

مدل سازی عددی اندرکنش امواج دریا با سازه های ساحلی از نوع غشاء بادشونده

نگار محبعلی (کارشناس ارشد)

عبدالرضا کیبیری سامانی* (دانشیار)

بیژن برومند (استاد)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شهریه، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۴، ص. ۴۹-۶۰

در پژوهش حاضر، با استفاده از آنالیز دینامیکی به حل معادله ی حاکم بر تغییر شکل تیوب های لاستیکی مستقر در حاشیه ی ساحل در حالت دو بُعدی تحت بارگذاری ناشی از امواج منظم و فشار داخلی ناشی از سیال پرکننده ی تیوب پرداخته شده است. حل دو بُعدی از طریق کدنویسی توسط نرم افزار متلب و با استفاده از روش تفاضل مرکزی برای سازه و مشخصات موج منظم به دست آمده از تئوری موج با دامنه ی کوتاه صورت گرفته است. برای دستیابی به شکل تعادل یافته ی تیوب های لاستیکی، آنها در سه حالت مهار شده به کف در دو نقطه، مهار شده به کف در یک نقطه و بدون مهار، مدل شده اند. براساس نتایج به دست آمده، تیوب مهار شده در یک نقطه نسبت به تیوب مهار شده در دو نقطه، حالت برافراشته تری داشته و در نتیجه، ارتفاع بهره برداری آن بیشتر و خمیدگی آن به سمت پایین دست کمتر بوده است. ضمناً دو تیوب با مشخصات یکسان، یکی با مهار و دیگری بدون مهار، ارتفاع بهره برداری یکسانی ندارند و تیوب بدون مهار در ارتفاع بالاتری به شکل تعادل یافته ی خود می رسد و لذا محدوده ی وسیع تری از ارتفاع امواج و عمق های آب پای سازه را کنترل می کند.

واژگان کلیدی: موج شکن لاستیکی، اندرکنش سیال و سازه، تئوری موج با دامنه ی کوتاه، روش عددی تفاضل مرکزی.

n.mohebal@yahoo.com
akabiri@cc.iut.ac.ir
boromand@iut.ac.ir

۱. مقدمه

اهمیت سازه های ساحلی در زندگی ساحل نشینان، نیاز به استفاده از سازه های ایمن تر و اقتصادی تر بیش از پیش احساس می شود. در کنار سایر روش های بهینه سازی و ایمن سازی سازه های ساحلی، تیوب های لاستیکی انعطاف پذیر نیز می توانند به عنوان گزینه ی مناسبی برای احداث موج شکن ها و دیوارهای ساحلی، سبب افزایش اطمینان از حفظ سواحل و کاهش هزینه های بهره برداری و نگهداری آنها شوند (شکل ۱). سازه های ذکر شده را می توان در طول های مختلف در عرض سواحل اجرا کرد (شکل ۲). برای پر کردن تیوب ها از آب یا هوای فشرده استفاده می شود و عموماً هیچ گونه اتصالی به کف ندارند؛ ولی می توان با قرار دادن بلوک هایی، حرکت رو به عقب آنها را محدود کرد. زمان مورد نیاز برای نصب و راه اندازی تیوب ها، به دلیل پیش ساخته بودن شان بسیار کوتاه تر از زمان احداث سایر سازه های ساحلی و خالی کردن و جمع آوری سریع آنها نیز به وقت لزوم امکان پذیر است.

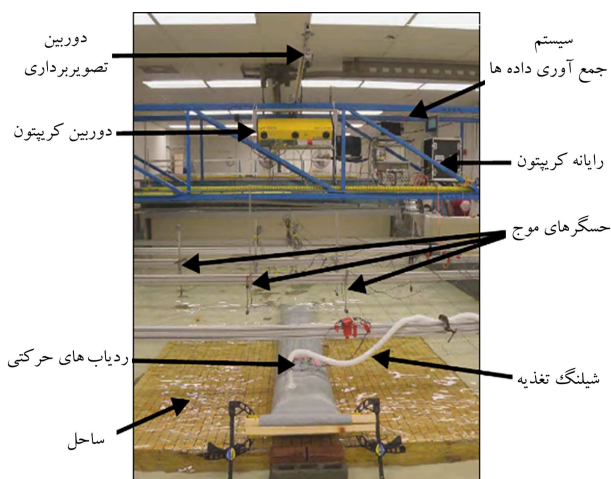
در مورد عملکرد تیوب های مذکور پیش بینی می شود که به دلیل انعطاف پذیری و تغییر شکل مداوم در هنگام برخورد امواج، بتوانند انرژی زیادی را مستهلک کنند و باعث کاهش ضریب انعکاس موج برگشتی شوند. تیوب های ژئوتکستایل^۱ معمولاً به صورت پوسته یا غشاء با مقاومت کششی و خمشی مدل می شوند و بارهای وارده به آنها به دو دسته ی کلی: فشار داخلی (آب، هوا، یا ترکیبی از هر دو) و فشار

بشر از دیرباز برای کاهش خسارت های ناشی از برخورد امواج، به طراحی و ساخت سازه های ساحلی اقدام کرده است. سازه های ساحلی با کاهش ارتفاع موج، امکان بهره برداری از بنادر و سواحل را در تمام فصول سال فراهم می کنند. وجود مرزهای آبی گسترده در ایران از یک طرف و کمبود مطالعات کاربردی در زمینه ی طراحی سازه های دریایی از طرف دیگر، تلاش های گسترده یی را در زمینه ی مهندسی سواحل و بنادر می طلبد. سازه های ساحلی از دیدگاه های مختلف، از جمله: شکل هندسی، مصالح به کار برده شده و موقعیت قرارگیری به انواع مختلف دسته بندی می شوند و هر کدام از آنها معایب و مزایای خاص خود را دارند. به دلیل هزینه های زیاد و زمان اجرای طولانی سازه های ساحلی و موج شکن های ثابت سنگی، تمایل به استفاده از انواع دیگر آنها به دلیل پایین تر بودن هزینه ی ساخت، نصب سریع و قابلیت حمل و نقل در حال گسترش است. از حدود ۴ دهه ی پیش، تکنولوژی طراحی، ساخت و اجرای سازه های ساحلی و موج شکن ها شروع به پیشرفت کرده است.^[۸-۱] به دلیل هزینه های بالا و صرف زمان زیاد جهت ساخت موج شکن ها و دیوارهای ساحلی و نیز به دلیل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۴/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۹/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۹/۳۰.

DOI:10.24200/J30.2019.53845.2592



شکل ۳. وضعیت قرارگیری تجهیزات اصلی آزمایشگاهی در مطالعات بلوکسوم و همکاران (۲۰۱۱).^[۱۸]

انتگرالی حل شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج آنالیزهای دوبعدی شبه تحلیلی ارائه شده در نوشتار مذکور با نتایج عددی مطالعات پیشین در ارتباط با شکل تعادل یافته‌ی تیوب قابل انعطاف برای فشارهای داخلی متفاوت نشان داده است که فرضیات استفاده شده در مدل شبه تحلیلی اخیر، معتبر و مناسب بوده‌اند. قوانلو و دانشمند (۲۰۱۵)،^[۱۵] رفتار استاتیکی غشاء استوانه‌یی در شرایط مختلف فشار داخلی و پارامترهای سیال بالادست و پایین دست را به صورت دوبعدی بررسی کرده و با در نظر گرفتن این موضوع که مسئله‌ی تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از فشارهای داخلی و خارجی باعث غیرخطی شدن معادلات حاکم می‌شود، یک روش تحلیلی برای آنالیز غیرخطی اندرکنش استاتیکی سیال و غشاء استوانه‌یی ارائه دادند. چراغی و همکاران،^[۱۶] رفتار یک سد لاستیکی را به عنوان سازه‌یی انعطاف پذیر مطالعه کردند و در مدل خود نحوه‌ی تأثیر پذیری ضریب دبی جریان از تغییر شکل سازه و نیز اندرکنش سیال - سازه را برای دست‌یابی به طرحی ایمن و بهینه مدنظر قرار دادند. بلوکسوم و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۸] به مدل سازی آزمایشگاهی آثار متقابل سیال و سازه‌ی ژئوممبران انعطاف پذیر پُر شده با آب در نزدیکی خط ساحلی پرداختند. شکل ۳ و آزمایش‌های خود را برای سه زاویه‌ی انتشار موج متفاوت، سه عمق متفاوت آب دریا و ارتفاع‌های موج مختلف انجام دادند. نتایج ایشان، نتیجه‌گیری‌های قبلی در این زمینه را تأیید کرده و نشان داده است که سازه‌های مذکور پایدار هستند و به خوبی در بیشتر حالت‌های بهره‌برداری روی زمین مستقر می‌مانند.

کیران و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱۹] به آنالیز پایداری و تدوین ضوابطی برای طراحی موج شکن‌های مستغرق ساخته شده از تیوب‌های ژئوسنتتیک و پُر شده از شن در عمق ۴ متری دریا در نزدیکی ساحل پرداختند (شکل ۴).

در ارتباط با طراحی و استفاده از تیوب‌های اخیر به عنوان سازه‌های حفاظت از ساحل، جمشیدی (۲۰۱۵)،^[۲۰] به مطالعه در ارتباط با نحوه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای تیوب‌های ژئوتکستایل پرداخت و اثر دو پارامتر تراکم پانچ‌های استفاده شده و عمق نفوذ آنها بر روی مقاومت کششی این تیوب‌ها را مطالعه کرده است.

با توجه به اهمیت و مزایای استفاده از تیوب‌های لاستیکی، بررسی رفتار تیوب‌های لاستیکی به عنوان موج شکن یا دیوار ساحلی انعطاف پذیر و نحوه‌ی بارگذاری و نیروهای وارده به آنها، برای دست‌یابی به طرح ایمن و بهینه ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، از روش تفاضل مرکزی در حالت دوبعدی برای حل هم‌زمان معادله‌ی سیال



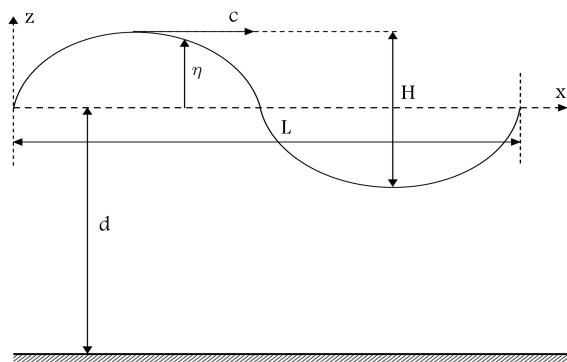
شکل ۱. نمونه‌یی از استفاده از تیوب‌های ژئوتکستایل به منظور محافظت از نواحی ساحلی در مالزی.^[۹]



شکل ۲. استفاده از تیوب‌های ژئوتکستایل در San Luis Pass آمریکا جهت حفاظت از ساحل (سال ۲۰۰۰ میلادی).

آب خارجی تقسیم می‌شوند. آلوارز و همکاران (۲۰۰۷)،^[۱۰] نمونه‌یی از استفاده از تیوب‌های ژئوتکستایل را به عنوان سازه‌ی ساحلی مطرح کرده و به توصیف راه حل فنی اتخاذ شده جهت استفاده از آنها به عنوان سازه‌یی نیمه مستغرق در طول ۴ کیلومتر از سواحل شمالی یوگاتان^۳ در مکزیکو^۴ پرداخته و برای این منظور تیوب‌های ژئوتکستایل ساخته شده از پلی پروپیلن^۵ طراحی و به عنوان یک سازه‌ی نیمه مستغرق استفاده شده‌اند.

کیم^۶ و همکاران (۲۰۰۴)،^[۱۱] با استفاده از یک لایه‌ی محافظ^۷ متصل به تیوب در بالادست آن، لغزش و غلتش تیوب‌ها را کاهش دادند. سپس آزمایش‌هایی روی تیوب‌های متصل به لایه‌های محافظ با طول‌های متفاوت انجام دادند و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، یک مدل تحلیلی ساده شامل یک فونداسیون صلب و غیرقابل انبساط ارائه کردند. قوانلو و دانشمند (۲۰۰۸)،^[۱۲] یک روش تحلیلی جهت بررسی شکل تعادل یافته‌ی تیوب‌های ژئوممبرین پُر شده با هوا و نصب شده روی فونداسیون‌های صلب ارائه کردند. دیدگاه شبه تحلیلی نیز برای آنالیزهای دوبعدی روی تیوب قابل انعطاف جدار نازک پُر شده از سیال توسط قوانلو و دانشمند (۲۰۰۹)،^[۱۳] ارائه شده است، که به منظور تعیین شکل تعادل یافته‌ی تیوب‌های مذکور، معادله‌های دیفرانسیلی غیرخطی حاکم همراه با شرایط مرزی آن در فرم



شکل ۵. تعریف پارامترهای موج پیش‌رونده.

دست آورد. کاربردی‌ترین حالت پتانسیل سرعت به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$\varphi = \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (2)$$

با به کارگیری پتانسیل سرعت در شرط دینامیکی خطی شده با فرض $z=0$ می‌توان معادله‌ی نیم‌رخ سطح موج را مطابق رابطه‌ی ۳ تعیین کرد:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (3)$$

با به کارگیری پتانسیل سرعت در معادله‌ی خطی شده‌ی حرکت رابطه‌ی فشار در محیط موج به صورت رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$P = -\rho g z + \frac{\rho g H}{2} \left[\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \right] \cos(kx - \sigma t) \quad (4)$$

۳. متدولوژی

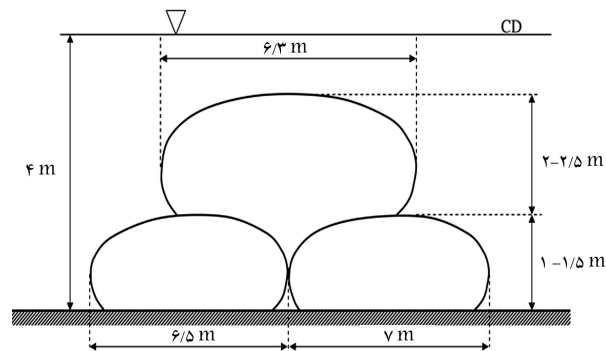
۱.۳. روش تحلیل

در پژوهش حاضر بدون استفاده از فرمولاسیون تغییرشکل‌های بزرگ و بر پایه‌ی استفاده از روش تفاضل مرکزی و با فرض تغییر طول ناپذیر بودن سازه، با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب، به بررسی تغییرشکل‌ها در حالت دوبعدی پرداخته شده است. پژوهش حاضر، شامل سه سری مدل مختلف است. در ابتدا، تیوب لاستیکی توسط دو نقطه به زمین مهار شده است. در مرحله‌ی بعد، این مهار به یک نقطه کاهش یافته و در مرحله‌ی آخر مهار برداشته شده است؛ که در نتیجه، تیوب می‌تواند آزادانه حرکت کند. برای جلوگیری از حرکت رو به عقب تیوب، از یک گوه در پشت تیوب استفاده شده است. در تمامی حالت‌های مذکور، فونداسیون صلب فرض شده است. در ادامه، تیوب تحت دو بارگذاری قرار گرفته است. بارگذاری اول، شامل فشار داخلی تیوب بوده و در بارگذاری دوم، علاوه بر فشار داخلی، نیروی ناشی از موج منظم، نیز به تیوب اعمال شده است.

۲.۳. معادله‌ی دینامیکی حاکم بر سازه و روش تفاضل مرکزی^۹

معادله‌ی تعادل حاکم بر پاسخ دینامیکی خطی، یک سیستم سازه‌ی مدل شده توسط المان‌های محدود به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (5)$$



شکل ۴. مقطع موج‌شکن استفاده شده در مطالعات کیران و همکاران (۱۵، ۲۰). [۱۹]

- سازه، حاکم بر سازه‌های ساحلی و موج‌شکن‌های لاستیکی تحت اثر بارگذاری موج استفاده شده است. از آن‌جا که مسئله‌ی تغییرشکل‌های بزرگ ناشی از فشارهای داخلی و خارجی باعث غیرخطی شدن معادله‌های حاکم بر تیوب لاستیکی می‌شود، به منظور حل معادله‌های مذکور از روش تفاضل مرکزی استفاده شده است. در مدل‌سازی ذکر شده، رفتار پوسته کاملاً در محدوده‌ی رفتار کشسان فرض شده است. در ادامه، با هدف به دست آوردن شکل تعادل یافته‌ی تیوب‌های لاستیکی به عنوان موج‌شکن، با استفاده از نرم‌افزار متلب^۸، تیوب‌ها به صورت دوبعدی در حالت‌های مهار شده به کف در دو نقطه، مهار شده به کف در یک نقطه و بدون مهار مدل می‌شوند. در مدل‌سازی انجام شده‌ی عددی به مسائلی نظیر: نوع مهار، مشخصات موج وارده و پارامترهای سازه‌ی مؤثر در شکل تیوب توجه شده و اثر تغییرات آنها روی شکل تعادل یافته‌ی تیوب بررسی شده است.

۲. روابط حاکم بر موج دوبعدی

بررسی تئوری امواج و اندرکنش بین موج با سازه‌ها ساحلی به حل معادله‌ی ۱ منجر می‌شود:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

که در آن، φ پتانسیل جریان است. معادله‌ی ۱ به معادله لاپلاس معروف است. به شرط آن‌که نیم‌رخ سطح آب (η) نسبت به تراز ایستایی اندازه‌گیری شود، معادله‌ی لاپلاس در محدوده‌ی $-d \leq z \leq \eta$ و $-\infty < x < +\infty$ برقرار است. شکل ۵، شمایی از حرکت یک موج متناوب با سرعت c در آبی به عمق d در سیستم مختصات x و z را نشان می‌دهد. محور x در تراز ایستایی در نظر گرفته شده و کف در $z = -d$ قرار دارد. نیم‌رخ سطح موج به وسیله‌ی $z = \eta$ تعریف می‌شود؛ به صورتی که η تابع x و زمان t است. طول موج L و ارتفاع H ، روی شکل ملاحظه می‌شوند. در قدم بعدی، شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود. این شرایط شامل شرط مرزی بستر دریا و شرایط مرزی سطح آزاد هستند. معادلات مربوط به شرایط مرزی در سطح آزاد، غیرخطی هستند. تئوری موج متناوب ثقیل دامنه‌ی کوتاه در حالت دوبعدی، که به صورت آزاد انتشار می‌یابد، با خطی‌سازی معادله‌های بیان‌کننده‌ی شرایط مرزی سطح آزاد آب نوشته می‌شود. با شرایط ذکر شده و شرط مرزی کف، یک پتانسیل سرعت متناوب که شرایط جریان غیرچرخشی را ارضاء می‌کند، به دست می‌آید. [۲۱]

با به کارگیری معادله‌ی لاپلاس، شرط مرزی در کف و شرط مرزی دینامیکی خطی شده در سطح، می‌توان پتانسیل سرعت در تئوری امواج دامنه‌ی کوتاه را به

که در آن، C, M, K به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی، R بردار نیروهای خارجی و \dot{U} و \ddot{U} به ترتیب بردارهای جابه جایی، سرعت و شتاب المان های محدود است. اگر رابطه ی تعادل ۵ به عنوان یک دستگاه معادلات دیفرانسیل عادی با ضرایب ثابت ارائه شود، می توان از انواع عبارت های تفاضل محدود، برای تقریب زدن شتاب و سرعت به فرم جابه جایی استفاده کرد. ولی از آن جایی که روش حل باید مؤثر باشد، فقط روش های محدودی قابل استفاده هستند. یک روش که می تواند در حل بسیاری از مسائل کارا باشد، روش تفاضل مرکزی است، که در آن فرض می شود:

$${}^t\ddot{U} = \frac{1}{\Delta t^2} \left({}^{t+\Delta t}U - 2{}^tU + {}^{t-\Delta t}U \right) \quad (6)$$

خطا در رابطه ی ۶ از مرتبه ی ۲ است و برای داشتن همان مرتبه ی خطا در عبارت سرعت، می توان از رابطه ی ۷ استفاده کرد:

$${}^t\dot{U} = \frac{1}{2\Delta t} \left({}^{t+\Delta t}U - {}^{t-\Delta t}U \right) \quad (7)$$

حل جابه جایی برای زمان $t + \Delta t$ با در نظر گرفتن معادله ی ۵ در زمان t به دست می آید رابطه ی ۸:

$$M {}^t\ddot{U} + C {}^t\dot{U} + K {}^tU = {}^tR \quad (8)$$

با جایگزین کردن معادلات ۶ و ۷ برای ${}^t\dot{U}$ و ${}^t\ddot{U}$ در معادله ی ۸، رابطه ی ۹ به دست می آید، که حلی برای ${}^{t+\Delta t}U$ ارائه می دهد:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C \right) {}^{t+\Delta t}U = {}^tR - \left(K - \frac{1}{\Delta t^2}M \right) {}^tU - \left(\frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{1}{2\Delta t}C \right) {}^{t-\Delta t}U \quad (9)$$

باید توجه داشت که حل ${}^{t+\Delta t}U$ بر پایه ی استفاده از شرایط تعادل در زمان t است. به عبارت دیگر، ${}^tU + \Delta t$ توسط رابطه ی ۷ محاسبه می شود. به همین دلیل روش اخیر، روش انتگرال گیری صریح^{۱۰} نامیده می شود. در روش های هوبلت^{۱۱} و یلسون^{۱۲} و نیومارک^{۱۳} از شرایط تعادل در زمان $t + \Delta t$ استفاده می شود و به آنها، روش های انتگرال گیری ضمنی^{۱۴} گفته می شود. همچنان که در رابطه ی ۸ ملاحظه می شود، در روش تفاضل مرکزی، محاسبه ی ${}^{t+\Delta t}U$ وابسته به عبارت های tU و ${}^{t-\Delta t}U$ است. بنابراین برای حل در زمان Δt ، یک روش ویژه برای شروع باید استفاده شود. اگر عبارت ${}^0\ddot{U}$ (بردار شتاب در زمان صفر)، ${}^0\dot{U}$ (بردار سرعت در زمان صفر) و 0U (بردار جابه جایی در زمان صفر) مشخص باشد (باید توجه داشت با 0U و ${}^0\dot{U}$ مشخص، ${}^0\ddot{U}$ از رابطه ی ۵ در زمان صفر محاسبه می شود)، رابطه های ۶ و ۷ را می توان برای تعیین ${}^{\Delta t}U$ استفاده کرد. به عبارت دیگر، می توان از رابطه ی ۱۰ استفاده کرد:

$$-{}^{\Delta t}U_i = {}^0U_i - \Delta t {}^0\dot{U}_i + \frac{\Delta t^2}{2} {}^0\ddot{U}_i \quad (10)$$

که در آن، i شماره ی المان در نظر گرفته شده است. روش ذکر شده فقط زمانی مؤثر است که حل هر گام زمانی بتواند عملکردی کاملاً کارا داشته باشد؛ زیرا انتخاب یک گام زمانی کوچک، شمار زیادی گام های زمانی را به دنبال دارد. به هر حال استفاده از گام های زمانی نسبتاً کوچک الزامی است. در حقیقت، در روش تفاضل مرکزی Δt باید از یک مقدار بحرانی (Δt_{cr}) کمتر باشد. مقدار بحرانی (Δt_r) می تواند از ماتریس جرم و سختی کامل سوار شده به دست آید رابطه ی ۱۱:^[۱۸]

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_n}{\pi} \quad (11)$$

که در آن، T_n کوتاه ترین دوره ی تناوب برای دستگاه معادله ی کلی با n درجه ی آزادی است. در روش حل برای تمام i ها، $m_{ii} > 0$ فرض می شود. رابطه ی ۱۱، یک بار دیگر این موضوع را تأیید می کند؛ زیرا یک درایه ی قطری صفر در یک ماتریس قطری جرم بیان گر آن است که دستگاه معادله ی کلی، یک دوره ی صفر دارد. در حقیقت با بزرگ تر از صفر بودن تمام درایه های ماتریس جرم، رابطه ی ۱۱ حدی را برای مقدار گام زمانی مشخص می کند. در بعضی مسائل مانند دینامیک سازه ها برای دقت در انتگرال گیری باید گام های زمانی به اندازه ی کافی کوچک انتخاب شوند. در این گونه مسائل، دقت انتگرال گیری با گام زمانی به اندازه ی کافی کوچک چندین مرتبه بیشتر از دقت انتگرال گیری با گام زمانی Δt_{cr} است. این نقطه نظر اهمیت اعمال یک گسسته سازی اجزاء محدود و گام زمانی مناسب برای حل دینامیکی مسئله را مشخص می کنند. برای حل یک دستگاه بزرگ معادلات تعادل با روش تفاضل مرکزی، گام زمانی با استفاده از معادله ی ۱۱ به دست می آید. روش های انتگرال گیری، که در آنها از گام های زمانی کوچک تر از Δt_{cr} استفاده می شود، شبیه روش تفاضل مرکزی، پایداری شرطی دارند.^[۲۱] بنابراین انتخاب درست بازه ی زمانی در روند همگرایی تعیین کننده است. بازه ی زمانی کوچک باعث به تأخیر افتادن همگرایی می شود و بازه ی زمانی بزرگ باعث تغییرات ناگهانی در جابه جایی نقاط و منجر به واگرایی می شود. برای خارج کردن تغییر طول المان ها (تغییر شکل های کوچک در نتیجه ی وارد شدن نیرو) از تغییر شکل های کلی، از جایگزینی K^* و R^* به جای K و R در کلیه ی روابط ذکر شده، استفاده می شود روابط ۱۲ الی ۱۴:

$$N = \text{nullspace}(K) \quad (12)$$

$$K^* = N \times N^T \times K \quad (13)$$

$$R^* = N \times N^T \times R \quad (14)$$

که در آنها، N فضای پوچ ماتریس سختی است. اجزاء به کار گرفته شده در تحلیل بخش سازه یی مسئله به صورت اعضاء خرابایی با دو انتهای مفصلی هستند و بنابراین فضای پوچ ماتریس سختی، تعداد زیادی بردار دارند. در پژوهش حاضر، توسط برنامه ی نوشته شده در نرم افزار متلب، برای بررسی تغییر شکل سازه ی تغییر طول پذیر، به حل معادلات تعادل در آنالیز دینامیکی پرداخته شده است. با استفاده از روش تفاضل مرکزی و با فرض تغییر طول ناپذیر بودن اجزاء سازه، در هر بازه ی زمانی، تغییر شکل های کوچک محاسبه می شود و از برهم نهی تغییر شکل های کوچک، تغییر شکل های بزرگ به دست می آیند. پس از به تعادل رسیدن سازه ی تحت بارگذاری مرتبط، اجازه ی تغییر طول به سازه داده می شود. نکته ی قابل ذکر در محاسبه ی جابه جایی ها در این است که چپش اولیه ی المان های خطی در شکل تعادل یافته ی نهایی بی تأثیر است. در صورتی که شکل اولیه به شکل نهایی نزدیک تر باشد، همگرایی جواب ها زودتر اتفاق می افتد. حل مسئله با در نظر گرفتن یک چپش دلخواه برای المان ها و تعیین ماتریس سختی و نیرو آغاز می شود. ماتریس جرم، یک ماتریس قطری با درایه ی قطری به اندازه ی کافی بزرگ است و ماتریس میرایی از ضرب یک میرایی مصنوعی در ماتریس یکه حاصل می شود.^[۱۸] مقادیر 0U و ${}^0\dot{U}$ برابر با صفر در نظر گرفته می شود، و سپس ${}^0\ddot{U}$ از رابطه ی ۵ محاسبه می شود. با طی کردن روند حل در هر گام زمانی، جابه جایی نسبت به یک حالت مبدأ، که همان چپش اولیه ی المان هاست، محاسبه می شود. بنابراین با اضافه کردن جابه جایی هر مرحله نسبت به مرحله ی قبل به ماتریس مختصات نقاط، مختصات جدید نقاط، ماتریس سختی و ماتریس بار مجدداً

می‌تواند آزادانه تغییر شکل دهد. این چینش شامل ۲۰۰ المان ۰/۵ متری بوده و تیوب در نقطه‌یی به مختصات (۰،۰) به کف مهار شده است. در این حالت نیز مشابه حالت قبل، دو نوع بارگذاری به تیوب اعمال شده است. بارگذاری اول شامل تأثیر فشار داخلی ۳۰۰۰ پاسکال و بارگذاری دوم علاوه بر فشار داخلی، تأثیر فشار ناشی از موج را نیز شامل می‌شود. مشخصات موج در این مورد مشابه حالت قبل است و فشار داخلی نیز ۳۵۰۰ پاسکال در نظر گرفته شده است.

۵.۳. مدل‌سازی تیوب در حالت بدون مهار

در این حالت تیوب هیچ‌گونه مهاری به کف ندارد، و می‌تواند آزادانه در تمامی جهت‌ها حرکت کند؛ بنابراین برای جلوگیری از حرکت رو به عقب تیوب با توجه به مطالعات هانگ و همکاران (۲۰۰۲)^[۲۲] از یک گوه به منظور مهار تیوب و جلوگیری از لغزش و غلتش آن استفاده شده است. به علاوه، بر اساس پیشنهاد هانگ و همکاران (۲۰۰۲)^[۲۳] و کیم و همکاران (۲۰۰۴)^[۱۱] با الحاق یک لایه‌ی محافظ^{۱۵} به بدنه‌ی تیوب، که تا روی زمین ادامه دارد، ایستادگی تیوب در مقابل فشار ناشی از امواج افزایش می‌یابد و می‌تواند مانع از نفوذ آب به زیر تیوب و گذر آن به ناحیه‌ی پشت تیوب شود. در این بخش نیز مشابه دو مورد قبل، دو نوع بارگذاری فشار داخلی و فشار داخلی همراه با اثر امواج، به تیوب اعمال شده و مجدداً محیط تیوب توسط ۲۰۰ المان ۰/۵ متری پوشانده شده است.

۶.۳. شبکه‌بندی و کنترل استقلال از شبکه

در شکل‌های ۶ - الف الی ۶ - ج، اثر تعداد المان‌ها در شکل تعادل‌یافته‌ی نهایی مشاهده می‌شوند، که مطابق آنها، با دو برابر کردن تعداد المان‌ها، شکل نهایی سازه تغییر زیادی از خود نشان نمی‌دهد. در صورت استفاده از تعداد المان کمتر نیز تعداد المان‌ها نمی‌تواند به خوبی شکل سازه و تغییرات آن را پوشش دهد، در نتیجه روند حل دچار واگرایی می‌شود و افزایش حجم کاذب به شکل تیوب می‌دهد. بر همین اساس، با افزایش تعداد اجزای برنامه، شکل تیوب هم بزرگ‌تر می‌شود و روند ثابتی را به خود نمی‌گیرد. در صورت استفاده‌ی بیش از ۱۶۰ المان و ۲۰۰ المان، اثر تجمع خطاها زیاد و روند حل دچار واگرایی می‌شود. مسئله‌ی مذکور برای حالت سوم مورد بحث، که تغییر شکل تیوب در حالت بدون مهار را نشان می‌دهد، اندکی تفاوت دارد. در این حالت محل قرارگیری تیوب روی گوه ثابت نمی‌شود و تیوب به لغزش رو به بالای خود ادامه می‌دهد؛ ولی از تعداد اجرای مشخصی به بعد، شکل تیوب ثابت می‌شود و حالت نهایی به خود می‌گیرد. مطابق شکل ۶ - ج، با افزایش تعداد اجزای، شکل تیوب تغییر نمی‌کند و فقط روی گوه بیشتر رو به بالا حرکت می‌کند. لذا با زیاد کردن تعداد اجزای در روند تغییر شکل‌های تیوب با تعداد المان‌های متفاوت، تغییری ایجاد نمی‌شود. با توجه به دو شکل اخیر به خوبی مشخص است که بر خلاف دو حالت قبل، پوشش شکل تیوب با تعداد المان‌های متفاوت تغییر می‌کند. در این حالت نیز تعداد المان کمتر، شکل مقطع تیوب را به خوبی پوشش نمی‌دهد و تعداد المان بیشتر نیز به دلیل تجمع خطاها باعث واگرایی روند حل می‌شود. از این رو استفاده از تعداد المان‌های بیشتر، یعنی ۲۰۰ المان در روند حل ترجیح داده شده است. با توجه به این مطلب و حفظ شباهت سه مدل‌سازی از هر حیث، برای هر سه مورد تعداد المان‌های بیشتر، یعنی ۱۶۰ و ۲۰۰ المان، ترجیح داده شده است.

محاسبه می‌شوند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که شتاب سازه صفر و جابه‌جایی نقاط ثابت شود. در حالت اخیر، سازه پایدارترین شکل را تحت بارگذاری مرتبط به خود می‌گیرد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده برای هر پارامتر، محدوده‌ی مشخصی دارد؛ به این معنا که این برنامه‌نویسی برای دامنه‌ی خاصی از پارامترهای مختلف می‌تواند شکلی را به عنوان شکل نهایی تیوب ارائه دهد و برای مقادیر خارج از دامنه‌ی ذکر شده، ابعاد تیوب با افزایش تعداد اجزای افزایش می‌یابد و در نهایت، با بروز خطا در ساخت ماتریس سختی سازه، روند حل واگرا و برنامه متوقف می‌شود. بنابراین در حالت‌های ذکر شده نمی‌توان شکلی به عنوان خروجی نهایی ارائه کرد، چرا که برای هر تعداد اجرای مشخص، تیوب ابعاد متفاوتی خواهند داشت.

عواملی که در شکل مقطع تیوب دخالت دارند، عمدتاً عبارت‌اند از: نیروهای استاتیکی و دینامیکی حاصل از وجود موج، روش پُرشدگی تیوب توسط جریان آب یا هوا، نحوه‌ی اتصال تیوب لاستیکی به پی در کف و جناحین، فشار داخلی تیوب، ارتفاع تیوب و وزن تیوب که خود با ضخامت لاستیک، ارتفاع آن و طول دهانه ارتباط دارد. با فرض اساسی بی‌نهایت بودن طول پوسته، به طوری که پوسته تحت تأثیر دو بخش انتهایی و جریان‌های عرضی نباشد، می‌توان رفتار آن را به صورت دو بُعدی تحلیل کرد. علاوه بر این، با صرف‌نظر کردن از مقاومت خمشی، می‌توان محیط سطح مقطع پوسته را با یک سری المان‌های خطی پوشاند. بنابراین با استفاده از روش ذکر شده می‌توان شکل نهایی و تعادل یافته‌ی مجموعه‌ی المان‌های خطی را تحت اثر بارگذاری داخلی و خارجی به دست آورد.

۳.۳. مدل‌سازی تیوب در حالت مهار شده در دو نقطه

با توجه به این مطلب که چینش اولیه‌ی المان‌ها در شکل نهایی سازه بی‌تأثیر است، بارگذاری بر روی یک چینش ساده، به شکل مستطیل با طول ۳ و عرض ۲ متر، صورت گرفته است. بنابراین در این حالت طول تکیه‌گاه یا فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی مهار به کف، ۲ متر فرض شده است. در این‌جا فقط سه ضلع دیگر تیوب، یعنی فقط ۸ متر از طول محیط تیوب می‌تواند آزادانه تغییر شکل دهند. ضلع چهارم به دلیل محصور ماندن بین دو تکیه‌گاه، هیچ تغییر شکلی نخواهد داشت. طول ۸ متری اخیر از ۱۶۰ المان با طول ۰/۵ متر تشکیل شده است. در این حالت دو نوع بارگذاری به تیوب اعمال می‌شود. حالت اول، شامل تیوب تحت بارگذاری داخلی است؛ به عبارت دیگر، در این مرحله نیروی موج اعمال نمی‌شود و تیوب فقط تحت اثر فشار داخلی به تعادل می‌رسد و فشار داخلی برابر ۳۰۰۰ پاسکال است. در مرحله‌ی بعد، بارگذاری موج متناوب با زمان به تیوب اعمال می‌شود. موج وارده، دوره‌ی تناوب ۱۰ ثانیه، ارتفاع ۱ متر، و عمق ۱/۳ متر داشت. البته باید ذکر شود که برای به تعادل رسیدن تیوب در این حالت، نیاز به طی گام‌های به مراتب بیشتری نسبت به حالت بدون بارگذاری موج است. در این حالت، فشار داخلی ۳۵۰۰ پاسکال در نظر گرفته شده است.

۴.۳. مدل‌سازی تیوب در حالت مهار شده در یک نقطه

در این مورد نیز از چینش مستطیلی با همان ابعاد ۲ × ۳ متر، به عنوان شکل اولیه استفاده شده است. با این تفاوت که در این حالت تیوب فقط در یک نقطه به کف مهار می‌شود، که در نتیجه تمامی طول محیط تیوب ۱۰ متری

پشت سازه با افق است. با انجام آنالیز ابعادی به روش پی - باکینگهام، تعداد ۷ متغیر بی‌بعد به صورت رابطه‌ی ۱۶ حاصل شده است:

$$f\left(\frac{P}{\gamma D}, \frac{x}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{Tu}{D}, \frac{L}{D}, \alpha\right) = f(P^*, x^*, y^*, H^*, d^*, T^*, L^*, \alpha) \quad (16)$$

در مورد پارامتر T^* با استفاده از um (سرعت پیشینه‌ی موج در راستای افقی) به جای u می‌توان به عدد شناخته شده‌ی کنولگان - کارپنتر^{۱۶} دست یافت. بنابراین، پارامتر T^* به صورت رابطه‌ی ۱۷ تعریف می‌شود:

$$T^* = \frac{u_m T}{D} \quad (17)$$

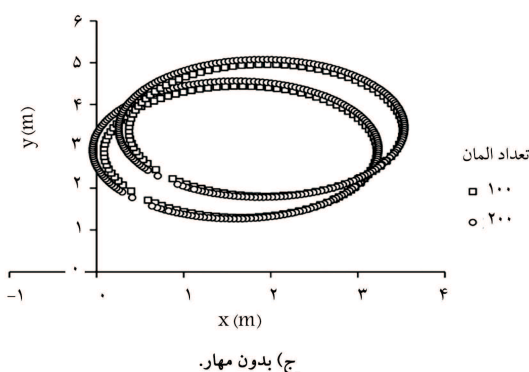
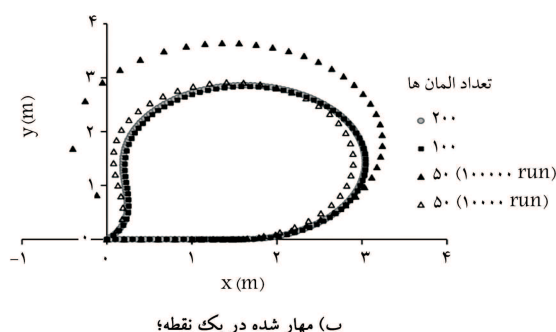
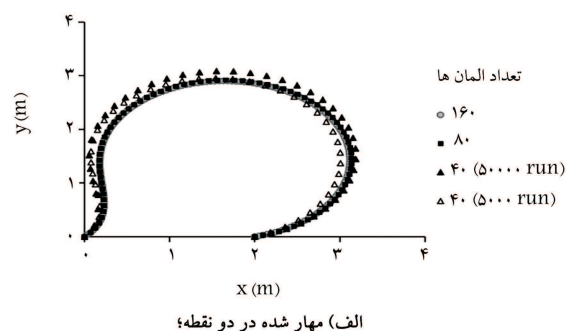
پارامتر um را می‌توان بر اساس معادله‌ی سرعت ذرات در آب‌های کم عمق به دست آورد رابطه‌ی ۱۸:^[۲۱]

$$u_m = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (18)$$

۲.۴. بررسی شکل تعادل یافته‌ی تیوب

در این مدل‌سازی‌ها، ورودی و خروجی برنامه شامل یک ماتریس عددی به نام Node است، که دارای دو ستون و به تعداد المان‌ها، سطر است. دو ستون مذکور شامل مختصات طولی و عرضی هر المان هستند. همان طور که عنوان شد، شکل اولیه برای شروع در روند حل و به تعادل رسیدن تیوب بی‌تأثیر است و فقط زمان و تعداد اجرای مورد نیاز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا هر چه شکل یا چینش اولیه از شکل نهایی دورتر باشد، روند رسیدن به تعادل برای تیوب طولانی‌تر می‌شود و نیازمند صرف زمان و تعداد اجرای بیشتری است. با توجه به مطالب ذکر شده به منظور استفاده از یک شکل واحد برای هر سه مدل، از چینش مستطیلی به عنوان شکل اولیه استفاده شده و مبدأ مختصات در گوشه‌ی چپ آن قرار گرفته است. شروع شماره‌گذاری المان‌ها از نقطه‌ی مبدأ مختصات و در جهت گردش عقربه‌های ساعت است. در مرحله‌ی معرفی متغیرها به برنامه، برخی پارامترها ثابت اختیار شده‌اند. از جمله‌ی متغیرهای ذکر شده می‌توان به مدول کشسانی و ضخامت تیوب اشاره کرد. ضخامت پوسته برای مدل ذکر شده، 0.04 متر اختیار شده است. با توجه به مطالعات چراغی^[۱۶ و ۱۷] و مقایسه‌ها و تحلیل‌های انجام گرفته‌ی ایشان، مدول یانگ برای مدل‌سازی‌های انجام گرفته برابر $e=21$ در نظر گرفته شده است. از این رو مقدار مدول کشسانی برابر 2075926 GPa به دست آمده است، که از این مقدار به طور ثابت در تمامی اجراها استفاده شده است. در جدول ۱، دسته‌بندی مدل‌ها در بخش کنونی به همراه بعضی مشخصه‌هایشان ارائه شده است. در مدل‌سازی کنونی، Δt برابر با $2/85$ ثانیه در نظر گرفته شده است، که در نظر گرفتن آن جنبه‌ی واقعی و کاربرد حقیقی ندارد و فقط برای حفظ روند حل و همگرا شدن مسیر حل از آن استفاده شده است. در جدول ۲، تعداد اجراهای مورد نیاز برای رسیدن به شکل تعادل یافته‌ی هر یک از سه حالت اشاره شده، مقایسه شده‌اند. در تمامی موارد، سیال پُرکننده‌ی تیوب، آب بوده است. در جدول ۳، دسته‌بندی مدل‌ها و نتایج ۶ دسته‌ی نخست بخش حاضر با توجه به مقادیر معلوم متغیرهای مختلف ارائه شده است.

فشار داخلی، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در شکل تعادل یافته‌ی تیوب لاستیکی در حالت مهار با دو نقطه است. برای بررسی اثر فشار داخلی، تیوب با سه فشار



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج تغییر شکل در تعداد شبکه‌های مختلف برای حالت‌های مختلف.

۴. تحلیل نتایج

۴.۱. آنالیز ابعادی و پارامترهای مؤثر

برای انجام آنالیز ابعادی روش‌های مختلفی وجود دارد، که یکی از معتبرترین و پر کاربردترین آنها نظریه‌ی پی - باکینگهام است، که به طور وسیعی در آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. مراحل انجام آنالیز ابعادی به روش پی - باکینگهام جهت دست‌یابی به پارامترهای بی‌بعد به این صورت است:

تمامی متغیرها فهرست و تعداد آنها شمارش شد، که تعداد کل آنها در مدل‌سازی حاضر، $n = 10$ بوده است. هدف از انجام این آنالیز ابعادی، یافتن فرم تغییر شکل یافته‌ی تیوب تحت تأثیر پارامترهای مؤثر رابطه‌ی ۱۵ بوده است:

$$f(P, x, y, D, H, d, T, L, u, \gamma, \alpha) \quad (15)$$

که در آن، x و y مختصات طولی و ارتفاعی نقاط، D قطر دایره‌ی معادل فرم اولیه‌ی لاستیک، H ارتفاع موج، d عمق آب در پای سازه، T دوره‌ی تناوب موج، L طول تکیه‌گاه، u سرعت موج در راستای افقی، γ وزن مخصوص سیال و α زاویه‌ی گوه‌ی

جدول ۱. دسته‌بندی مدل‌های مورد بحث و تعیین مقادیر معلوم در هر دسته.

نوع مهار	نوع بارگذاری	تعداد المان‌ها	فشار داخلی سد (Pa)
دسته‌ی اول	مهار در دو نقطه	فشار داخلی	۳۰۰۰
دسته‌ی دوم	مهار در دو نقطه	فشار داخلی + فشار موج	۳۵۰۰
دسته‌ی سوم	مهار در یک نقطه	فشار داخلی	۳۰۰۰
دسته‌ی چهارم	مهار در یک نقطه	فشار داخلی + فشار موج	۳۵۰۰
دسته‌ی پنجم	بدون مهار	فشار داخلی	۳۰۰۰
دسته‌ی ششم	بدون مهار	فشار داخلی + فشار موج	۳۵۰۰

جدول ۲. دسته‌بندی مدل‌ها براساس تعداد اجرای مورد نیاز برای رسیدن به تعادل.

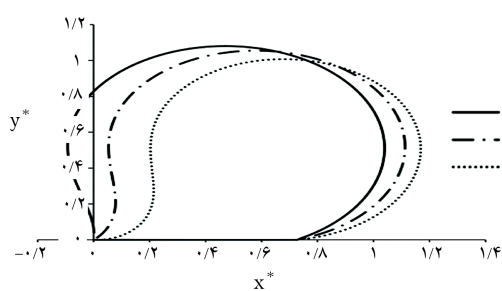
نوع مهار	نوع بارگذاری	تعداد اجرای مورد نیاز برای حصول تعادل
حالت اول	مهار در دو نقطه	فشار داخلی
حالت دوم	مهار در دو نقطه	فشار داخلی + فشار موج
حالت سوم	مهار در یک نقطه	فشار داخلی
حالت چهارم	مهار در یک نقطه	فشار داخلی + فشار موج
حالت پنجم	بدون مهار	فشار داخلی
حالت ششم	بدون مهار	فشار داخلی + فشار موج

جدول ۳. دسته‌بندی مدل‌های مورد بحث و تعیین مقادیر معلوم در هر دسته.

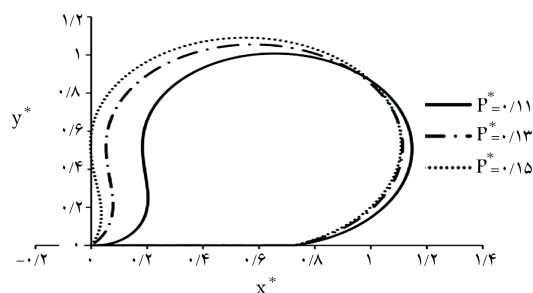
شماره‌ی گروه	دوره‌ی تناوب موج (S)	ارتفاع موج (m)	عمق آب (m)	طول تکیه‌گاه (برای حالت مهار شده در دو نقطه (m))	زاویه‌ی گوه (برای حالت بدون مهار) (درجه)	فشار داخلی سد (Pa)
۱	۱۰	۱	۱٫۳	۲	۶۰	متغیر
۲	۱۰	۱	متغیر	۲	۶۰	۳۵۰۰
۳	۱۰	متغیر	۱٫۳	۲	۶۰	۳۵۰۰
۴	متغیر	۱	۱٫۳	۲	۶۰	۳۵۰۰
۵	۱۰	۱	۱٫۳	متغیر	-	۳۵۰۰
۶	۱۰	۱	۱٫۳	-	متغیر	۳۵۰۰

مختلف ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ پاسکال تحت بارگذاری موج با مشخصات ثابت، دوره‌ی تناوب ۱۰ ثانیه، ارتفاع ۱ متر و عمق ۱٫۳ متری قرار گرفته و نتایج استخراج شده‌اند. قابل ذکر است که سایر پارامترها در این مقایسه ثابت بوده و تغییری نکرده‌اند. به منظور نمایش اثر فشار داخلی در تغییر شکل‌های تعادلی هر سه حالت، براساس نتایج آنالیز ابعادی و رابطه‌ی ۱۶، به جای فشار از پارامتری P^* و جهت نمایش مختصات هر نقطه از x^* و y^* استفاده شده است. از این رو مقدار P^* متناظر برای فشارهای داخلی ۳۰۰۰، ۳۵۰۰، ۳۹۰۰ و ۴۰۰۰ پاسکال به ترتیب برابر ۰٫۱۱، ۰٫۱۳، ۰٫۱۴ و ۰٫۱۵ بوده است. همان‌طور که در شکل ۷ - الف مشخص است، می‌توان با افزایش و کاهش فشار داخلی، ارتفاع تیوب را به میزان دلخواه تغییر داد و تیوب را در ترازهای مختلف بهره‌برداری کرد. در مورد تیوبی با مهار در یک نقطه، نیز یکی از اصلی‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل در شکل‌نمایی سازه، فشار داخلی است (شکل ۷ - ب). در بررسی صورت‌گرفته‌ی حاضر، اثر سه فشار داخلی مختلف ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ پاسکال در شکل تعادل یافته‌ی سازه نشان داده شده است. در این حالت، دوره‌ی تناوب موج ۱۰ ثانیه، ارتفاع موج ۱ متر و عمق آب ۱٫۳ متر بوده است. با توجه به شکل ذکر شده، مشخص است که فشار بیشتر، برافراستگی بیشتر تیوب را در پی داشته و فشارهای کمتر سبب خوابیدگی تیوب به

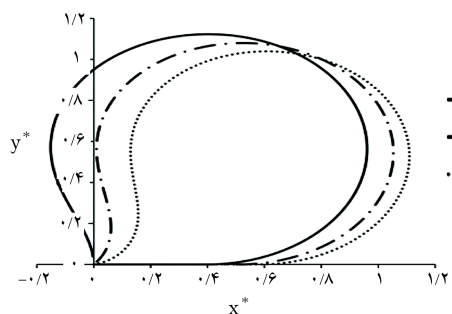
سمت پایین‌دست شده‌اند. مشابه دو مورد قبل سه فشار داخلی متفاوت ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ پاسکال درون تیوب در حالت بدون مهار اعمال و سایر مشخصات موج و سازه ثابت فرض شده‌اند. در این حالت به دلیل عدم وجود مهار در کف و تکیه‌ی تیوب به گوه، افزایش فشار باعث جلوتر رفتن تیوب داخل آب شده است، که دلیل آن افزایش حجم تیوب با توجه به افزایش فشار داخلی بوده است (شکل ۷ - ج). باید توجه داشت که تغییر فشار داخلی باعث پیش‌روی یا پس‌روی تیوب روی گوه نمی‌شود و هر سه تیوب در یک محل روی گوه قرار گرفته‌اند. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده همچنین نشان می‌دهد که استفاده از فشارهای بیشتر سبب باد شدن بیش از اندازه‌ی تیوب و در نتیجه واگرایی روند حل می‌شود. پارامتر دیگری که تأثیر آن در شکل‌نمایی سازه در حالت‌های مختلف بررسی شده، عمق آب است. جهت بررسی تأثیر پارامتر عمق آب در شکل تعادل یافته‌ی سازه، سازه‌ی مذکور با سه عمق متفاوت ۱، ۱٫۳ و ۱٫۴ متری تحت بارگذاری قرار گرفت. به منظور نمایش اثر عمق آب روی سه حالت مهار، از پارامتر d^* که بی‌بعد شده‌ی عمق آب است، استفاده شده است. لذا مقدار d^* متناظر برای عمق‌های آب ۱، ۱٫۳ و ۱٫۴ متر به ترتیب برابر ۰٫۳۶، ۰٫۴۷ و ۰٫۵۱ بوده است. در این حالت سایر پارامترها از قبیل: دوره‌ی تناوب، ارتفاع موج و فشار داخلی ثابت و به ترتیب برابر با



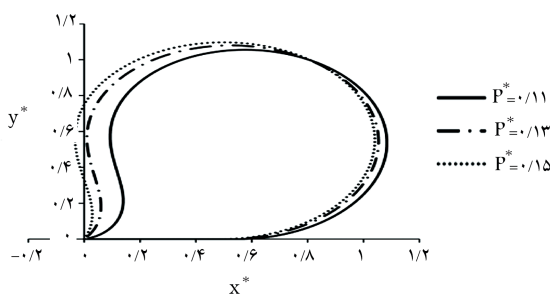
الف) مهار با دو نقطه؛



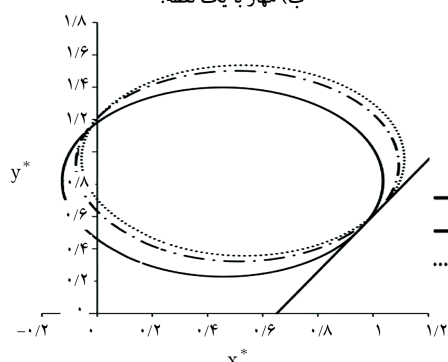
الف) مهار با دو نقطه؛



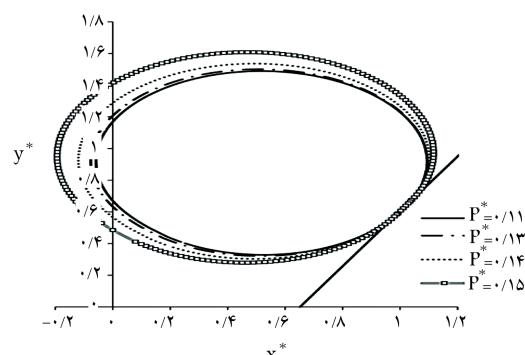
ب) مهار با یک نقطه؛



ب) مهار با یک نقطه؛



ج) بدون مهار و تکیه بر گوه.



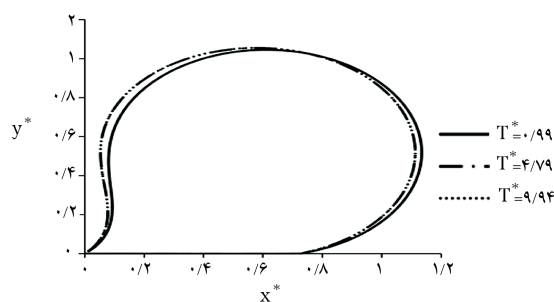
ج) بدون مهار و تکیه بر گوه.

شکل ۸. تأثیر عمق آب در شکل تعادل یافته تیوب در حالت های مختلف.

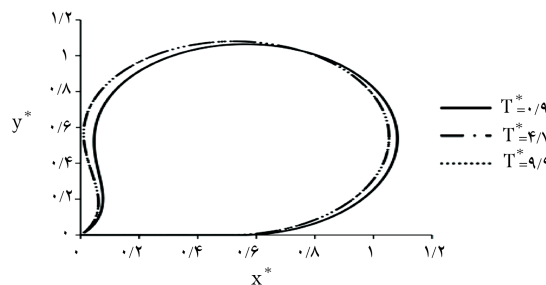
شکل ۷. تأثیر فشار داخلی در شکل تعادل یافته تیوب در حالت های مختلف.

با استفاده از این ویژگی و همین طور انتخاب طول مهار یا لنگر استفاده شده، به میزان لازم، محدودیت افزایش عمق آب و احتمال روگذری برای این نوع خاص از تیوب ها برداشته می شود. در نتیجه می توان از یک تیوب با مشخصه های ساختاری معین در محدوده وسیعی از عمق های آب، استفاده کرد. اثر تغییرات ارتفاع موج روی شکل تعادل یافته ی سازه بعد از اعمال بارگذاری در شکل های ۹ - الف تا ۹ ج - برای چهار ارتفاع موج ۰/۵، ۱، ۱/۴ و ۱/۶ متری، به ترتیب برای تیوب در حالت مهار با دو نقطه، تیوب در حالت مهار با یک نقطه و تیوب در حالت بدون مهار نشان داده شده است. به منظور نمایش اثر ارتفاع موج در سه حالت مهار شده، با توجه به رابطه ی ۱۶، به جای ارتفاع موج از پارامتر H^* ، که بی بعد شده ی پارامتر ارتفاع موج است، استفاده شده است. لذا مقدار H^* متناظر برای ارتفاع موج های ۰/۵، ۱، ۱/۴ و ۱/۶ متر به ترتیب برابر ۰/۱۸، ۰/۳۶، ۰/۵۱ و ۰/۵۸ بوده است. در این مورد، عمق آب ۱/۳ متر، دوره ی تناوب موج ۱۰ ثانیه و فشار داخلی ۳۵۰ پاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل های ۹ - الف و ۹ - ب، به خوبی مشخص است که تأثیر اثر ارتفاع موج نیز مشابه حالت قبل، یعنی اثر عمق آب، است و با افزایش ارتفاع موج، تیوب رو به عقب انحنای بیشتری پیدا کرده و به طرف پایین دست بیشتر خم شده است. در نتیجه ارتفاع بهره برداری آن نیز کاهش یافته

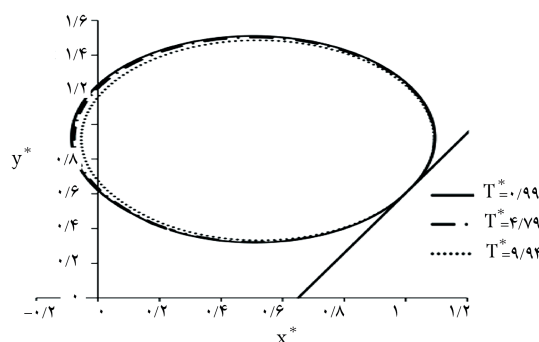
۱۰ ثانیه، ۱ متر، ۳۵۰ پاسکال در نظر گرفته شده اند. همان طور که در شکل ۸ - الف مشاهده می شود، افزایش عمق سبب خوابیدگی بیشتر تیوب رو به پایین دست شده است. در این مقایسه باید در نظر داشت که عمق آب را نمی توان از حد معینی بیشتر در نظر گرفت، چرا که سبب روگذری موج می شود. از دیگر پارامترهای مؤثر در شکل نهایی تیوب در حالت مهار با یک نقطه، عمق آب در پای سازه است. بررسی انجام شده با سه عمق ۱/۳، ۱/۴ و ۱ متری در شکل ۸ - ب مشاهده می شود، که مطابق آن کاملاً مشخص است که عمق آب بیشتر باعث خمیدگی بیشتر تیوب به سمت پایین دست شده است. در مقایسه ی انجام شده ی اخیر، دوره ی تناوب موج ۱۰ ثانیه، ارتفاع موج ۱ متر و فشار داخلی ۳۵۰ پاسکال در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج، در صورت مهار تیوب به کف، دست کم در یک نقطه، که باعث جلوگیری از غلتش تیوب می شود، با افزایش عمق آب در پای سازه، تیوب رو به پایین دست خمیده تر شده و ارتفاع نهایی آن که در واقع ارتفاع اجرایی تیوب است، کاهش یافته است. در شکل ۸ - ج به بررسی تأثیر عمق آب در شکل نهایی تیوب در حالت بدون مهار پرداخته شده است. در این حالت، افزایش عمق آب در پای سازه سبب پیش روی بیشتر تیوب روی گوه شده است. بر این اساس تیوبی، که عمق آب در بالادست آن بیشتر است، همواره بالاتر از نوع مشابه با عمق آب کمتر قرار می گیرد.



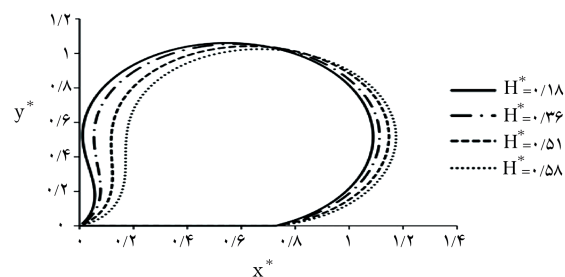
الف) مهار با دو نقطه؛



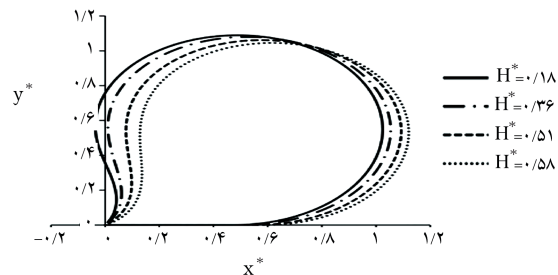
ب) مهار با یک نقطه؛



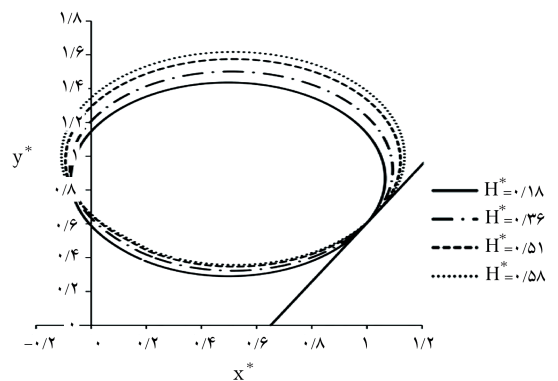
ج) بدون مهار و تکیه بر گوه.



الف) مهار با دو نقطه؛



ب) مهار با یک نقطه؛



ج) بدون مهار و تکیه بر گوه.

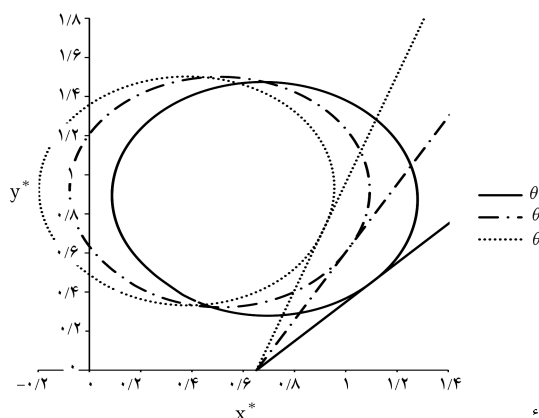
شکل ۹. تأثیر ارتفاع موج در شکل تعادل یافته‌ی تیوب در حالت‌های مختلف.

شکل ۱۰. تأثیر دوری تناوب موج در شکل تعادل یافته‌ی تیوب در حالت‌های مختلف.

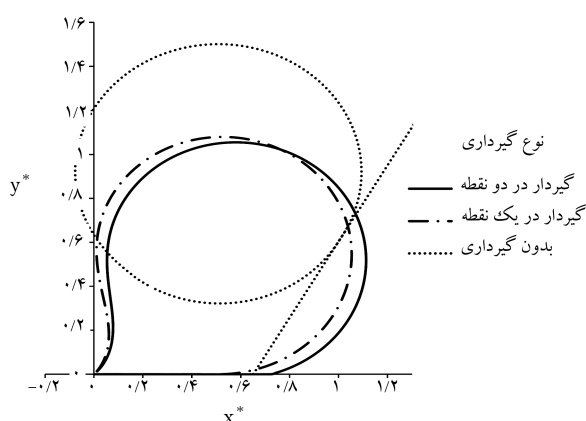
است. شکل ۹ - ج نشان می‌دهد که تیوب در حالت ارتفاع موج بیشتر، بالاتر از حالت مشابه با ارتفاع موج کمتر قرار گرفته است. لذا برای بهره‌برداری از تیوب در دو حالتی که به کف مهار شده است، محدودیت ارتفاع موج وجود دارد. ولی حالت سوم، یعنی تیوب بدون مهار به کف و با تکیه بر گوه، محدودیت ارتفاع موج را ندارد؛ زیرا با افزایش ارتفاع موج، تیوب نیز روی گوه‌ی بالاتر رفته است. البته در این حالت باید با نصب مهار یا لنگر در طول سازه، حرکت تیوب کنترل شود. در رسم نمودارهای ۹ - الف و ۹ - ب به بیشینه‌ی تراز آبی که می‌تواند جلوی سازه وجود داشته باشد، توجه شده است. به این معنا که ۱/۶ متر، نهایت ارتفاع موج برای سازه‌ی مذکور با مشخصات معین ذکر شده است، که می‌تواند باعث تعادل و همین‌طور همگرایی جواب‌ها شود.

در نتیجه با توجه به عمق آب ۱/۳ متری پای سازه و ارتفاع موج ۱/۶ متری، بیشینه‌ی تراز آب در بالادست تیوب‌های مذکور می‌تواند ۲/۱ متر باشد. بیشینه‌ی ارتفاع تیوب در دو حالت الف و ب به ترتیب برابر ۲/۸۳۳ متر برای شکل ۹ - الف و ۲/۸۸۸ متر برای شکل ۹ - ب بوده است. در نتیجه، نسبت مقدار بیشینه‌ی تراز آب در بالادست سازه، یعنی ۲/۱ متر به این مقادیر، درصد بیشینه‌ی تراز آب مجاز نسبت به ارتفاع بیشینه‌ی نهایی سازه، یعنی ۷۴/۱۱٪، در حالت مهار شده در دو نقطه و

که تغییرات دوری تناوب تأثیر زیادی در شکل نهایی و پایدار تیوب ندارد. بررسی اثر طول تکیه‌گاه در فرم تغییرشکل یافته‌ی سازه فقط برای مدل تیوب در حالت مهار شده به کف در دو نقطه انجام شده است. در مدل اخیر می‌توان طول مهار شده بین دو نقطه‌ی متصل به کف را به عنوان طول تکیه‌گاه در نظر گرفت. چرا که طول اشاره شده، قابلیت هیچ‌گونه حرکت و لغزشی را ندارد. طول تکیه‌گاهی مذکور، همان‌طور که قبلاً نیز بحث شد، فقط شامل یک المان است و



شکل ۱۲. تاثیر زاویه ی گوه در شکل تعادل یافته ی تیوب در حالت بدون مهار و تکیه بر گوه.



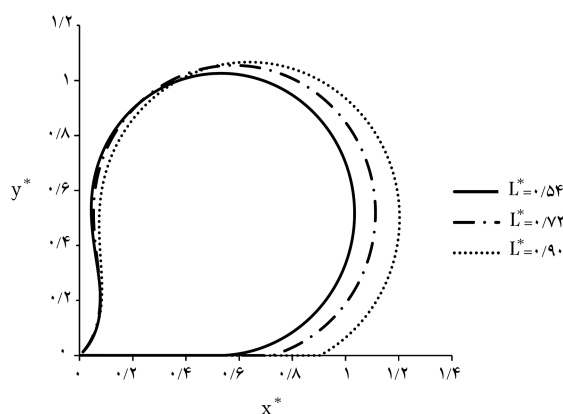
شکل ۱۳. تاثیر نوع مهار در شکل تعادل یافته ی تیوب.

تیوب است و تعداد نقاط اتصال به کف در درجه ی دوم اهمیت قرار دارد. ضمناً دو تیوب با مشخصات یکسان، یکی با مهار و دیگری بدون مهار ارتفاع، بهره برداری یکسانی ندارند و تیوب بدون مهار در ارتفاع بالاتری به شکل تعادل یافته ی خود رسیده و پایدار شده است. در نتیجه، تراز آب بالادست آن می تواند شامل محدوده ی وسیع تری از ارتفاع موج و عمق آب باشد.

در انتها می توان به منظور صحت سنجی نتایج مربوط به فرم پایدار و نهایی تیوب ها به بررسی انطباق نتایج حاصل از مدل سازی پژوهش حاضر و نتایج آزمایشگاهی بلوکسوم و همکاران^[۱۸] پرداخته شده است. بلوکسوم و همکاران تیوب های پُر شده ی از آب را در دو حالت در امتداد ساحل و با زاویه نسبت به ساحل بررسی کرده اند، که حالت در امتداد ساحل ایشان تا حدودی مشابه شرایط مدل سازی عددی پژوهش حاضر بوده است. مقایسه ی نتایج پژوهش حاضر و مدل سازی آزمایشگاهی بلوکسوم و همکاران نشان می دهد که از نظر فرم پایدار سازه ها، شباهت بسیار نزدیکی بین دو دسته ی نتایج وجود دارد.

مدل ساخته شده در آزمایش های بلوکسوم و همکاران به شکل لوله یی با ابعاد $22/8 \times 9/4 \times 30/4$ سانتی متر بوده و شرایط کلی مدل سازی ایشان در مقایسه با مدل سازی های پژوهش حاضر در جدول ۴ ارائه شده است.

مقایسه ی نتایج پژوهش حاضر و مدل سازی آزمایشگاهی بلوکسوم و همکاران^[۱۸] نشان می دهد که از نظر فرم پایدار سازه ها، شباهت بسیار نزدیکی بین دو دسته ی نتایج وجود دارد. به منظور مقایسه ی نتایج می توان به تاثیر ارتفاع موج در شکل



شکل ۱۱. تاثیر طول تکیه گاه در شکل تعادل یافته ی تیوب در حالت مهار با دو نقطه.

به منظور بررسی اثر آن، تیوب با سه طول مختلف برای تکیه گاه بارگذاری شده است در مدل سازی انجام شده، بخش آزاد تیوب برای طول های مختلف تکیه گاه، یکسان و از 16° المان با طول $0/5$ متر تشکیل شده است. در واقع، محیط آزاد در این حالت 8 متر است. به منظور نمایش اثر طول تکیه گاه روی سه حالت مهار شده، با توجه به رابطه ی 16 ، به جای طول اخیر از پارامتر L^* ، که بی بعد شده ی پارامتر طول تکیه گاه است، استفاده شده است. در شکل ۱۱، اثر تغییر طول تکیه گاه در شکل نهایی تیوب مشاهده می شود. مقدار L^* متناظر برای طول های تکیه گاهی 2 ، $1/5$ و $2/5$ متر به ترتیب برابر $0/54$ ، $0/72$ و $0/90$ بوده است. سایر متغیرها ثابت و مشابه حالت های قبل هستند. تحلیل شکل ۱۱ نشان می دهد که با افزایش طول تکیه گاه، انحنا و خمیدگی وجه پایین دست تیوب کمتر شده است. یعنی تیوب با طول مهار کمتر، با انحنای بیشتری به سمت پایین دست متمایل شده است. همچنین در شکل مذکور مشاهده می شود که با چینش و مساحت اولیه ی یکسان برای هر سه طول در نظر گرفته شده، تحت یک فشار داخلی مشخص، مساحت و محیط شکل نهایی و تعادل یافته ی تیوب برای طول های تکیه گاهی بیشتر، افزایش یافته و تیوب بیشتر تحت کشش قرار گرفته است.

اثر زاویه ی گوه فقط برای حالت سوم، یعنی تیوبی بدون مهار به کف و با تکیه بر گوه، مد نظر قرار گرفته است. زاویه ی گوه در تمامی نتایج ارائه شده در بخش های قبل، 6° درجه در نظر گرفته شده است. در بررسی پیش رو، زوایای 45° و 70° درجه نیز ارزیابی شده اند. فشار داخلی 350° پاسکال، دوره ی تناوب موج 10° ثانیه، ارتفاع موج 1 متر، و عمق آب $1/3$ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۱۲ نشان می دهد که زاویه ی گوه، تاثیر چندانی در شکل نهایی تیوب و محل قرار گرفتن آن روی گوه نداشته و در دسته ی موارد مهم تعیین کننده ی شکل نهایی تیوب قرار نداشته است. به منظور نشان دادن تفاوت های موجود در شکل نهایی تیوب با شرایط و مشخصه های یکسان و فقط تحت اثر تفاوت نوع مهار، شکل ۱۳ ارائه شده است. در مقایسه ی انجام شده، فشار داخلی برای هر سه مدل برابر 350° پاسکال و همچنین ارتفاع موج، عمق آب و دوره ی تناوب موج نیز به ترتیب مقادیری برابر 1 متر، $1/3$ متر و 10° ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به مقایسه ی ذکر شده مشخص است که تیوب مهار شده در یک نقطه، حالت برافراشته تری نسبت به تیوب مهار شده در دو نقطه دارد و در نتیجه، ارتفاع بهره برداری آن بیشتر و خمیدگی به سمت پایین دست آن کمتر بوده است. اما در کل تغییرات رخ داده خیلی محسوس نبوده و در شرایط یکسان، دو تیوب مذکور کارایی تقریباً مشابهی داشته اند. پس با توجه به این موضوع مشخص است که مسئله ی تاثیرگذار در شکل نهایی سازه، مهار بودن یا مهار نبودن

جدول ۴. مشخصات مدل‌های مورد بررسی در پژوهش بلوکسوم و همکاران، [۱۸] در مقایسه با مدل‌های بررسی شده در پژوهش حاضر.

ارتفاع موج (سانتی متر)		دورهی تناوب موج (ثانیه)		عمق آب (ثانیه)	
پژوهش	بلوکسوم و همکاران [۱۸]	پژوهش	بلوکسوم و همکاران [۱۸]	پژوهش	بلوکسوم و همکاران [۱۸]
پارامترهای مدل	۵/۰۸	۲	۲	۱۵/۲۴	۱۳۰
پارامترهای بی‌بعد شده	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۳۶	۰/۴۷

جدول ۵. اطلاعات مدل‌های آزمایشگاهی پژوهش بلوکسوم و همکاران، [۱۸]

ارتفاع مؤثر (سانتی متر)	دورهی تناوب موج (ثانیه)
۲/۱	۱/۹۴
۶	۱/۹۴
۱۲/۶	۲/۲۷

تعدادل یافته‌ی تیوب در حالت بدون مهار شکل ۹- ج اشاره کرد. بلوکسوم و همکاران، [۱۸] نیز آزمایش‌هایی به منظور بررسی تأثیر ارتفاع موج در پایداری مدل در ۳ بازه‌ی مختلف مطابق با جدول ۵ انجام داده‌اند. مطابق با نتایج ایشان، مدل‌های بررسی شده در دوره‌ی تناوب ۱/۹۴ ثانیه کاملاً پایدار بوده و در دوره‌ی تناوب ۲/۲۷ ثانیه دچار لغزش شده‌اند. به منظور امکان مقایسه، پارامترهای بررسی شده در هر دو پژوهش در جدول ۵ بی‌بعد شده‌اند. این در حالی است که در مدل‌سازی پژوهش حاضر به دلیل استفاده از هوا به عنوان سیال پُرکننده، تیوب سبک‌تر بوده و تحت ارتفاع موج‌های کمتری شروع به حرکت بر روی گوه کرده‌اند (شکل ۹ - ج).

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی فرم تعدادلی تیوب‌های لاستیکی در حالت دو بُعدی تحت بارگذاری امواج به عنوان موج‌شکن یا سازه‌ی ساحلی پرداخته شده است. برای این منظور از روش تفاضل مرکزی برای حل هم‌زمان معادلات سیال - سازه، حاکم بر تیوب‌های لاستیکی تحت اثر بارگذاری موج استفاده شده است. در ادامه، با هدف به دست آوردن شکل تعدادل یافته‌ی تیوب‌های لاستیکی به عنوان موج‌شکن، با استفاده از نرم‌افزار متلب، تیوب‌های لاستیکی به صورت دو بُعدی در حالت‌های مهار شده به کف در دو نقطه، مهار شده به کف در یک نقطه و بدون مهار مدل

شداند. در مدل‌سازی عددی انجام شده، به مسائلی نظیر نوع مهار، مشخصات موج وارده و پارامترهای سازه‌ی مؤثر در شکل تیوب توجه شده و اثر تغییرات آنها در شکل تعدادل یافته‌ی تیوب بررسی شده است. با بررسی پارامتر فشار و تأثیر تغییرات آن در شکل نهایی سازه در هر سه حالت مشاهده شد که در دو مورد نخست، که تیوب به پی خود متصل شده است، فشارهای بیشتر، برافراشتگی بیشتر تیوب را در پی دارد و فشارهای کمتر، سبب خوابیدگی تیوب به سمت پایین دست می‌شود. بررسی‌های انجام شده در پارامتر بی‌بعد عمق آب برای دو مدل گیردار نشان داد که در صورت مهار تیوب به کف، دست‌کم در یک نقطه، با افزایش عمق آب در پای سازه، تیوب رو به پایین دست خمیده‌تر شده و ارتفاع نهایی آن کاهش یافته است. بررسی‌ها نشان داد که تأثیر تغییرات ارتفاع موج نیز مشابه اثر عمق آب است و با افزایش ارتفاع موج، تیوب گیردار، بیشتر رو به عقب انحنا پیدا کرده و بیشتر به طرف پایین دست خم شده است. در نتیجه ارتفاع بهره‌برداری آن نیز کاهش پیدا کرده است. تحلیل اثر تغییر طول تکیه‌گاه در شکل نهایی تیوب نشان داد که با افزایش طول تکیه‌گاه، انحنا و خمیدگی وجه پایین دست تیوب کمتر شده است. تیوب گیردار شده در یک نقطه، حالت برافراشته‌تری نسبت به تیوب گیردار شده در دو نقطه داشته و در نتیجه ارتفاع بهره‌برداری آن بیشتر و خمیدگی به سمت پایین دست آن کمتر شده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که برای دو تیوب با مشخصات یکسان، تیوب بدون مهار در ارتفاع بالاتری به شکل تعدادل یافته‌ی خود می‌رسد و پایدار می‌شود؛ هر چند برای اجرای تیوبی در حالت بدون مهار، نیاز به استفاده از گوه، لایه‌ی محافظ، و نوعی لنگر یا مهار است. از طرف دیگر، استفاده از تیوب‌های بدون مهار، امکان جمع‌آوری راحت و ساده و انتقال سریع تیوب به محل‌های دیگر را فراهم می‌کنند. با کنترل طول مهار امکان استفاده از تیوب‌های بدون مهار برای محدوده‌ی گسترده‌تری از ارتفاع موج و عمق وجود دارد. با وجود این، ویژگی‌ها باید شرایط محل بهره‌برداری، آنالیز و نوعی که کارایی بهتر و مناسب‌تری دارد، انتخاب شود.

پانویس‌ها

1. Geotextile
2. Alvarez
3. Yucatan
4. Mexico
5. Polypropylene
6. Kim
7. apron

8. MATLAB
9. central difference method
10. explicit integration method
11. Houbolt method
12. Wilson method
13. Newmark method
14. implicit integration method
15. apron
16. Keulegan-Carpenter

منابع (References)

1. Costal Engineering Research Center (CERC), "Shore protection manual", *U.S., Army Corps of Engineers*, Washington DC, **I,597, II,603**, (1984).
2. Goda, Y. "Random wave interaction with structures", *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, **1**, ed.J.B. Herbich.Gulf, Houston (1990).
3. CIRIA/CUR, *Manual on The Use of Rock in Coastal and Shoreline*, CUR Report 154, Gouda, the Netherlands, CIRIA Special Publication pp. 83, London, UK (1991).
4. Sannasiraj, S.A., Sundar, V. and Sundaravadivelu, R. "Mooring forces and motion responses of pontoon-type floating breakwaters", *Ocean Engineering*, **25**(1), pp. 27-48 (1996).
5. Mays, T.W., Plaut, R.H. and Liapis, S. "Three-dimensional analysis of submerged moored cylinders used as breakwaters", *Ocean Engineering*, **26**(12), pp. 1311-1333 (2000).
6. Zheng, Y.H., You, Y.G. and Shen, Y.M. "On the radiation and diffraction of water waves by a rectangular buoy", *Ocean Engineering*, **31**(8-9), pp. 1063-1082 (2004).
7. Gesraha, M. "Analysis of II shaped floating breakwater in oblique waves: impervious rigid wave boards", *Applied Ocean Research*, **28**(5), pp. 327-338 (2006).
8. Wang, H.Y. and Sun, Z.C. "Experimental study on the influence of geometrical configuration of porous floating breakwater on performance", *Journal of Marine Science and Technology*, **18**(4), pp. 574-579 (2010).
9. [https://www.fibromat.com.my/product/geotube s/](https://www.fibromat.com.my/product/geotube%20s/)
10. Alvarez, I.E., Rubio, R. and Ricalde, H. "Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico", *Geotextiles and Geomembranes*, **25**(4-5), pp. 233-241 (2007).
11. Kim, M., Freeman, M., FitzPatrick, B.T. and et al. "Use of an apron to stabilize geomembrane tubes for fighting floods", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(4), pp. 239-254 (2004).
12. Ghavanloo, E. and Daneshmand, F. "Two-dimensional analytical analysis of equilibrium shape of inflated geomembrane tubes resting on rigid foundation with arbitrary shape", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), pp. 99-106 (2008a).
13. Ghavanloo, E. and Daneshmand, F. "Two-dimensional static analysis and equilibrium shapes of air filled geomembrane tubes resting on straight and parabolic rigid foundation", *Proceedings of 12th International and 16th Annual Mechanical Engineering Conference, Kerman, Iran*, pp. 1165-1166 (2008b).
14. Ghavanloo, E. and Daneshmand, F. "A semi-analytical approach for the nonlinear two-dimensional analysis of fluid-filled thin-walled pliable membrane tubes", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, **28**(3), pp. 626-637 (2009).
15. Ghavanloo, E. and Daneshmand, F. "Analytical analysis of the static interaction of fluid and cylindrical membrane structures", *European Journal of Mechanics A/Solids*, **29**(4), pp. 600-610 (2010).
16. Cheraghi-Shirazi, N., Kabiri-Samani, A.R. and Bo-roomand, B. "Numerical analysis of rubber dams using fluid-structure interactions", *Flow Measurement and Instrumentation*, **40**(6), pp. 91-98 (2014).
17. Cheraghi-Shirazi, N., Kabiri-Samani, A.R. and Bo-roomand, B. "Flow field over the rubber dams based on fluid-structure interactions", *Amirkabir J. Civil Eng.*, **49**(3) pp. 477-486 (2017).
18. Bloxom, A., Yim, S., Medellin, A. and et al. "Modeling & Testing of Inflatable Structures for Rapidly Deployable Port Infrastructures", Bethesda, MD: Naval Surface Warfare Center Carderock, Division (2011).
19. Kiran, A.S., Vijaya, R. and Sivakholundu, K.M. "Stability analysis and design of offshore submerged breakwater constructed using sand filled geosynthetic tubes", *Procedia Engineering*, **116**(1), pp. 310-319 (2015).
20. Jamshidi, J. "Optimization of production parameters of geotextiles used for shoreline protection", *Research Journal of Textile and Apparel*, **19**(2), pp. 9-15 (2015).
21. Sorensen, R.M. "Basic coastal engineering", *Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania* (1990).
22. Bathe, K.J. "Finite element procedures", *Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA* (1996).
23. Huong, T.C., Plaut, R.H. and Filz, G.M. "Wedge geomembrane tubes as temporary flood-fighting devices", *Thin-Walled Structures*, **40**(11), pp. 913-923 (2002).