

مطالعه آزمایشگاهی رفتار هیدروالاستیک سازه‌های شناور بسیار بزرگ پیوسته و چند جزئی با اتصال مفصلی در برابر امواج

علی پریزاده^۱، محمد جواد خانجانی^{۲*}، مسعود رضایی زاده^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۲. استاد، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

mkhanjani@uk.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۳/۱۲]

چکیده - رفتار هیدروالاستیک نقش موثری در طراحی و ساخت سازه‌های شناور بسیار بزرگ دارد. معمولاً این سازه‌ها به صورت اجزای جدا از هم بیرون از دریا ساخته می‌شوند و با اتصال صلب در محل نصب به یکدیگر متصل می‌شوند. راه‌های مختلفی برای کاهش جابه‌جایی و تنش در اثر برخورد موج به سازه وجود دارد؛ اتصال اجزا سازه به یکدیگر با اتصالات مفصلی یکی از راه‌های کاهش پاسخ هیدروالاستیک است. در این مقاله رفتار هیدروالاستیک سازه‌ی یکپارچه، سازه‌های متشکل از دو و سه بخش به صورت آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مدل آزمایشگاهی از جنس آلومینیوم با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲، ۰/۵۵، ۰/۰۴ متر ساخته شد. اتصال بین بخش‌ها به صورت مفصل مدل شد. در یک مخزن تولید موج، کرنش‌ها و جابه‌جایی قائم مدل آزمایشگاهی در نقاط مختلف آن اندازه‌گیری شده است. موج‌های ایجاد شده، منظم و دارای دوره تناوب ۰/۶۷، ۰/۸۰، ۰/۹۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۰ ثانیه بوده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در هر یک از مدل‌ها، جابه‌جایی در امواج با طول بلندتر بیشتر است. همچنین تنش در مدل‌های دارای اتصال، نسبت به مدل پیوسته، کاهش چشم‌گیری داشته و مقدار آن تقریباً نصف شده است. در امواج با دوره تناوب ۰/۶۷ و ۰/۸۰ ثانیه، مدل سه جزئی و در سه موج دیگر، مدل یکپارچه دارای جابه‌جایی کمتری بوده است. در مورد سه موج آخر (موج‌های با طول بلند) می‌توان گفت در صورتی که جابه‌جایی سازه در حد مجاز باشد؛ برای کاهش تنش، بهتر است از اتصال در سازه استفاده شود.

واژگان کلیدی: رفتار هیدروالاستیک، سازه چند بخشی، اتصال مفصلی، سازه شناور بسیار بزرگ.

۱- مقدمه

و با امواج بلند استفاده می‌شوند. در مقابل نوع شناور آنها یا پانتون‌ها^۲ مانند یک صفحه بزرگ روی سطح آب باقی می‌ماند. سازه‌های شناور بیشتر برای آب‌های آرام مانند برکه‌ها، خلیج‌ها و خطوط ساحلی مناسب است [۱]. فناوری ساخت سازه‌های شناور بسیار بزرگ، شرایط ایجاد زمین

سازه‌های شناور بسیار بزرگ^۱ در دو نوع نیمه شناور و شناور ساخته می‌شوند. سازه نیمه شناور با استفاده از ستون‌های لوله ای شکل یا المان‌های سازه‌ای متعادل کننده، بالای سطح آب نگه داشته می‌شود. این نوع از سازه برای شرایط دریایی ناآرام

در دریا را بدون نیاز به حجم زیاد خاکریزی فراهم کرده است [۲]. ساخت این نوع سازه‌ها توجه بسیاری از پژوهشگران و مهندسان را در زمینه صنایع دریایی و فراساحلی به خود جلب کرده است. پژوهشگران، سازه‌های شناور بسیار بزرگ را برای کاربری‌های مختلفی از جمله فرودگاه، پل شناور، موج‌شکن، اسکله، لنگرگاه، امکانات سرگرمی و تفریحی، پایگاه‌های نظامی فرا ساحلی و حتی برای سکونت پیشنهاد کرده‌اند [۳].

پژوهشگران روش‌های مختلفی برای کاهش جابه‌جایی و تنش در مقابل موج پیشنهاد کرده‌اند. راه حل رایج، ساخت موج‌شکن^۱ در اطراف سازه شناور است [۴]. از دیگر راه‌کارها که به وسیله‌ی تکاگی و همکاران در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد شد؛ اتصال یک جسم صلب جعبه‌ای شکل به لبه‌های سازه شناور بود. بدین وسیله؛ بازتاب موج‌های وارده شده، موجب کاهش چشم‌گیر تغییر شکل‌ها و تنش‌ها در سازه شناور بسیار بزرگ می‌شود [۵]. همچنین از صفحات متصل به سازه با شکل‌های مختلف به عنوان ابزارهای ضد حرکت^۲ استفاده شده است [۶]. کربکین در سال ۲۰۰۲ یک سازه شناور کمکی را با اتصال مفصلی و نیمه صلب به سازه اصلی متصل و رفتار هیدروالاستیک را بررسی نمودند [۷]. کیم و همکاران در سال ۲۰۰۵ رفتار هیدروالاستیک سازه شناور را با در نظر گرفتن شکل و توزیع سختی سازه مورد بررسی قرار دادند. ایشان متوجه این امر شدند که اگر دو سازه شناور کمکی همراه سازه اصلی وجود داشته و سازه‌ها دارای شکل نیم دایره باشند، بیشترین کاهش جابه‌جایی رخ می‌دهد. همچنین با افزایش سختی خمشی سازه کمکی، کاهش پاسخ هیدروالاستیک بیشتر می‌شود [۸]. علاوه بر این ریانسیا و همکاران در سال ۲۰۱۰ طراحی اتصال برای کاهش رفتار هیدروالاستیک یک سازه شناور را با اتصال تیرها به هم بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اتصال نیمه صلب در کاهش رفتار هیدروالاستیک بسیار موثر است [۹]. معصومی و همکاران در سال ۱۳۸۸ نوع شکل سازه شناور را در آزمایشگاه بررسی و نتایج را با مدل ریاضی مقایسه نمودند [۱۰]. همچنین در سال ۱۳۹۰، شجاع و همکاران با

اندازه‌گیری جابه‌جایی سازه شناور در آزمایشگاه و استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدلی برای جابه‌جایی سازه شناور ارائه کردند [۱۱]. رضایت در سال ۱۳۹۲ به شکل آزمایشگاهی با اتصال صفحه ضد موج به جلوی سازه شناور و بررسی امواج مختلف، زاویه ۶۰ درجه را برای صفحه مایل مناسب معرفی کرده [۱۲]. سازه‌های شناور بسیار بزرگ معمولاً به صورت اجزای کوچکتر ساخته می‌شوند. سپس در محل مورد نظر در دریا به وسیله جوش یا اتصالات صلب به یکدیگر متصل می‌شوند [۳]. لی و نیومن در سال ۲۰۰۰، سازه شناور پنج جزئی را با اتصال مفصلی بررسی و معیاری برای سختی سازه و رفتار هیدروالاستیک آن ارائه کردند [۱۳]. در سال ۲۰۰۷، فو و همکاران اتصال صلب و نیمه صلب را با روش عددی با یکدیگر مقایسه نمودند [۱۴]. گاؤ و همکاران در سال ۲۰۱۰ اتصال انعطاف‌پذیر را با روش عددی مورد مطالعه قرار دادند و محل بهینه اتصال در طول سازه را برای طول موج‌های مختلف محاسبه کردند [۱۵]. همچنین در سال ۲۰۱۳ با ترکیب اتصال مفصلی و سلول‌های گیل^۳ (قسمت‌هایی از سازه است که با نفوذ آب به داخل آنها نیروی شناوری زیر سازه حذف شده و اختلاف خیز^۴ در آن را کاهش می‌دهد). با روش عددی رفتار هیدروالاستیک را بررسی نمودند [۱۶].

تئوری‌های مختلفی برای پیش‌بینی پاسخ هیدروالاستیک سازه‌های پیوسته توسعه یافته است. برای مدل‌های فضایی ساده مثل تیر و صفحه مدل‌های یک، دو و سه بعدی تئوری الاستیسیته توسعه داده شده‌اند. تعدادی از این تئوری‌ها به شکل تحلیلی بررسی شده‌اند و در بسیاری از پژوهش‌ها از روش‌های عددی برای حل مسائل استفاده شده است [۱۴]. در ادامه با انجام آزمایش رفتار هیدروالاستیک سازه یکپارچه^۵ و چند جزئی که با اتصال مفصلی بهم متصل شده‌اند؛ بررسی می‌شود. برای این کار نمونه‌ای با ابعاد ۲۰۰×۵۵×۴ سانتی‌متر ساخته شد. آزمایش‌ها برای سه مدل؛ یکپارچه، دو و سه جزئی با ۵ موج با دوره تناوب مختلف انجام شد. با اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و

3 Gill Cells

4 Difference Deflection

5 Continuous Structure

1 Breakwater

2 Anti Motion

تامین شناوری از پلی اتیلن به ضخامت ۴ سانتی متر در زیر ورق آلومینیومی استفاده شده است.

از سختی پلی اتیلن به دلیل کم بودن چشم پوشی می شود. در نتیجه ممان اینرسی مقطع ورق برابر است با:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.00125^3}{12} \times 0.55 = 8.952 \times 10^{-11} \text{ m}^4 \quad (1)$$

در رابطه بالا، b عرض مقطع، h ضخامت مقطع و I ممان اینرسی مدل است. با در نظر گرفتن مدول یانگ برابر ۷۰ مگاپاسکال برای ورق آلومینیوم، مقدار EI مدل برابر ۶/۲۶ نیوتن متر مربع خواهد شد.

سه مدل برای انجام آزمایش در نظر گرفته شدند. مدل اول بدون اتصال در طولش بود و به صورت پیوسته ساخته شد؛ و در مدل دو قسمتی اتصال مفصلی به صورت یک خط عرضی وسط آن قرار داشت؛ و مدل سوم از سه بخش که با لولا به یکدیگر متصل می شدند، تشکیل شده است.

در شکل ۲ مدل دو قسمتی که از دو قطعه یک متری آلومینیومی به همراه پلی اتیلن^۳ با لولا به هم متصل شدند؛ نشان داده شده است.



شکل (۲) مدل دو جزئی سازه شناور که با دو لولا به هم وصل شده اند، طول هر جزء یک متر است.

مدل سه قسمتی از چسباندن سه قطعه ورق آلومینیومی به طول ۶۷ سانتی متر و ۴ سانتی متر پلی اتیلن تهیه شد. این سه قطعات نیز با دو ردیف لولا به یکدیگر متصل شدند. شکل ۳ مدل سه جزئی را نمایش می دهد. برای جلوگیری از اصطکاک، لولاها با گریس، روانکاری شده اند.

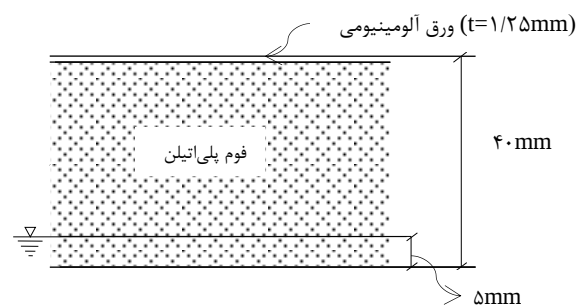
تنش ها در قسمت های مختلف مدل آزمایشگاهی رفتار مدل ها با یکدیگر مقایسه می شوند.

۲- مدل آزمایشگاهی

مشخصات هندسی و سازه ای یک مدل باید به گونه ای باشد که نتایج آزمایش ها بیانگر رفتار سازه ای واقعی آن باشد. مهمترین ویژگی سازه شناور بسیار بزرگ رفتار هیدرواستاتیک آن است. یکی از تاثیرگذارین پارامترها در چگونگی رفتار مدل سازه شناور بسیار بزرگ، سختی خمشی^۱ آن است و باید به اندازه ای باشد که مدل، بطور الاستیک عمل کند [۱]. برای شبیه سازی رفتار سازه شناور از ابعاد و ویژگی های سازه شناور دارای طول ۳۰۰ متر و عرض ۶۰ متر و سختی خمشی $4/77 \times 10^{11}$ نیوتن متر مربع استفاده شده است [۱۷]. نسبت سختی خمشی در مدل و نمونه واقعی^۲ به صورت زیر محاسبه می شود [۱]:

$$EI_p = \alpha^5 EI_m \quad (1)$$

در رابطه بالا، EI_p سختی خمشی نمونه واقعی؛ EI_m سختی خمشی مدل و α نسبت مقیاس است.



شکل (۱) مقطع عرضی مدل فیزیکی ساخته شده از جنس آلومینیوم و پلی اتیلن

مقیاس ۱/۱۵۰ برای ساخت مدل در آزمایشگاه استفاده شد. با توجه به رابطه (۱)، سختی مدل باید ۶/۲۸ نیوتن بر متر مربع باشد. برای تامین این سختی مدلی یک لایه از جنس آلومینیوم به ضخامت ۱/۲۵ میلی متر و ابعاد ۲۰۰/۵۵ متر انتخاب شد. همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می شود؛ برای

1 Bending Rigidity

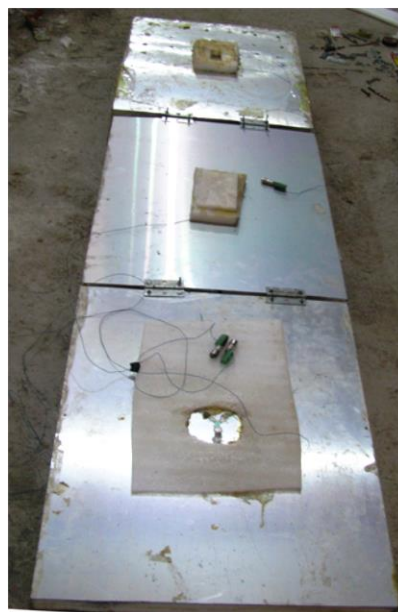
2 Prototype

3 Polyethylene

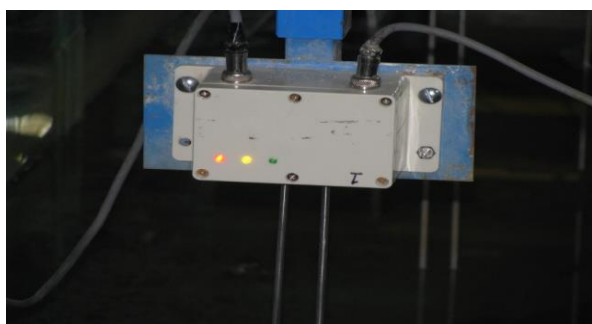
۱۶ متر، عرض و ارتفاع یک متر است. فلوم دارای یک دستگاه موج‌ساز^۱ است که توانایی ساخت موج‌های منظم^۲ و نامنظم با ارتفاع و طول‌های مختلف را دارد. آزمایشگاه دارای سنسورهای اندازه‌گیری سطح آب، جابه‌جایی سنج قائم مدل و کرنش سنج^۳ دینامیکی است. شکل ۴ نمایی از فلوم آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۳-۱- موج‌سنج

موج‌سنج^۴ یا شاخص موج یک ابزار دقیق برای اندازه‌گیری لحظه به لحظه ارتفاع سطح آب است. از این رو برای ارزیابی موج ساخته شده ابزاری مناسب است (شکل ۵). پنج عدد از این سنسورها در فاصله‌های ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۳ متری از دستگاه موج‌ساز در طول فلوم نصب شده‌اند.



شکل (۳) مدل سه جزئی سازه شناور با لولا به هم وصل شده‌اند، طول هر جزء ۶۷ سانتی متر است و کرنش سنج‌ها در وسط هر جزء نصب شده‌اند.



شکل (۵) سنسور موج سنج، پنج عدد از این سنسور در طول کانال بصورت متوالی به یکدیگر و دستگاه گیرنده موج‌ساز در ارتباط هستند.

۳-۲- سنسورهای جابه‌جایی سنج مدل

برای ثبت جابه‌جایی قائم مدل بر اثر برخورد موج، از سنسورهای التراسونیک^۵ استفاده شده است. این سنسورها، برای برآورد فاصله، از امواج مافوق صوت استفاده می‌کنند و دارای دقت ۰/۱ میلی‌متر است. همچنین می‌تواند هر میلی‌ثانیه جابه‌جایی قائم سطح مدل را ثبت کنند (شکل ۶).

۳-۳- کرنش سنج

در مدت انجام آزمایش‌ها از کرنش سنج دینامیکی سه محوره دارای شبکه‌بندی دلتا استفاده شده است. مدل کرنش‌سنج



شکل (۴) نمایی از فلوم آزمایشگاه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته با طول ۱۶ متر، عرض و ارتفاع یک متر

۳- آزمایشگاه و تجهیزات اندازه‌گیری

آزمایش‌ها در آزمایشگاه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان انجام شد. فلوم آزمایشگاه دارای طول

- 1 Wave Generation
- 2 Regular Wave
- 3 Strain Gage
- 4 Wave Probe
- 5 Ultrasonic

TML و نوع آن FRS-2-23 است. مدل دستگاه ثبت کننده کرنش ها DC-104R بوده (شکل ۶) و در هر ثانیه ۱۰۰ داده مربوط به کرنش را ثبت کرد. لازم به ذکر است برای بالا بردن دقت و کاهش مقاومت از سیم هایی با جنس نقره استفاده شد.



شکل (۶) تصویر سمت راست، دستگاه مبدل سنسورهای التراسنیک؛

تصویر سمت چپ دستگاه ثبت کننده کرنش سنج دینامیکی

جدول (۱) ویژگی امواج وارد بر مدل در آزمایشگاه

ویژگی موج	موج ۱	موج ۲	موج ۳	موج ۴	موج ۵
نسبت طول موج به طول سازه $(-\lambda/L)$	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۶۵	۰/۸۰	۰/۹۵
طول موج λ (m)	۰/۷۰	۱/۰۰	۱/۳۰	۱/۶۰	۱/۹۰
پریود موج T (s)	۰/۶۷	۰/۸۰	۰/۹۱	۱/۰۱	۱/۱۰
ارتفاع موج h (cm)	۲				
زاویه موج (deg) -	۹۰°				

۶- شرح آزمایش

آزمایش اتصالات برای پنج موج با ویژگی های ذکر شده در قسمت قبل انجام شد. مدل های بدون اتصال، دو جزئی و سه جزئی در فلوم با عمق آب ۷۰ سانتی متر مورد آزمایش واقع شدند. در مدل یکپارچه جابه جایی ها پنج نقطه در طول آن و کرنش دو سر و وسط اندازه گیری شد. جابه جایی مدل دو جزئی در محل مفصل و وسط هر جزء و دو سر مدل اندازه گیری شد. در این مدل کرنش در وسط هر جزء و دو سر مدل ثبت شد. در مدل سه جزئی جابه جایی دو سر و وسط هر جزء (مجموعاً ۷ نقطه در طول مدل) اندازه گیری شد. همچنین با نصب کرنش سنج در وسط اجزاء، کرنش ها در آن نقاط اندازه گیری شد.

۷- بحث و تحلیل نتایج

در بررسی جابه جایی در مدل شناور یکپارچه و چند بخشی، ابتدا جابه جایی همه امواج برای هر یک از مدل های یکپارچه، دو و سه قسمتی در نمودارهای مجزا رسم شده است، (شکل های ۷ تا ۹). با مقایسه جابه جایی مدل های مختلف در امواج پنج گانه، این نتیجه برداشت می شود که جابه جایی در اثر موج های با طول بلندتر؛ موج های چهارم و پنجم (موج با دروه تناوب های ۱/۰۱ و ۱/۱ ثانیه) در هر سه مدل از سایر امواج بیشتر است. در شکل ۱۲ که مربوط به

با توجه به ناچیز بودن تنش محوری در محور عرضی و تنش برشی با استفاده از رابطه های زیر ممان خمشی سطح مدل محاسبه می شود [۱]:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2)$$

$$M = EI \varepsilon / c \quad (3)$$

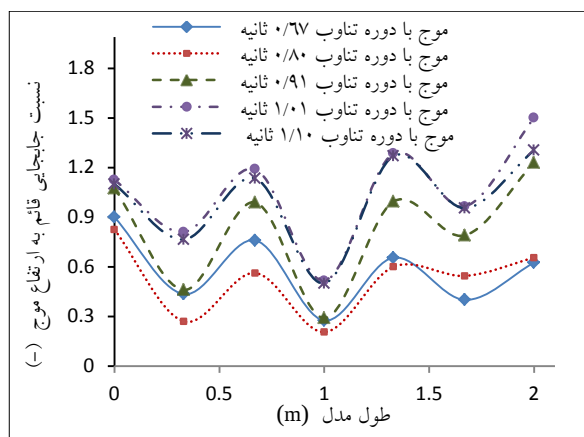
در رابطه های بالا، M لنگر خمشی؛ EI سختی خمشی؛ c فاصله تار خشی مقطع تا دورترین تار مقطع؛ σ تنش و ε کرنش مدل است.

۵- مشخصات موج

موج های تولید شده در آزمایشگاه از نوع سینوسی و منظم بوده اند. راستای آن ها بر عرض مدل عمود بود. نسبت طول موج ها به طول سازه ۰/۳۵، ۰/۵، ۰/۶۵، ۰/۸، ۰/۹۵ و انتخاب شدند. با توجه به اینکه طول مدل ۲ متر است، طول موج ها ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰ و ۱۹۰ سانتی متر است. با استفاده از رابطه (۴) که به رابطه پراکنش^{۱۱} معروف است، دوره تناوب موج ها محاسبه می شوند [۱۸]:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (4)$$

در رابطه بالا h عمق آب؛ λ طول موج؛ g شتاب گرانش زمین و T ، دوره تناوب موج است. موج ها با ارتفاع ۲ سانتی متر در آزمایشگاه ساخته شدند. در جدول (۱) ویژگی امواج آورده شده است.



شکل (۹) جابه‌جایی قائم در طول مدل سه قسمتی (دو اتصال مفصلی در طول مدل) در اثر اعمال موج‌های با دوره تناوب مختلف

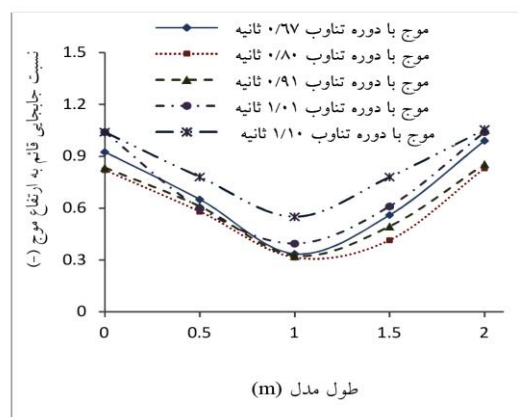
در ادامه برای هر یک از موج‌ها جابه‌جایی در طول سه مدل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از آنجایی که در هر یک از حالت‌ها با توجه به محل قرارگیری لولاهای، یک نقطه ممکن است دارای جابه‌جایی بیشتر در یک مدل باشد و در مدل دیگر کمترین جابه‌جایی را داشته باشد؛ نمی‌توان تک‌تک نقاط در مدل‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. برای مقایسه بین حالات مختلف از مقادیر بیشترین جابه‌جایی در طول مدل و یک پارامتر بی‌بعد استفاده می‌شود. پارامتر بی‌بعد بیانگر سطح زیر نمودار جابه‌جایی مدل است [۱۵]. چون محور قائم نمودارهای جابه‌جایی بی‌بعد است، با محاسبه مساحت زیر نمودار و تقسیم آن به طول سازه پارامتر بی‌بعد به دست می‌آید.

شکل ۱۰ مربوط به جابه‌جایی در اثر موج اول با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه است. در این موج بیشینه جابه‌جایی به انتهای مدل یکپارچه اختصاص دارد. شاخص سطح زیر نمودار برای مدل یکپارچه و دو جزئی ۰/۶۲۵ و مدل سه بخشی ۰/۴۳۲ است. این اعداد نشان می‌دهند در این طول موج، مدل سه قسمتی دارای وضعیت بهتری از لحاظ مقدار جابه‌جایی بوده و بیشینه جابه‌جایی در آن کاهش یافته است.

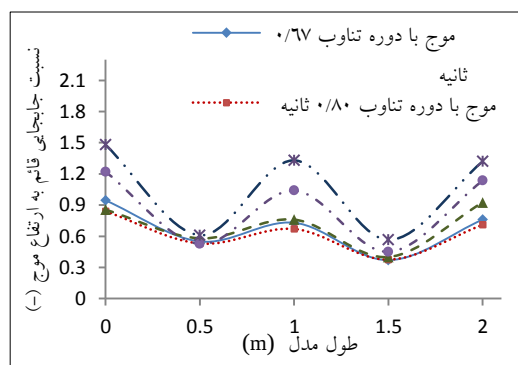
جابه‌جایی قسمت‌های مختلف در مدل‌ها در اثر موج دوم (نسبت طول موج به طول سازه برابر ۰/۵) در شکل ۱۱ رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ در ابتدای سازه مقادیر جابه‌جایی تقریباً با یکدیگر برابرند ولی در انتهای مدل‌ها بیشینه جابه‌جایی مربوط به مدل یکپارچه است. شاخص سطح زیر منحنی جابه‌جایی برای مدل‌های یکپارچه، دو و سه قسمتی به ترتیب ۰/۵۳۴، ۰/۵۷۸ و

مدل یکپارچه است، بیش‌ترین جابه‌جایی در لبه‌ها اتفاق افتاده است. هر چند بیش‌ترین جابه‌جایی در طول مدل مربوط به موج با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه است ولی اختلاف بین بیش‌ترین و کم‌ترین جابه‌جایی تقریباً ۰/۲ ارتفاع موج است.

با توجه به جابه‌جایی در سازه دو قسمتی در اثر پنج موج مورد آزمایش که در شکل ۸ رسم شده است؛ می‌توان دریافت بیش‌ترین جابه‌جایی در هر مدل به ترتیب در ابتدا، انتها و وسط مدل اتفاق افتاده است. این بدین معناست که جابه‌جایی وسط که محل قرارگیری لولا است، از طرفین مدل کمتر بوده است. با دقت در روند جابه‌جایی در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان گفت اختلاف جابه‌جایی در اثر برخورد موج پنجم با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه و موج دوم با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه در مدل‌های دارای اتصال مفصلی تقریباً ۰/۶۵ ارتفاع موج است. همچنین با توجه به داده می‌توان گفت جابه‌جایی در موج‌های با طول بلند دو برابر موج‌های با طول کوتاه است.



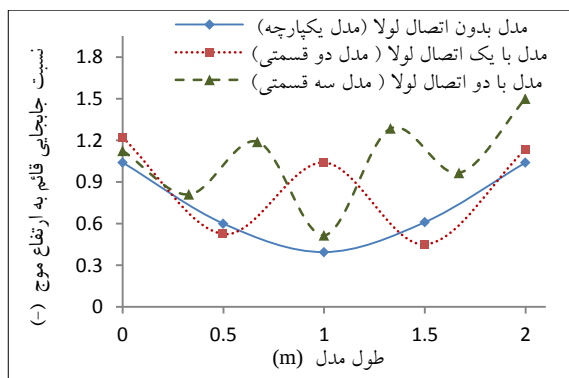
شکل (۷) جابه‌جایی قائم در طول مدل یکپارچه (بدون اتصال مفصلی) در اثر اعمال موج‌های با دوره تناوب مختلف



شکل (۸) جابه‌جایی قائم در طول مدل دو قسمتی (یک اتصال مفصلی در وسط مدل) در اثر اعمال موج‌های با دوره تناوب مختلف

با توجه به جابه‌جایی مدل در شکل ۱۲ بر اثر موج با دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه می‌توان دریافت که جابه‌جایی بیشینه در مدل سه قسمتی از دو حالت دیگر بیشتر شده است. شاخص سطح زیر نمودار برای مدل یکپارچه ۰/۵۶۹، مدل دو قسمتی ۰/۶۵۷ و مدل سه جزئی ۰/۶۴۵ حساب شده‌اند. با توجه شاخص‌ها می‌توان گفت عملکرد حالت یکپارچه بهتر بوده است.

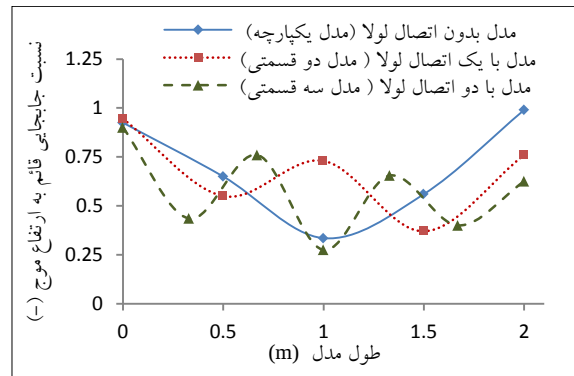
جابه‌جایی مدل در اثر برخورد موج چهارم با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. وضعیت بیشینه جابه‌جایی‌ها در این طول موج مانند موج سوم است با این تفاوت که این مقادیر در همه مدل‌ها افزایش یافته است. شاخص سطح زیر نمودار با داشتن مقادیر ۰/۶۶۱، ۰/۷۹۸ و ۰/۸۴۵ به ترتیب برای مدل یکپارچه، دو و سه قسمتی؛ بیانگر مناسب‌تر بودن رفتار هیدرولاستیک سازه شناور بدون اتصال است. با در نظر گرفتن بیشینه جابه‌جایی نیز این نتیجه‌گیری تأیید می‌شود.



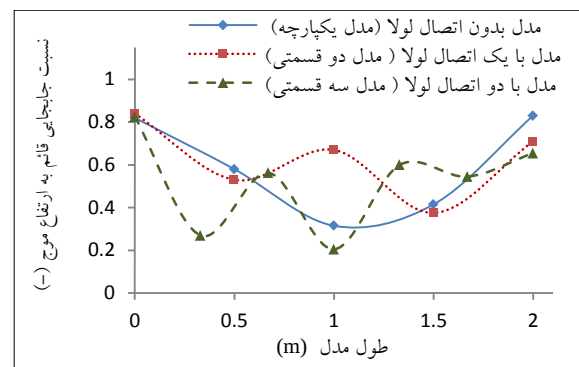
شکل (۱۳) مقایسه جابه‌جایی قائم در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه

وضعیت در مورد موج پنجم با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه، قدری متفاوت است (شکل ۱۴). در اثر برخورد این موج به مدل، بیشینه جابه‌جایی برای مدل دو قسمتی حاصل شده است. مقادیر شاخص سطح زیر نمودار برای حالت‌های بدون اتصال، دو و سه اتصال مفصلی در طول مدل به ترتیب ۰/۷۹۰، ۰/۹۷۶ و ۰/۸۰۸ محاسبه شده است. با توجه به شاخص‌ها و نمودار جابه‌جایی در این طول موج نیز مانند دو موج قبلی، مدل یکپارچه از لحاظ جابه‌جایی عملکرد بهتری داشته است. همچنین مقایسه‌ی بین مدل‌های دارای

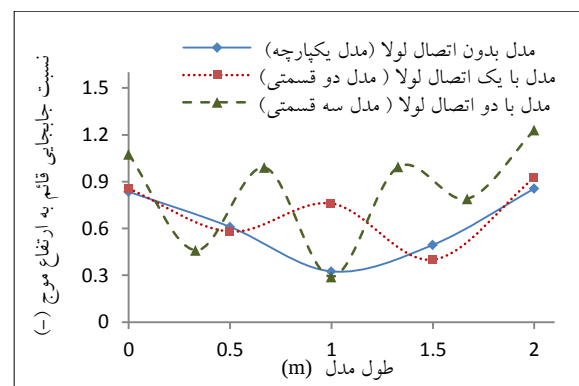
۰/۳۹۲ است. در این طول موج هم نیز شاخص کمتر به مدل سه قسمتی اختصاص دارد. با ملاحظه نمودار مربوط به این موج واضح است که جابه‌جایی بیشینه مدل سه جزئی از حالت پیوسته و دو قسمتی کمتر شده است.



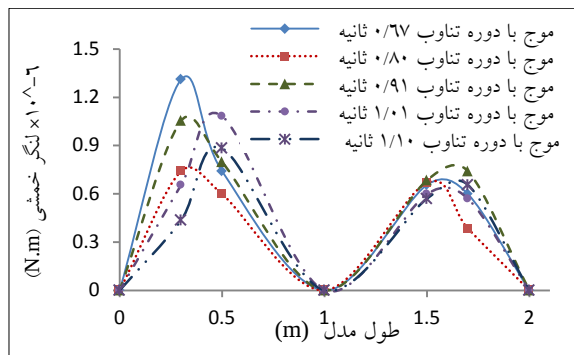
شکل (۱۰) مقایسه جابه‌جایی قائم در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه



شکل (۱۱) مقایسه جابه‌جایی قائم در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۸ ثانیه

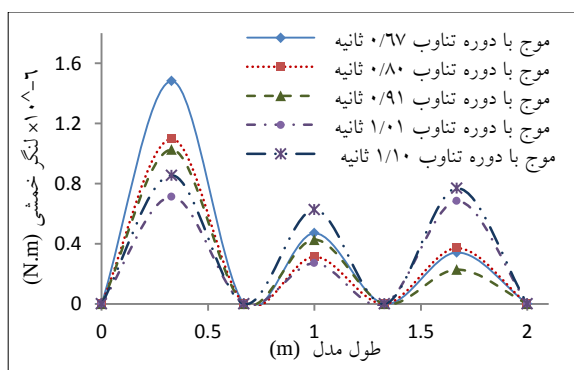


شکل (۱۲) مقایسه جابه‌جایی قائم در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه



شکل (۱۶) لنگر خمشی در طول مدل دو قسمتی (یک اتصال مفصلی در وسط مدل) در اثر اعمال موج‌های با دوره تناوب مختلف

مقایسه لنگر خمشی مدل سه جزئی برای موج‌های مختلف در شکل ۱۷ انجام می‌پذیرد. قسمت اول مدل (جزئی که مقابل موج قرار می‌گیرد)، دارای بیش‌ترین لنگر خمشی در طول مدل است. در این مدل در اثر اعمال موج با دوره تناوب ۰/۶۷ بیش‌ترین خمش ایجاد می‌شود. در این حالت امواج با طول‌های بلندتر (دوره تناوب‌های ۱/۰۱ و ۱/۱ ثانیه)، لنگر خمشی کمتری نسبت به بقیه امواج (امواج با طول کوتاه‌تر) در قسمت اول مدل ایجاد می‌کنند.



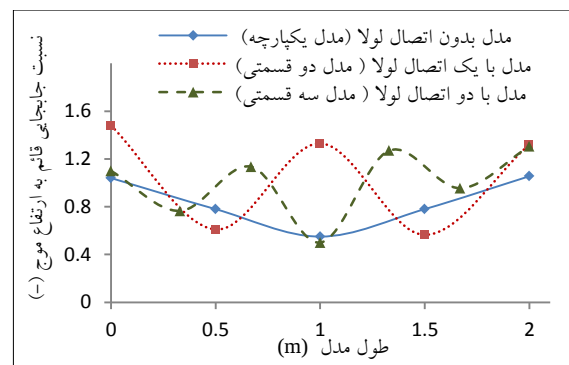
شکل (۱۷) لنگر خمشی در طول مدل سه قسمتی (دو اتصال مفصلی در طول مدل) در اثر اعمال موج‌های با دوره تناوب مختلف

در شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ لنگر خمشی در اثر اعمال هر موج برای سه مدل آورده شده است. با توجه به شکل‌ها می‌توان دریافت که:

- لنگر خمشی در مدل‌های دارای اتصال مفصلی نسبت به حالت یکپارچه کاهش می‌یابد.

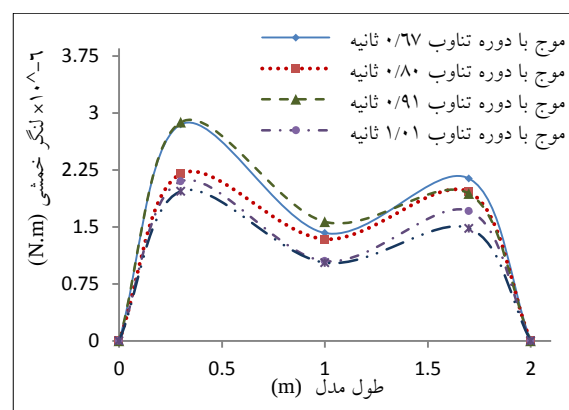
- در مدل سه جزئی، در وسط جزء اول در اثر برخورد موج‌های با دوره تناوب‌های ۰/۶۷ و ۰/۸ و ۰/۹۱ ثانیه، تنش‌ها نسبت به دو

اتصال مفصلی در شکل ۱۴ نشان می‌دهد، که مدل دارای سه قسمت از رفتاری بهتری نسبت به مدل دو جزئی برخوردار است.



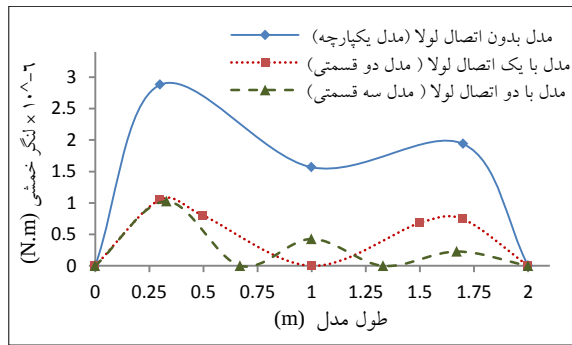
شکل (۱۴) مقایسه جابه‌جایی قائم در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه

در ادامه ابتدا تاثیر طول موج در مقدار لنگر خمشی قسمت‌های مختلف تک تک مدل‌ها بررسی شده است. شکل ۱۵، لنگر خمشی در مدل یکپارچه را برای موج‌های مختلف ارائه می‌دهد. بیش‌ترین خمش در اثر برخورد موج در جلوی سازه ایجاد می‌شود. با توجه به این نمودار می‌توان گفت در موج‌های با طول بلندتر (دوره تناوب بیش‌تر) خمش کمتری در مدل بدون اتصال مفصلی ایجاد می‌شود.

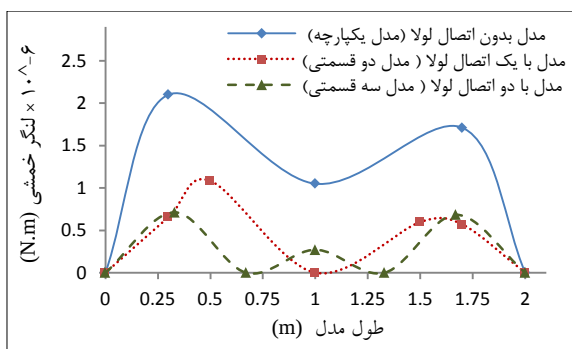


شکل (۱۵) لنگر خمشی در طول مدل یکپارچه (بدون اتصال مفصلی) در اثر اعمال موج‌های با دوره تناوب مختلف

در شکل ۱۶ روند تغییرات خمش در طول مدل دو جزئی برای پنج موج مورد آزمایش رسم شده است. در این مدل در امواج با طول‌های بلندتر (دوره تناوب‌های ۱/۰۱ و ۱/۱ ثانیه)، لنگر خمشی بیشینه‌ی جزء اول در وسط آن اتفاق افتاده است.



شکل (۲۰) مقایسه لنگر خمشی در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه



شکل (۲۱) مقایسه لنگر خمشی در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه

تاکون پارامترهای جابه‌جایی و خمش در مدل‌ها به شکل مجزا بررسی شدند. حال این پارامترها به صورت هم‌زمان در مدل‌ها بررسی می‌شوند. مشاهدات بیانگر این بوده است که:

- در همه شرایط مدل‌های دارای اتصالات مفصلی لنگر کمتری در طول مدل داشته‌اند. جابه‌جایی‌ها در موج اول و دوم (دوره تناوب‌های ۰/۶۷ و ۰/۸ ثانیه)، در حالت مدل سه جزئی عملکرد بهتری داشته است. از آنجایی که در موج اول با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه بیشینه تنش در مدل‌های دارای اتصال تقریباً با یکدیگر مساوی است؛ مدل سه بخشی از لحاظ جابه‌جایی و خمش نسبت به سایر مدل‌ها بهتر عمل می‌کند.

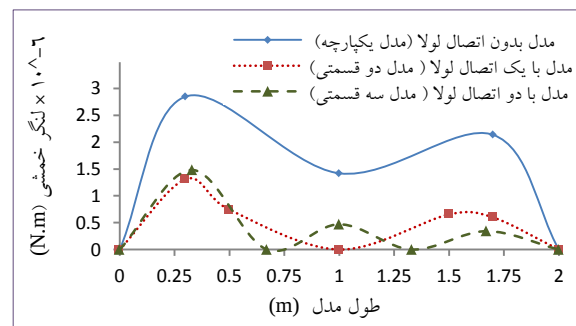
- در اثر موج دوم (موج با دوره تناوب ۰/۸ ثانیه) جابه‌جایی مدل سه جزئی کمتر بوده ولی تنش آن از مدل دو جزئی بیشتر است. با این شرایط در طراحی سازه با نسبت طول موج به طول سازه برابر ۰/۵ در مقیاس واقعی باید عامل مهم‌تر در پروژه

جزء دیگر مدل بیشتند.

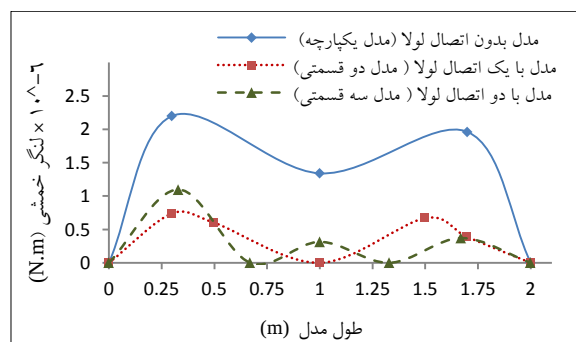
- مدل دو جزئی نیز تنش بیشینه در جزئی که در جلوی سازه قرار دارد، ایجاد می‌شود. در این مدل به غیر از موج‌های با دوره تناوب ۰/۶۷ و ۱/۰۱ ثانیه، اختلاف تنش بین دو بخش با یکدیگر چندان زیاد نیست.

- با مقایسه مدل دو و سه جزئی، می‌توان دریافت هر چند بیشینه تنش‌ها در موج اول (دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه)، موج سوم (دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه) و موج پنجم (دوره تناوب ۱/۱ ثانیه) تقریباً با یکدیگر برابرند؛ ولی تنش‌ها در طول نمونه سه جزئی از سازه دو بخشی کمتر است.

- وضعیت درباره امواج دوم و چهارم متفاوت است؛ بدین معنی که در موج دوم با دوره تناوب ۰/۸ ثانیه تنش ایجاد شده در مدل سه بخشی برابر ۷/۶۰ نیوتن بر متر مربع است که مقدار تنش در مدل دو جزئی حدود یک سوم از آن کمتر است. بر عکس در مورد موج چهارم با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه، تنش بیشینه در مدل دو جزئی بیش از ۵۰ درصد از مدل سه قسمتی بیشتر است.



شکل (۱۸) مقایسه لنگر خمشی در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه



شکل (۱۹) مقایسه لنگر خمشی در طول مدل‌ها در اثر موج با دوره تناوب ۰/۸ ثانیه

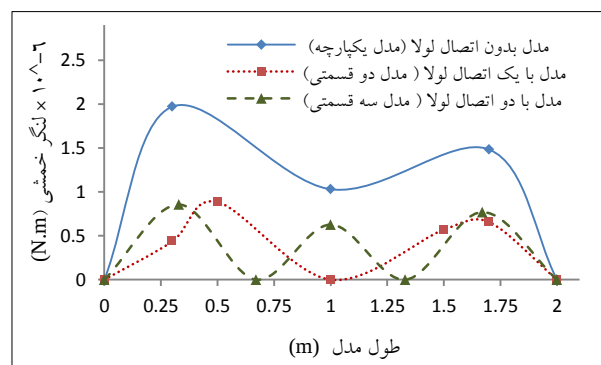
جابه‌جایی دو مدل هم با یکدیگر اختلاف زیاد ندارند ولی در مدل سه جزئی جابه‌جایی اندکی کمتر از مدل دو جزئی است.

(جابه‌جایی یا تنش) را ملاک قرار داد یا اینکه با در نظر گرفتن هر دو پارامتر، به طرحی بهینه دست یافت.

۸- جمع‌بندی

سازه‌های شناور بسیار بزرگ معمولاً به صورت پیوسته و با اتصال صلب طراحی و آنالیز می‌شوند. یکی از راه‌حل‌های کاهش پاسخ هیدروالاستیک استفاده از اتصالات غیر صلب بین قسمت‌های سازه شناور است. برای بررسی این راه‌حل آزمایش‌ها با طول موج‌های مختلف برای مدل یکپارچه، دو و سه قسمتی انجام گردید. نسبت طول موج در آزمایش‌ها به طول سازه ۰/۳۵، ۰/۵، ۰/۶۵، ۰/۸ و ۰/۹۵ بود.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در هر یک از مدل‌ها، جابه‌جایی در امواج با طول بلندتر، بیشتر است. برای مقایسه جابه‌جایی از شاخص سطح زیر نمودار جابه‌جایی بر حسب طول مدل و بیشینه جابه‌جایی استفاده شده است. در امواج با دوره‌های تناوب ۰/۶۷ و ۰/۸ ثانیه، در بین مدل‌ها، نمونه سه قسمتی از لحاظ شاخص یاد شده و بیشینه جابه‌جایی، عملکرد بهتری داشته است. در سه موج آخر با دوره تناوب ۰/۹، ۱/۰۱ و ۱/۱ ثانیه، مدل یکپارچه رفتار بهتری از نظر جابه‌جایی نسبت به مدل دارای اتصال داشته است. به عبارت دیگر می‌توان گفت؛ در طول موج‌های کوتاه، مدل‌های چند جزئی جابه‌جایی کمتری داشته‌اند و جابه‌جایی مدل بدون اتصال، در طول موج‌های بلند در قیاس با دیگر مدل‌ها کمتر بوده است. با توجه به روند تغییرات مقادیر لنگر خمشی در طول مدل‌ها، مشاهده شد که بیشترین این مقادیر، در جلوی سازه اتفاق می‌افتد. نتایج گویای این نکته است که لنگر خمشی در مدل‌های دارای اتصال مفصلی نسبت به مدل یکپارچه در همه امواج به شکل چشم‌گیری کاهش یافته است. در موج با دوره تناوب ۰/۷۶ ثانیه که نسبت طول موج به طول مدل ۰/۳۵ است؛ بیشینه تنش و جابه‌جایی مدل سه جزئی کمتر است. در مورد موج دوم که دوره تناوب آن ۰/۸ ثانیه است، تنش و جابه‌جایی در مدل‌های دو و سه قسمتی به طور هم‌زمان مناسب نیست؛ در شرایطی با موج مشابه در مقیاس واقعی، با تغییر نسبت طول سازه به طول موج، می‌توان وضعیت بهتری برای تنش و جابه‌جایی ایجاد نمود. هر چند در سه موج آخر، مدل پیوسته، جابه‌جایی کمتری نسبت به مدل‌های دارای اتصال دارد؛ اما در مدل



شکل (۲۲) مقایسه لنگر خمشی در طول مدل‌ها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه

• در سه موج آخر (موج‌های با طول بلندتر) مدل یکپارچه جابه‌جایی کمتری داشته است. این در حالی است که خمش در مدل بدون اتصال بیشتر از سایر حالت‌ها است. بنابراین حالتی که هر دو پارامتر را تامین کند نمی‌توان پیشنهاد کرد. چون اختلاف لنگر خمشی در حالت یکپارچه حدود ۲ برابر بیشتر از مدل دارای اتصال مفصلی است، در صورتی که جابه‌جایی سازه در پروژه‌ای در حد مجاز باشد، استفاده از اتصال مفصلی در طراحی مقرون به صرفه خواهد بود.

• در صورت استفاده از اتصال در سازه می‌توان گفت؛ در موج سوم (موج با دوره تناوب ۰/۹۱) چون جابه‌جایی حالت دو جزئی کمتر از مدل سه بخشی است و تنش‌های بیشینه در آن‌ها برابرند، در بین مدل‌های دارای اتصال، مدل دو قسمتی بهتر خواهد بود.

• در مورد موج چهارم با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه انتخاب قدری دشوار است، چون جابه‌جایی در حالت سه جزئی از حالت دو قسمتی بیشتر است اما تنش‌های مدل سه جزئی کمتر است. در طراحی برای دریایی با چنین طول موجی می‌توان عوامل مختلف را در نظر گرفت و طرح بهینه را اجرا کرد. از اقداماتی که در این مواقع می‌توان پیشنهاد کرد این است که با تغییر طول مدل نسبت به طول موج مورد نظر تنش و جابه‌جایی‌ها را بهینه کرد.

• در موج با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه، تنش‌های به‌وجود آمده در مدل‌های دو و سه جزئی تقریباً یکسان شده است، هر چند

- [7] T. I. Khabakhpasheva, A. A. Korobkin, "Hydroelastic behaviour of compound floating plate in waves", *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 44, No. 1, , 2002, pp. 21-40.
- [8] B. W. Kim, J. H. Kyoung, S. Y. Hong, S. K. Cho, "Investigation of the effect of stiffness distribution and structure shape on hydroelastic response of very large floating structures", *In Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, South Korea, 2005, pp. 229-238.
- [9] M. Riyansyah, C. M. Wang, Y. S. Choo, "Connection design for two-floating beam system for " , *Marine Structure*, "minimum hydroelastic response Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 67-87.
- [۱۰] معصومی م.، خانجانی م. ج.، "مدلسازی اثر پارامتر شکل در رفتار سازه‌های شناور"، *اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیر ساخت*، تهران، ایران، ۱۳۸۹.
- [۱۱] شجاع ح.، بارانی غ. م.، خانجانی م. ج.، "مدلسازی رفتار هیدروالاستیک سازه‌های شناور با الگوریتم ژنتیک"، *دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، تهران، ایران، ۱۳۹۰.
- [۱۲] رضایت ز.، "مطالعه آزمایشگاهی رفتار سازه شناور بسیار بزرگ با اتصال صفحه ضد موج"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ۱۳۹۲.
- [13] C. H. Lee, J. N. Newman, "An assessment of hydroelasticity for very large hinged vessels", *Fluids and Structures*, Vol. 14, No. 7, 2000, pp. 957-970.
- [14] S. X. Fu, T. Moan, X. J. Chen, W. C. Cui, "Hydroelastic analysis of flexible floating interconnected structures", *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 11-12, 2007, pp. 1516-1531.
- [15] R. P. Gao, Z. Y. Tay, C. M. Wang, C. G. Koh, "Hydroelastic response of very large floating structure with a flexible line connection", *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 17, 2011, pp. 1957-1966.
- [16] R. P. Gao, C. M. Wang, C. G. Koh, "Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells", *Engineering Structures*, Vol. 52, 2013, pp. 372-383.
- [17] X. Chen, J. J. Jensen, W. Cui, S. Fu, "Hydroelasticity of a floating plate in multidirectional waves", *Ocean Engineering*, Vol. 30, No. 15, 2003, pp. 1997-2017.
- [۱۸] شفيعی فر م.، میرزایی م.، هیدرومکانیک سازه‌های شناور، نشر دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.

پیوسته، لنگر خمشی حدود دو برابر حالات دیگر است. بنابراین در صورتی که در پروژه‌ای، جابه‌جایی‌های مدل چند جزئی در حد مجاز باشند، برای کاهش لنگر خمشی می‌توان از این نوع سازه‌ها استفاده کرد. در موج سوم با دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه که طول آن ۰/۶۵ طول مدل است، نمونه آزمایشگاهی دو بخشی، عملکرد بهتری از لحاظ تنش و جابه‌جایی داشته است. در موج با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه نیز مانند موج دوم نمی‌توان به شکل قطعی اظهار نظر کرد؛ در شرایطی با چنین ویژگی‌هایی باید عوامل مختلف را سنجید و طرحی بهینه را با توجه به اهمیت هر یک از پارامترها ارائه نمود. در صورت استفاده از اتصال مفصلی در طول موج‌های برابر با طول سازه (موج پنجم آزمایش) استفاده از مدلی متشکل از سه جزء بهتر خواهد بود.

۹- مراجع

- [1] C. M. Wang, E. Watanabe, T. Utsunomiya, *Very large floating structure*, First edition, New York: Taylor & Francis 2008, pp. 141-164.
- [2] E. Watanabe, T. Utsunomiya, C. M. Wang, "Hydroelastic analysis of pontoon-type VLFS: a literature survey", *Engineering Structure*, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 245-256.
- [3] C. M. Wang, Z. Y. Tay, "Very large floating structures: applications, research and development", *In Proceeding the Twelfth East Asia-pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Vol. 14, 2011, pp. 62-72.
- [4] S. Ohmatsu, "Numerical calculation method of hydroelastic response of a pontoon-type VLFS close to a breakwater", *In Proceedings 3rd International Workshop Very Large Floating Structures*, Honolulu, Hawaii, USA, 1999, pp. 805-11.
- [5] K. Takagi, K. Shimada, T. Ikebuchi, "An anti-motion device for a very large floating structure", *Marine Structure*, Vol. 13, No. 4-5, 2000, pp. 421-436.
- [6] H. Ohta, T. Torii, N. Hayashi, E. Watanabe, T. Utsunomiya, K. Sekita, S. Sunahara, "Effect of attachment of a horizontal/vertical plate on the wave response of a VLFS", *In Proceedings of the Third International Workshop on Very Large Floating Structures*, Honolulu, USA, 1999, pp. 265-274.

