مدل با حل عددی معادلات ناویر استوکس و آشفتگی $\kappa - \epsilon$ به صورت دو بعدی قائم، مشخصات هیدرودینامیکی جریان در اطراف موج‌شکنها را مدل‌سازی می‌کند. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، تطابق خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است

در تحقیق حاضر، شرایط هیدرودینامیکی جریان در اطراف موج‌شکنهای شناور ثابت با شکل‌های مختلف به کمک نرم‌افزار فلونتت مطالعه شده است. این مدل - که در حالت کلی توانایی مدل‌سازی سه‌بعدی جریان را نیز دارد - برای مقاصد طراحی در این تحقیق، به یک مدل عددی دو بعدی قائم کاهش یافته که در آن معادلات ناویر استوکس همراه با معادلات $\kappa - \epsilon$ جریانهای آشفتنه حل شده‌اند. از آنجا که در نرم‌افزار فلونتت امکان معرفی مستقیم موج وجود ندارد، لذا به منظور تولید موج، از برنامه‌ای جانبی به زبان C که به مدل فلونتت اضافه شده، استفاده شده است. به کمک این برنامه جانبی، مدل فلونتت توانایی در نظر گرفتن امواج مختلف را در مرزهای محیط خواهد داشت.

موج‌شکنهای مورد بررسی مشتمل است بر: موج‌شکنهای پانتونی ساده، دوگانه، موج‌شکن با دیواره کناری مایل و

را پس از عبور از موج‌شکن‌های شناور در آبهای کم عمق و با عمق متوسط محاسبه کردند. در این مطالعات، موج‌های منظم و نامنظم با دوره‌های تناوب متفاوت تولید شده و با در نظر گرفتن نسبت‌های متفاوتی از طول موج‌شکن به طول موج (B/L) و عمق آب‌خور موج‌شکن به عمق آب (d/r/d)، نتایج به دست آمده به شکل بردارهایی ارائه شده است. موج‌شکنهای شناور که از نوع پانتونی است، در چهار حالت مختلف مطالعه شد: موج‌شکن ثابت، موج‌شکن با حرکت در راستای قائم، موج‌شکن ثابت که صفحه‌ای نازک از نوع نفوذپذیر و نفوذناپذیر در جلوی آن قرار گرفته و موج‌شکن ثابت که به شکل دوتایی و با فاصله مشخصی از یکدیگر قرار گرفته‌اند.

تقریب‌های در نظر گرفته شده در حل تئوری جریان سیال و هزینه بالای مدل‌سازی آزمایشگاهی، محققان را به استفاده از مدل‌های عددی مبتنی بر حل معادلات ناویر استوکس واداشته است. در این راستا، مدل‌های عددی مختلفی تهیه شده و جریان در اطراف موج‌شکنهای شناور و موج‌شکنهای با درجات آزادی مختلف بررسی شده است. Hadzic و همکاران (۲۰۰۵)، مشخصات هیدرودینامیکی جریان در اطراف جسم شناور را با استفاده از مدل عددی Comet بررسی کردند. این مدل با استفاده از روش شبکه‌های متحرک و به کمک معادلات با سه درجه آزادی، جابه‌جایی موج‌شکن شناور را در برخورد با تک موج تولید شده، محاسبه کرده است. پناهی و همکاران (۲۰۰۶) توانستند با ارائه نوعی مدل عددی، جریان اطراف جسم شناور را در دو وضعیت شناور ثابت و شناور با دو درجه آزادی مدل‌سازی کنند. در این مطالعه، سرعت برخورد آب با جسم شناور ثابت در نظر گرفته شده است. رحمان و همکاران (۲۰۰۶) موج‌شکن شناور پانتونی مهار شده را به صورت عددی و

انتقال نسبت حجمی سیال (معادله ۳) در هر گام زمانی، سطح آزاد جریان ردیابی می شود.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

۳- تولید موج

تولید موج در این تحقیق، از معرفی پروفیل سرعت در ابتدای کانال -که با استفاده از برنامه جانبی C الحاق شده به نرم افزار فلونت صورت می پذیرد- انجام شده است. پروفیل سرعت در ابتدای کانال بر اساس تئوری موج خطی -که نخستین بار توسط Airy در سال ۱۸۴۵ ارائه شد- در نظر گرفته شده است. جابه جایی سطح آزاد جریان در ابتدای کانال بر مبنای محاسبات جریان در گام زمانی قبل انجام می شود. امواج در نظر گرفته شده در این مطالعه، موج پیشرونده کسینوسی است که تغییرات تراز سطح آب در آن به شکل زیر معرفی شده است (Dean and Darlymple, 1964).

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx + \omega t) \quad (4)$$

که در آن $\omega = \frac{2\pi}{T}$ فرکانس زاویه ای و $k = \frac{2\pi}{L}$ عدد موج است. سرعت های افقی و عمودی ذرات موج به شکل زیر توصیف می شود (Dean and Darlymple, 1964):

$$u(x, y, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{gAk \cosh k(z+d)}{\omega \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

$$v(x, y, t) = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{gAk \sinh k(z+d)}{\omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

۴- مدل سازی عددی

در این تحقیق عملکرد موج شکنهای شناور با شکل های مختلف و تحت تأثیر پارامترهای هندسی مختلف با مقایسه ضرایب انتقال به دست آمده از مدل سازی عددی ارزیابی شده است. موج شکنهای مورد بررسی، مشتمل است بر: موج شکنهای پانتونی ساده، موج شکنهای دوگانه، موج شکنهایی که یک صفحه نفوذناپذیر به جلوی آنها

موج شکنهایی که صفحه ای نفوذناپذیر به جلوی آنها متصل شده است. صحت سنجی مدل سازی عددی موج شکنهای شناور با مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی و داده های آزمایشگاهی موجود انجام شده است.

۲- معادلات حاکم بر جریان

جریان سیال تراکم ناپذیر لزج با استفاده از معادله های پیوستگی و ممتم به شکل معادله های ۱ و ۲ توصیف می شود (Li and Lam, 1964):

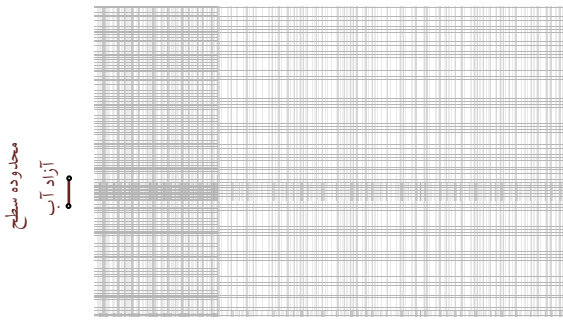
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (2)$$

که در آن $i, j = 1, 2, 3$ برای جریانهای سه بعدی و نشان دهنده سه جهت مختلف x, y و z است. \bar{u}_i -امین جزء بردار سرعت، \bar{p} فشار در هر نقطه از سیال، g_i -امین جزء شتاب گرانشی، ν و ρ به ترتیب لزجت و جرم مخصوص سیال است. پارامتر $\overline{u_i' u_j'}$ تنشهای رینولدزی است که بر سیال عمل کرده و اثر گردابه های آشفتگی را در نظر می گیرد. تعیین تنشهای رینولدزی در اینجا با استفاده از روش $\kappa - \epsilon$ انجام شده است (Rodi, 1980).

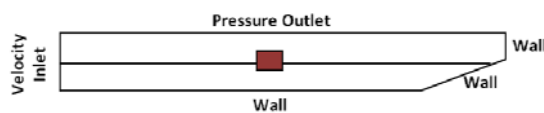
پیش بینی سطح آزاد آب به روش انتقال نسبت حجمی سیال (VOF) انجام شده است (Hirt and Nichols, 1981). در این روش از تابع متغیر α استفاده می شود که بیانگر نسبت حجم آب در هر سلول محاسباتی است. اگر α برابر ۱ باشد، بدین معنا است که سلول پر از آب است و اگر برابر صفر باشد، نشان دهنده پر بودن سلول از هوا است. در صورتی که درصدی از سلول آب و درصدی دیگری هوا باشد، α بین صفر و یک است و در حقیقت سطح آزاد جریان از آن سلول عبور می کند. با حل معادله

از حالت‌های فوق، گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه به‌عنوان مناسبترین گام زمانی انتخاب شد. انتخاب مناسبترین ابعاد شبکه‌های محاسباتی و آرایش آنها نیز با مدل‌سازی کانال با انواع متفاوت شبکه‌بندی انجام شده است (کاکاوند، ۱۳۸۹).



شکل ۲ شبکه‌بندی میدان جریان در ابتدای کانال

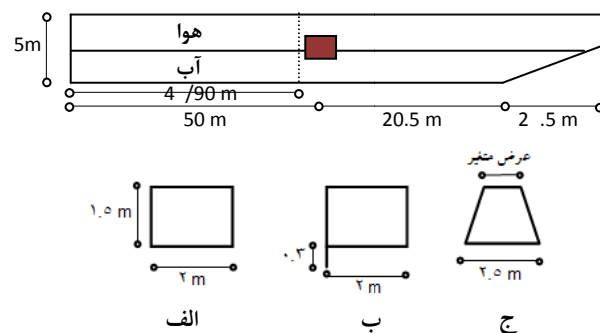
شرایط مرزی جریان، به‌صورت پروفیل سرعت (velocity) (inlet) در ابتدای کانال، فشار آزاد اتمسفر (pressure) (outlet) در بالا و دیواره بسته (wall) در انتها و کف کانال است. پروفیل سرعت در مرز ورودی کانال با استفاده از برنامه‌نویسی جانبی نرم‌افزار فلونت که به اختصار UDF خوانده می‌شود، تهیه و به مدل معرفی شده است. دیواره‌های موج‌شکن شناور نیز دیواره در نظر گرفته شده که در این مرز شرط عدم لغزش اعمال می‌شود (راهنمای نرم‌افزار فلونت، ۲۰۰۶). شکل ۳ شرایط مرزی را در کانال نشان می‌دهد.



شکل ۳ شرایط مرزی در میدان محاسباتی

همان‌طور که اشاره شد، انتخاب سطح شیب‌دار در انتهای کانال به‌منظور کاهش انعکاس موج از انتهای کانال بوده است. لیکن با توجه به اینکه استهلاک موج در انتهای

متصل شده و موج‌شکن با دیواره کناری مایل. کانال مورد بررسی در این مطالعه، بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط Koutandos در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه کاتالونیای بارسلونا دارای طول برابر، ۱۰۰ متر، ارتفاع برابر ۵ متر و عمق اولیه آب برابر ۲ متر است. انتهای کانال به‌منظور جذب انرژی موج به‌صورت شیب‌دار در نظر گرفته شده است. کانال تولید موج و موج‌شکنهای شناور مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ کانال تولید موج و موج‌شکنهای شناور مورد مطالعه (Koutandos et al., 2005)

شبکه‌بندی کانال برای دستیابی به موجی با دقت مناسب مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. دقت شبیه‌سازی سطح آزاد جریان، با در نظر گرفتن شبکه‌های ریزتر در نزدیکی سطح آزاد نسبت به سایر نقاط کانال، افزایش یافته است. کانال مورد مطالعه به‌شکل ساختاریافته و با استفاده از نرم‌افزار Gambit2.3.16 شبکه‌بندی شده است. حل معادلات حاکم با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه انجام شده است. انتخاب مناسب‌ترین ابعاد شبکه و گام زمانی تحلیل جریان بر مبنای مقایسه ابعاد مختلف و گامهای زمانی متفاوت با یکدیگر انجام شده است. در این راستا گامهای زمانی ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ ثانیه انتخاب شده و تحلیل موج با در نظر گرفتن این گامهای زمانی انجام شده است. در پایان با مقایسه نتایج سطح آزاد آب در هر یک

به ترتیب برابر $2/04$ ، $2/79$ و $3/35$ ثانیه است. نسبت عمق جریان به طول موج تابشی (d/L) به ترتیب برابر $0/32$ ، $0/19$ و $0/15$ است که در دسته امواج آبهای متوسط قرار می‌گیرند. شکل ۴ مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تطابق نتایج حاصل از اجرای مدل‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی، نشان‌دهنده درستی مدل‌سازی انجام شده است. کمترین درصد خطای نسبی مدل‌سازی عددی برابر $0/07$ و بیشترین آن برابر $16/4$ درصد است. در شکل ۵ تغییر سرعت افقی و عمودی در عمق کانال در موقعیت $48/90$ متر از آغاز کانال یعنی 10 سانتی‌متر بالاتر از موج‌شکن شناور (مقطع نشان داده شده به صورت نقطه چین در شکل ۱) در یک دوره تناوب موج نشان داده شده است. اثر وجود موج‌شکن بر توزیع سرعتها در این نقطه که در سمت دریا قرار گرفته دیده می‌شود، که در آن وجود موج‌شکن موجب افزایش سرعت‌های افقی و عمودی در عمقی از آب شده است که موج‌شکن در آن قرار گرفته، شکل ۶ منحنی‌های هم‌تراز سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی را در گوشه موج‌شکن در سمت دریا و در زمان 40 ثانیه نشان می‌دهد. حداکثر سرعت جریان در این نقطه برابر $0/46$ متر بر ثانیه و در سمت مقابل آن یعنی رو به ساحل برابر $0/1$ متر بر ثانیه است. مقایسه این مقادیر نشان‌دهنده کاهش بیش از 50 درصدی سرعت به دلیل حضور موج‌شکن است. مقایسه مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی (k) در دو سمت موج‌شکن بیانگر تفاوت بسیار زیاد این پارامتر به دلیل حضور موج‌شکن است، به طوری که مقدار k در زیر موج‌شکن و در سمت دریا برابر $0/0015 m^2/s^2$ و در سمت ساحل برابر $0/035 m^2/s^2$ است.

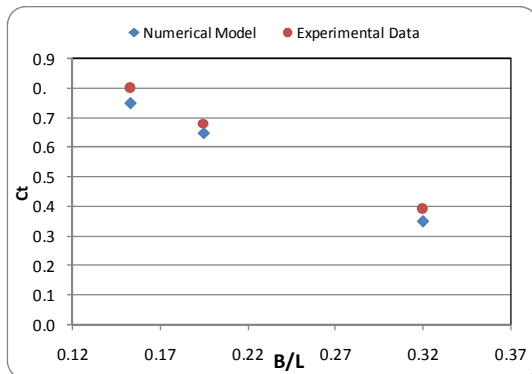
شیب‌دار به صورت کامل صورت نگرفته و همواره بخشی از موج منعکس می‌شود، انتخاب بهینه زمان خواندن سطح آزاد آب در دو سمت موج‌شکن و محاسبه ضریب انتقال موج، اهمیت بالایی دارد، طوری که موج بازتابش شده از انتهای کانال با موج تابشی تداخل نیابد. تحلیل جریان در نرم‌افزار فلونت بر پایه روش حجم محدود^۱ انجام می‌شود. حل معادلات جریان به صورت غیرماندگار و با استفاده از الگوریتم زمانی غیرتکراری^۲ انجام شده است. برای گسسته‌سازی بخش انتقالی معادلات حاکم از روش بالادستی مرتبه دوم^۳ و برای گسسته‌سازی معادله فشار از الگوریتم PERESTO و برای مرتبط کردن عبارات‌های سرعت و فشار از الگوریتم گامهای جزئی^۴ استفاده شده است. الگوریتم PERESTO معادله فشار را در شبکه‌های جابه‌جا شده^۵ گسسته‌سازی می‌کند. الگوریتم گامهای جزئی مناسبترین الگوریتم ارتباطی معادلات سرعت و فشار است که در ترکیب با الگوریتم زمانی غیرتکراری به کار می‌رود (راهنمای نرم‌افزار فلونت، ۲۰۰۶). مدل آشفتگی به کار رفته در این مطالعه، مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ استاندارد است.

۵- تحلیل نتایج

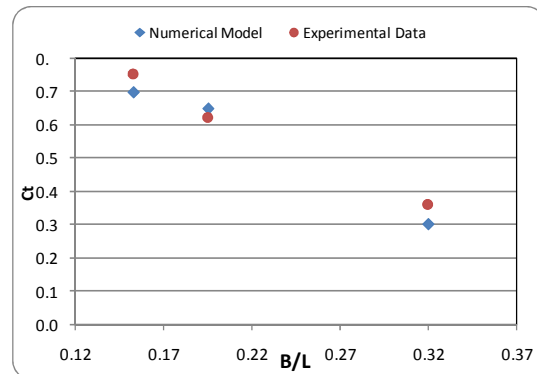
۵-۱- موج‌شکن پانتونی ساده

مدل‌سازی مشخصات هیدرودینامیکی جریان اطراف موج‌شکنهای شناور پانتونی ساده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود (Koutandos et al., 2005) با سه عمق نسبی (dr/d)، برابر $0/2$ ، $0/25$ و $0/325$ و نسبت طول موج‌شکن به طول موج تابشی (B/L) برابر $0/32$ ، $0/19$ و $0/15$ انجام شده است. دوره تناوب موج‌ها

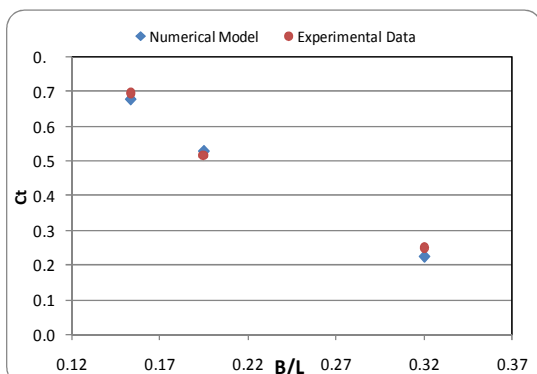
1. Finite Volume Method
2. Non-Iterative Time-Advancement
3. Second Order Upwind
4. Fractional Step Method
5. Staggered Control Volume



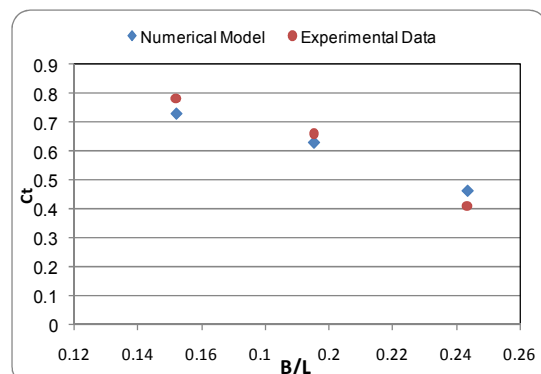
H=0.2 و dr/d=0.2



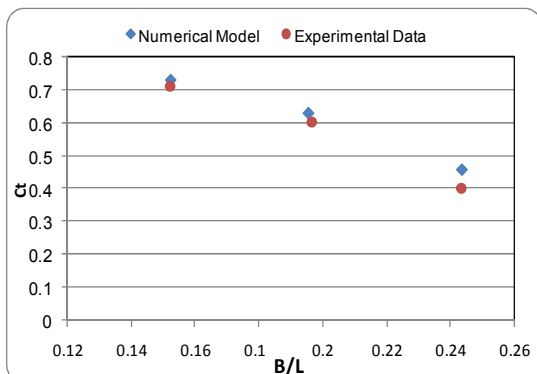
H=0.2 و dr/d=0.25



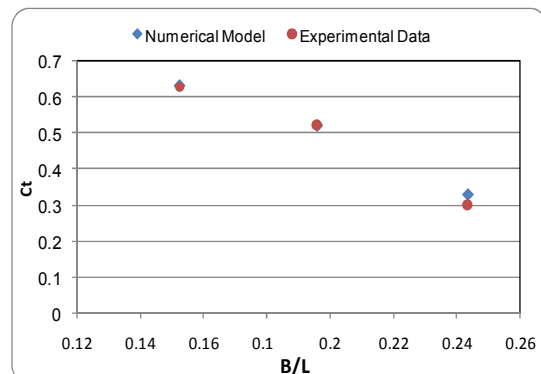
H=0.2 و dr/d=0.325



H=0.3 و dr/d=0.2



H=0.3 و dr/d=0.25



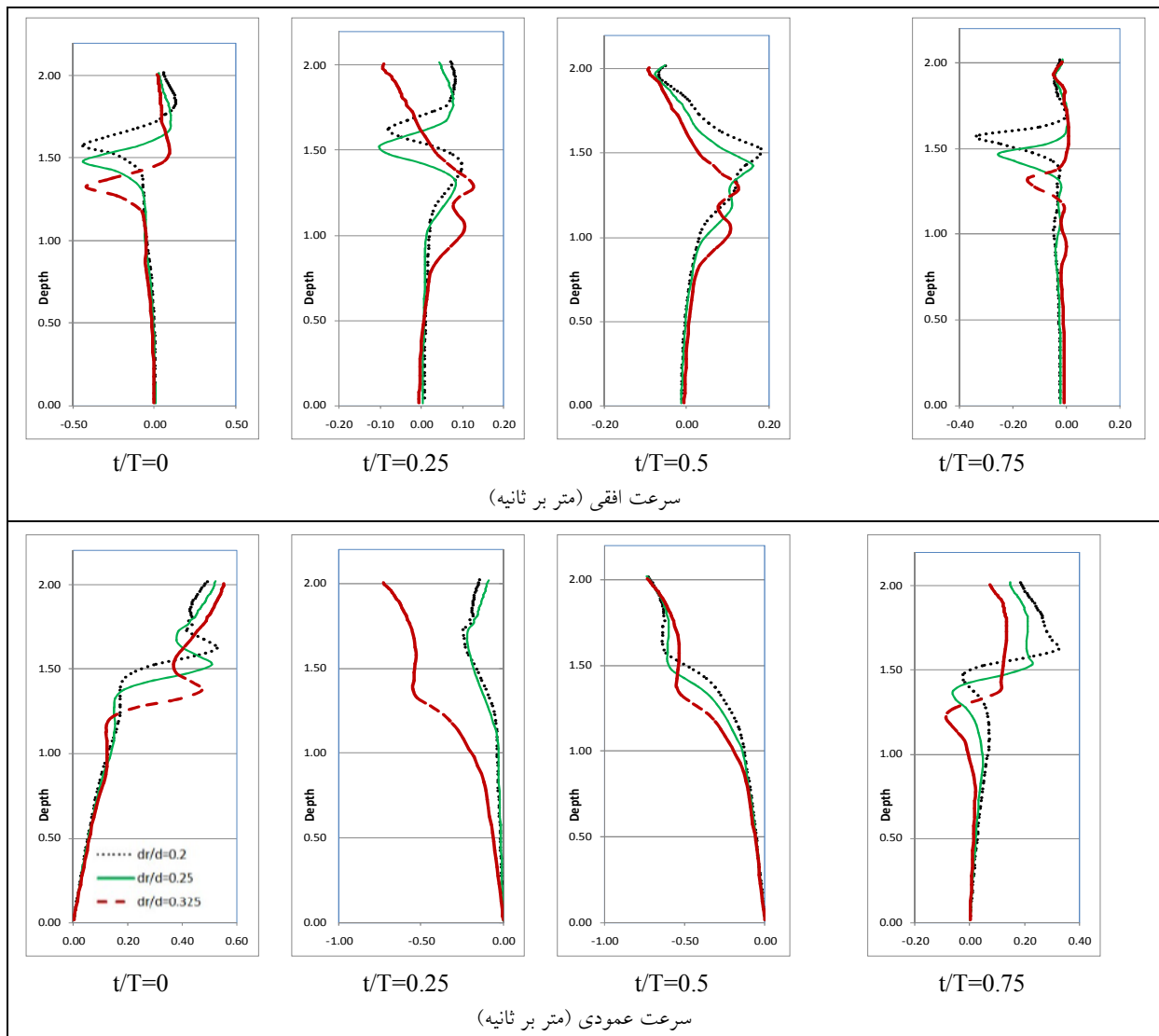
H=0.3 و dr/d=0.325

شکل ۴ مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی موج‌شکنهای شناور پانتونی ساده

حقیقت با توجه به اینکه در موج‌شکنهای شناور استهلاک انرژی و تشکیل گردابه‌های آشفتگی در زیر موج‌شکن و در قسمت جلوی آن اتفاق می‌افتد، از این رو قرار دادن یک صفحه در این ناحیه، استهلاک انرژی را به اندازه قابل توجهی افزایش خواهد داد.

۵-۲- نفوذناپذیر متصل به جلوی آن

اتصال صفحه‌ای نازک در بخش جلویی موج‌شکنهای پانتونی ساده موجب افزایش عمق نسبی موج‌شکن می‌شود و انتظار می‌رود که با افزایش عمق نسبی، ضریب انتقال آن نسبت به موج‌شکن بدون صفحه کاهش یابد. در



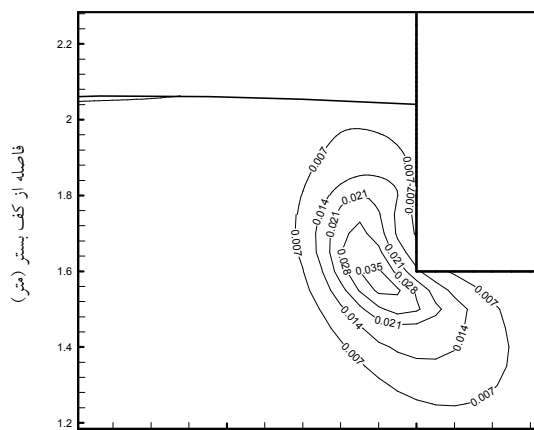
شکل ۵ توزیع سرعت های افقی و عمودی در عمق در موقعیت ۱۰ سانتیمتر بالاتر از موج شکن شناور با اعماق نسبی مختلف

تطابق نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی که در شکل ۷ نشان داده شده، بیانگر صحت مدل سازی است. به منظور بررسی اثر اتصال یک صفحه نازک در جلوی موج شکن، ضرایب انتقال این موج شکنها با ضرایب انتقال موج شکنهای پانتونی ساده در عمق نسبی یکسان ($dr/d=0.25$) مقایسه شده و نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است. دیده می شود که ضرایب انتقال دو موج شکن پانتونی ساده و موج شکن با صفحه نازک در جلوی آن تقریباً با یکدیگر برابر بوده و این بیانگر اثر مثبت

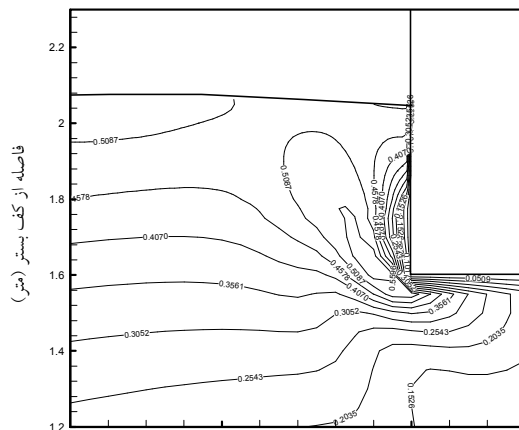
این مسأله با مدل سازی موج شکنهای شناور به صورت شکل ۱-ب تحقیق شده و نتایج حاصل از مدل سازی عددی با داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط Koutandos (۲۰۰۵) مقایسه شده است. در این آزمایشها عمق نسبی اولیه موج شکنها برابر ۰/۱ است که با قرار دادن صفحه ای نازک با ضخامت ۵ سانتی متر و طول ۰/۳ متر به ۰/۲۵ می رسد. در این حالت عمق آبخورد موج شکن برابر ۰/۵ متر است.

یافته است. شکل ۸ بردارهای سرعت را در اطراف صفحه نازک متصل به زیر موج شکن نشان می دهد. اغتشاش ایجاد شده در این نقطه به وضوح مشاهده می شود. در این حالت انرژی جنبشی آشفتگی (k) تا $0.4 m^2 / s^2$ افزایش یافته است، به طوری که انرژی جنبشی آشفتگی در مدل بدون صفحه و با عمق نسبی یکسان برابر $0.3 m^2 / s^2$ است.

افزایش عمق نسبی با استفاده از صفحه نازک است. زیرا همان طور که گفته شد، افزایش عمق نسبی موج شکن شناور با صفحه اضافه شده در جلوی آن، با افزایش فرورفتگی جسم شناور در آب صورت نگرفته و فقط بدلیل وجود صفحه است. یعنی فرو رفتگی جسم شناور در آب در حالت با صفحه اضافه شده کمتر از فرورفتگی جسم شناور بدون صفحه بوده و عمق نسبی موج شکن فقط بر اثر وجود صفحه افزایش



فاصله از ابتدای کانال (متر)

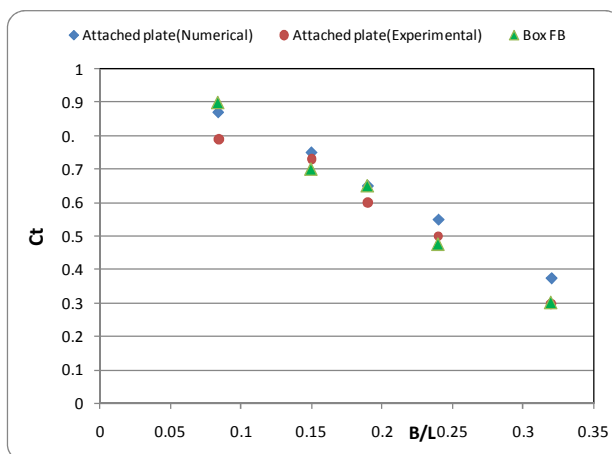


فاصله از ابتدای کانال (متر)

ب) منحنی های هم تراز انرژی جنبشی (m^2 / s^2)

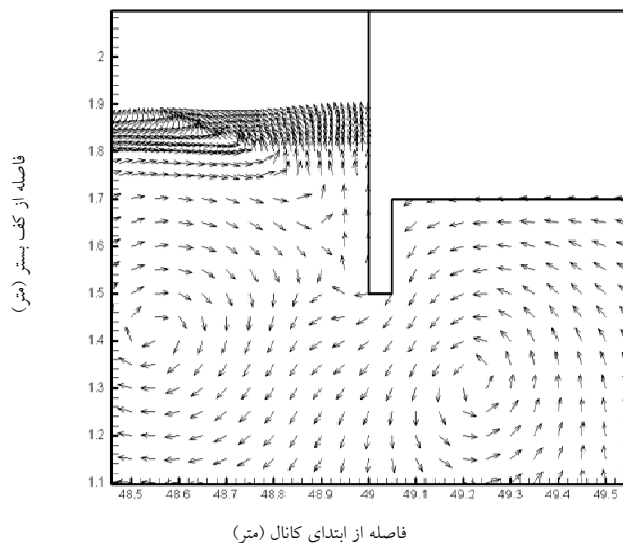
الف) منحنی های هم تراز سرعت جریان (متر بر ثانیه)

شکل ۶ منحنی های هم تراز سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی در گوشه موج شکن در سمت دریا ($t=40$ ثانیه)



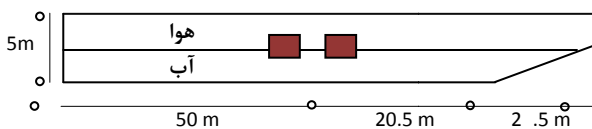
شکل ۷ مقایسه نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی موج شکنهایی با صفحه اتصال یافته به جلوی آنها

با موج شکنهای پانتونی ساده در عمق نسبی ۰/۲۵



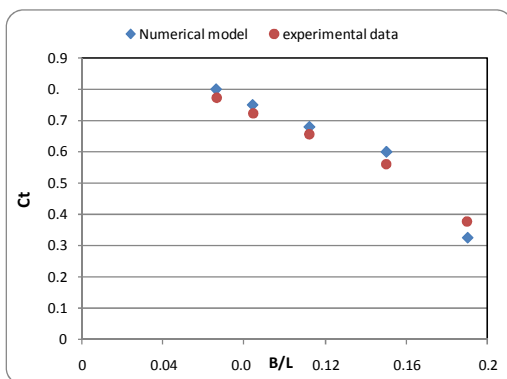
فاصله از ابتدای کانال (متر)

شکل ۸ بردارهای سرعت در اطراف صفحه نازک نفوذناپذیر اضافه شده به جلوی موج شکن



شکل ۹ قرارگیری موج شکنهای شناور دوگانه

در کنار یکدیگر



شکل ۱۰ مقایسه نتایج مدل سازی عددی و داده های

آزمایشگاهی موج شکنهای دوگانه

عمق نسبی موج شکنها در تمامی آزمایشهای عددی برابر ۰/۲۵ است. تطابق نتایج مدل سازی عددی و داده های

صرفه جویی در مصرف مصالح در ساخت این موج شکنها می تواند آنها را جایگزین مناسبی برای موج شکنهای شناور پانتونی ساده قرار دهد.

۳-۵- موج شکنهای شناور دوگانه

در صورتی که از دو موج شکن شناور به فاصله مشخصی از یکدیگر استفاده شود، کارایی موج شکنها افزایش یافته و ضریب انتقال آنها کاهش خواهد یافت. چگونگی قرارگیری موج شکنهای دوگانه در کانال در شکل ۹ نشان داده شده است. به منظور بررسی کارایی موج شکنهای دوگانه، آزمایشهای عددی مختلفی بر اساس نتایج آزمایشگاهی Koutandos (2005) انجام شده و نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است.

ابعاد هر یک از موج شکنهای مورد بررسی در شکل ۱- الف مشخص شده و فاصله بین آنها برابر ۹/۵ متر در نظر گرفته شده است. امواج تابیده شده با پنج مقدار متفاوت دوره تناوب از ۲/۷۹ تا ۷ ثانیه و ارتفاع ۰/۲ متر است.

علی‌رغم عملکرد مناسب این نوع موج‌شکنهای شناور، هزینه بالای ساخت آنها موجب شده تا استفاده از آنها به‌عنوان گزینه مطرح در ساخت موج‌شکنهای شناور در نظر گرفته نشود.

جدول ۱ مقایسه ضرایب انتقال موج‌شکنهای تک و دوگانه

B/L	دوره تناوب موج (ثانیه)	موج‌شکن دوگانه	موج‌شکن تک	درصد نسبی اختلاف
۰/۱۹	۲/۷۹	۰/۳۲۵	۰/۶	۰/۹۵
۰/۱۵	۳/۳۵	۰/۶	۰/۷۵	۰/۲
۰/۰۸۴	۵/۶	۰/۷۵	۰/۸۳	۰/۱
۰/۰۶۶	۷/۰۵	۰/۸	۰/۸۵	۰/۰۶

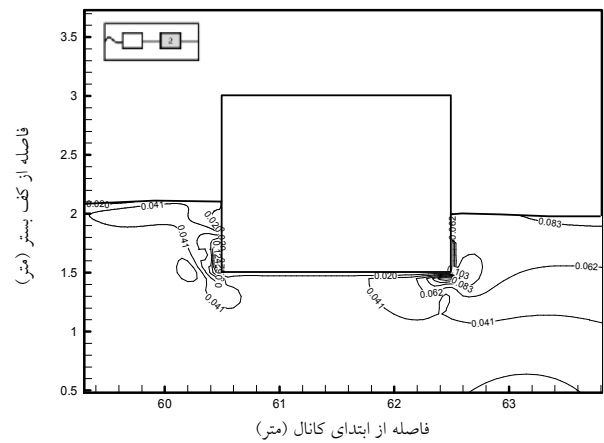
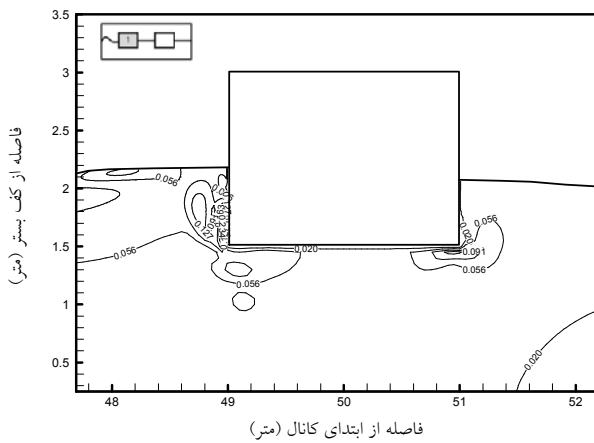
۵-۴- موج‌شکنهای با دیواره کناری مایل

در این قسمت عملکرد موج‌شکن شناور با کناره‌های شیبدار بررسی شده و نتایج حاصل با نتایج مدل‌سازی موج‌شکن شناور پانتونی ساده در شرایط یکسان مقایسه شده است. ابعاد موج‌شکن در شکل ۱-ج نشان داده شده است.

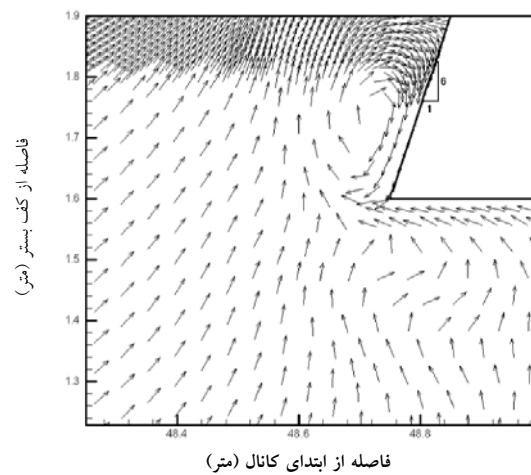
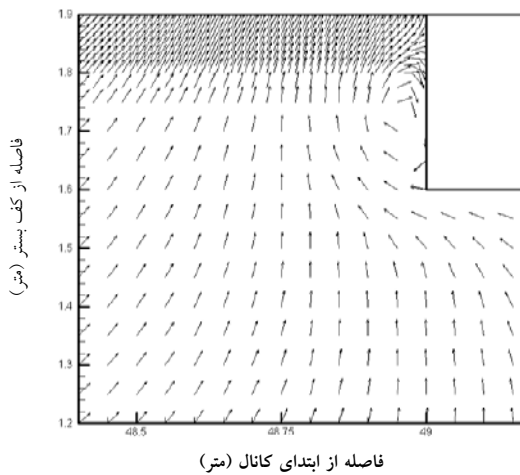
شبکه‌بندی اطراف موج‌شکن به دلیل وجود سطح شیبدار از نوع غیرساختاریافته است، اما شبکه‌بندی میدان جریان در سایر نقاط کانال از نوع ساختاریافته است. موج تابیده شده به موج شکنهای مایل، دارای دوره تناوب ۲/۰۴ ثانیه و طول موج ۶/۲۸ متر است. ضریب انتقال این موج‌شکنها در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه ضریب انتقال این موج‌شکن با موج‌شکن پانتونی ساده در شرایط یکسان، بیانگر افزایش کارایی موج‌شکن در برابر امواج است. همچنین نتایج مدل‌سازی‌های عددی بیانگر کاهش ضریب انتقال در نتیجه افزایش شیب کناره‌ها است، به طوری که ضریب انتقال موج‌شکن با شیب دیواره ۱۷ درصد برابر ۰/۲۲۵ و با شیب ۶۷ درصد برابر ۰/۱۵ است. شکل ۱۲ بردارهای سرعت در اطراف این نوع موج‌شکنها را در مقایسه با موج‌شکنهای ساده نشان می‌دهد.

آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۱۰ بیانگر صحت مدل‌سازی عددی است. تأثیر مثبت افزایش B/L بر کارایی موج‌شکنهای دوگانه در این شکل نیز دیده می‌شود، به طوری که با افزایش این نسبت، مقادیر ضریب انتقال کاهش یافته است.

به‌منظور مقایسه کارایی دو موج‌شکن تک و دوگانه با یکدیگر، نتایج مدل‌سازی این دو نوع موج‌شکن در عمق نسبی یکسان و در برابر امواج با ویژگی‌های مشابه در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسه ضرایب انتقال دو نوع موج‌شکن بیانگر عملکرد بهتر موج‌شکنهای دوگانه است و این نتیجه با توجه به وجود دو موج‌شکن در مسیر حرکت موج و استهلاک بیشتر انرژی قابل پیش‌بینی بود. کمترین مقدار ضریب انتقال این نوع موج‌شکنها در برابر امواجی با دوره تناوب ۲/۷۹ ثانیه به دست آمده که این در مقایسه با مقدار متناظر برای موج‌شکن ساده، ۴۶ درصد کاهش یافته است. استهلاک انرژی در موج‌شکنهای شناور دوگانه را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: (۱) استهلاک انرژی در منطقه موج‌شکن اول (۲) استهلاک انرژی در منطقه بین دو موج‌شکن (۳) استهلاک انرژی در منطقه موج‌شکن دوم. استهلاک انرژی در مناطق ۱ و ۳ ناشی از تشکیل چرخابه‌های جریان در این مناطق است؛ اما در محدوده میان دو موج‌شکن، ناشی از شکست موجی است که به دلیل برخورد موج و موج‌های برگشتی بین دو موج‌شکن روی می‌دهد. در شکل ۱۱ منحنی‌های هم‌تراز سرعت در اطراف هر یک از موج‌شکنها نشان داده شده است. مقدار حداکثر سرعت در گوشه موج‌شکن اول برابر ۰/۵۲ متر بر ثانیه است که این مقدار در نقطه متناظر موج‌شکن دوم به ۰/۴۲ کاهش یافته است. کاهش انرژی جنبشی آشفتگی نیز از مقدار $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ در گوشه موج‌شکن اول به مقدار $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ در گوشه موج‌شکن دوم است.



شکل ۱۱ منحنی های هم تراز سرعت در اطراف موج شکنهای شناور دوگانه ($t=30$ ثانیه)



شکل ۱۲ مقایسه بردارهای سرعت در دو نوع موج شکن (الف- با دیوارهای کناری مایل ب- با دیواره های کناری قائم)

است- چشمگیر است. بررسی مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی در سمت رو به دریا در زمان ۵۰ ثانیه و برای دو موج شکن دیواره قائم و مایل (۱۷ درصد) نشان می دهد که انرژی جنبشی آشفتگی در اطراف موج شکن پانتونی ساده ۰/۰۳ و برای موج شکن با دیواره کناری شیبدار تا ۰/۱ افزایش یافته است. مقدار حداکثر سرعت در گوشه موج شکن با دیواره مایل برابر ۱/۴۷ متر بر ثانیه و در گوشه موج شکن پانتونی ساده برابر ۰/۶۶ متر بر ثانیه است؛ یعنی سرعت جریان در حضور موج شکن با دیواره

جدول ۲ مقایسه موج شکنهای شناور با دیواره کناری مایل و قائم

ضریب انتقال موج شکن (Q)	شیب دیواره های کناری موج شکن
۰/۳۱	دیواره قائم
۰/۲۲۵	۱۷ درصد
۰/۱۹	۵۰ درصد
۰/۱۵	۶۷ درصد

اغتشاش ایجاد شده بر اثر وجود سطح مایل -که در حقیقت عامل استهلاک انرژی و کاهش ضریب انتقال

C_t	ضریب انتقال
d	عمق آب
dr	عمق آبخور
g	شتاب ثقل
H	ارتفاع موج
H_t	ارتفاع موج عبوری
H_i	ارتفاع موج تابشی
κ	انرژی جنبشی آشفتگی
k	عدد موج
L	طول موج
P	فشار سیال
t	زمان
u,v,w	سرعت لحظه‌ای در راستاهای x, y, z
u_i	i-امین جزء سرعت سیال
$\frac{u_i u_j}{u_i u_j}$	تنشهای رینولدزی
α	نسبت حجمی آب در سلول‌های محاسباتی
ε	تلفات آشفتگی
v	غلظت سیال
ρ	چگالی سیال
η	تراز سطح آب
ϕ	تابع پتانسیل جریان
ω	فرکانس زاویه‌ای موج

شیدار افزایش یافته است. مقایسه بردارهای سرعت در این قسمت نیز این نکته را تأیید می‌کند.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق نرم‌افزار فلوئنت به صورت موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی شرایط هیدرودینامیکی در اطراف موج‌شکنهای شناور با شکل‌های مختلف استفاده شد. نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

- ساخت موج‌شکنهای شناوری که عمق نسبی آنها با اتصال صفحه نازک نفوذناپذیری در جلوی آنها افزایش می‌یابد، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌ترین موج‌شکنهای شناور است. عملکرد این موج‌شکنها تفاوت چندانی با موج‌شکنهای شناوری که عمق آبخور آنها ناشی از فرو رفتن کل موج‌شکن به داخل آب است، ندارد.

- موج‌شکنهای دوگانه که از کنار هم قرار گرفتن موج‌شکنهای تک پانتونی ساده با فاصله‌هایی مشخص ساخته می‌شوند، کارایی بهتری در مقایسه با موج‌شکنهای تک دارند؛ اما هزینه بالای ساخت آنها موجب شده که به‌عنوان گزینه مطرح در استفاده از موج‌شکنهای شناور در نظر گرفته نشوند.

- کمترین میزان ضریب انتقال موج‌شکن مربوط به موج‌شکنهای با دیواره کناری مایل با شیب ۶۷ درصد بوده و برابر ۰/۱۵ است.

- در موج‌شکنهای با دیواره مایل، افزایش شیب دیواره‌های کناری موجب کاهش ضریب انتقال و افزایش کارایی موج‌شکن می‌شود.

۷- فهرست علائم

A	دامنه موج
B	عرض موج‌شکن

۸- منابع

- علی‌یاری، ف. آق‌تومان، پ. وفاپی، ف. سلطانپور، م. (۱۳۸۶). "بررسی تأثیر آبخور موج‌شکن شناور پانتونی تک بر نیروهای مهار آن با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
- کاکاوند، ا. (۱۳۸۹). "مدل‌سازی عددی اثر موج‌شکنهای شناور بر روی هیدرودینامیک سواحل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Behzad, M. and Akbari, M. (2007). "Experimental investigation on response and efficiency of moored

- Koutandas, E., Prinos, P. and Girronella, X. (2005). "Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics", *J. of Hydraulic Research*, 43, pp. 174-187.
- Koutandas, E., Karambas T. and Koutitas C. (2004). "Floating breakwater response to waves action using a boussinesq model coupled with a 2DV elliptic solver", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 130, pp. 243-255.
- Kriezi, E., Karambas, T. Koutitas, C. and Prinos, P. (2001). "Interaction of floating breakwaters with wave in shallow waters", *Int. IAHR. Cong., Beijing, China*, pp. 69-76.
- LI, W.H. and Lam S.H. (1964). "Principles of Fluid Mechanics", Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Lighthill, J. (1986) "Fundamentals concerning wave loading on offshore structure", *J. of Fluid Mechanics*, 173, pp. 667-681.
- Panahi, R., Jahanbakhsh, E. and Seif, M.S. (2006). "Development of a VOF fractional step solver for floating body motion simulation", *Applied Ocean Research*, 28, pp. 171-181.
- Rahman, Md.A., Mizutani, N. and Kawazak, K. (2006). "Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater", *Coastal Engineering*, 53, pp. 799-815.
- Rodi, W. (1980) "Turbulence Models and Their Application in Hydraulics-A State of the Art Review", *International Association for Hydraulic Research*, 1980.
- "UDF manual of Fluent 6.3.", (2006). Fluent Inc.
- "User's Guide of Fluent 6.3.", (2006). Fluent Inc.
- Williams, A.N. and Mc Dougal, W.G. (1996). "A dynamic submerged breakwater", *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, pp. 287-296.
- pontoon type floating breakwaters", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering* 31, pp. 95-99.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Dong, H.H., Zheng, Y.N., Li, Y.C., Teng, B., Guan, C.T., and Lin, D.F. (2008). "Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters", *Ocean engineering* 35, pp. 931-938.
- Fugazza, M. and Natale, L. (1988). "Energy losses and floating breakwater response", *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 114, pp. 191-207.
- Hadzic, I., Hennig, J., Peric, M. and Xing, Y. (2005). "Computation of flow-induced motion of floating bodies", *Applied Mathematical Modelling*, 29, pp. 1196-1210.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries.", *J. of Computational Physics*, 39, pp. 201-225.
- Jung, K.H., Chang, K.A. and Huang E.T. (2004). "Two dimensional flow characteristics of wave interactions with a fixed rectangular structure", *Ocean Engineering*, 31, pp. 975-998.
- Jung, K.H., Chang, K.A. and Huang, E.T. (2005). "Two dimensional flow characteristics of wave interactions with a free rolling rectangular structure", *Ocean Engineering*, 32, pp. 1-20.
- Koftis, T. and Prinos, P. (2005). "A numerical study on the performance of a catamaran shaped floating breakwater", *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. on fluid dynamic & aerodynamics*. Corfu, Greece, pp. 212-217.
- Koftis, T.H., Prinos, P. and Koutandos, E. (2006). "2D-V hydrodynamics of wave-floating breakwater interaction", *J. of Hydraulic Research*, 44, pp. 451-469.