

بررسی توزیع فشار در اطراف یک پایه استوانه‌ای قائم تحت اثر امواج تصادفی دریا با بکارگیری داده‌های آزمایشگاهی

محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین*^۱، اسلام کرامت‌زارنجی^۲، حمید احمدی^۳

^۱ دانشیار، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

^۳ دانشجوی دکترای مهندسی سازه‌های دریایی، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

پایه‌های استوانه‌ای با مقطع مدور، عمده‌ترین المان‌های تشکیل دهنده سازه‌های فراساحلی متداولی نظیر سکوه‌های شابلونی و سکوه‌های خودبالابر هستند. از آنجا که این المان‌ها همواره در معرض برخورد امواج دریا بوده و این امواج دارای ماهیتی تصادفی هستند، مطالعه یک المان استوانه‌ای تحت اثر امواج تصادفی، می‌تواند دربردارنده نتایج مفید و ارزشمندی باشد. نیروهای ناشی از امواج، تابعی از الگوی توزیع فشار در اطراف پایه هستند. این فشار، توزیعی نامتقارن نسبت به محور طولی استوانه داشته و نسبت به زمان متغیر است. این ویژگی منجر به ظهور نیروهای متغیر و نامتقارن در طرفین پایه می‌شود. تشکیل نامتقارن گردابه‌ها در اطراف پایه، عامل اصلی ایجاد این توزیع فشار نامتقارن است. گردابه‌ها تأثیر زیادی بر نیروهای برآ و پسای وارد بر المان دارند. در مورد توزیع فشار روی پایه‌های استوانه‌ای تحت اثر امواج، تحقیقات قابل ملاحظه‌ای انجام نشده و اکثر مطالعات صورت گرفته، روی تعیین نیروهای وارد بر پایه‌های استوانه‌ای متمرکز شده است. هدف پژوهش حاضر، تبیین توزیع فشار در اطراف یک پایه استوانه‌ای با مقطع مدور و حصول روابطی برای تعیین فشار در یک نقطه دلخواه روی سطح المان استوانه‌ای، از طریق تحلیل و بررسی نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. داده‌های مورد استفاده، نتایج آزمایشاتی است که بر روی پایه‌های استوانه‌ای با زبری موضعی تحت اثر امواج تصادفی، در کانال موج دلتای آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلفت انجام شده است.

واژگان کلیدی: توزیع فشار، پایه استوانه‌ای، امواج تصادفی، جاری شدن گردابه، برازش.

۱- مقدمه

پایه در راستای انتشار موج را بدست می‌دهد. به علاوه با استفاده از این رابطه، امکان تعیین نیروهای جانبی نیز وجود ندارد. برای آشنائی بیشتر با معادله موریسون می‌توان به مراجع [۱-۴] مراجعه نمود. تعیین فشار ناشی از امواج در اطراف یک استوانه، مسئله پیچیده‌ای است. این فشار، توزیعی نامتقارن نسبت به محور طولی استوانه داشته و نسبت به زمان متغیر است. این ویژگی منجر به ظهور نیروهای متغیر و نامتقارن در طرفین استوانه می‌شود. تشکیل نامتقارن گردابه‌ها در اطراف پایه، عامل اصلی ایجاد این توزیع فشار نامتقارن است. گردابه‌ها، تأثیر زیادی بر نیروهای برآ و پسای وارد بر المان دارند [۵].

در مورد توزیع فشار روی پایه‌های استوانه‌ای تحت اثر امواج، تحقیقات قابل ملاحظه‌ای انجام نشده و اکثر مطالعات صورت گرفته، روی تعیین نیروهای وارد بر پایه‌های استوانه‌ای متمرکز شده است. در ادامه مطالعات صورت گرفته در سال‌های اخیر، به اجمال مرور می‌شود.

با توجه به استفاده گسترده از سکوه‌های فراساحل در آب‌های جنوب کشور به منظور بهره‌برداری از منابع سرشار نفت و گاز، مطالعه و بررسی مسائل مختلف مرتبط با تحلیل و طراحی این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پایه‌های استوانه‌ای با مقطع مدور، عمده‌ترین المان‌های تشکیل دهنده سازه‌های فراساحلی متداولی نظیر سکوه‌های شابلونی و سکوه‌های خودبالابر هستند. از آنجا که این المان‌ها همواره در معرض برخورد امواج دریا بوده و این امواج دارای طبیعتی تصادفی هستند، مطالعه یک المان استوانه‌ای تحت اثر امواج تصادفی، می‌تواند دربردارنده نتایج مفید و ارزشمندی باشد. از آنجا که قطر این پایه‌های استوانه‌ای معمولاً نسبت به طول امواج برخوردی کوچک است، برای تعیین نیروهای وارده از طرف امواج بر روی این المان‌ها می‌توان از رابطه موریسون استفاده نمود. این رابطه در تعیین نیروهای هم‌راستا با موج، رابطه‌ای کارا و متداول است ولی قادر به تبیین تغییرات فشار در اطراف پایه نبوده و به عبارت دیگر فقط مقدار برآیند فشارهای وارد بر سطح

Jian و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸، نیروی وارده از طرف امواج تاج کوتاه ترکیب شده با جریان را بر روی یک استوانه مدور قطور، بر مبنای تئوری تفرق مورد مطالعه قرار دادند. Mahir [۱۴] در سال ۲۰۰۹، با اعمال یک روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی به معادلات ناویر-استوکس، جریان در اطراف یک پایه با مقطع مربعی که در کنار یک دیواره تخت قرار گرفته است را به صورت سه بعدی شبیه‌سازی نمود. Wang و Wu [۱۵] در سال ۲۰۱۰، اندرکنش کاملاً غیر خطی بین امواج و آرایشی از پایه‌های استوانه‌ای قائم قرار گرفته در یک مخزن را بر مبنای روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند.

در مقاله حاضر، توزیع فشار در اطراف یک پایه استوانه‌ای قائم مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجا که در سازه‌های فراساحلی، سطح المان‌های استوانه‌ای کاملاً صاف نبوده و بر اثر چسبیدن مرجان‌ها و جانوران دریایی سطوحی زبر ایجاد می‌شود و همچنین نظر به این که امواج دریا، شکل منظمی نداشته و دارای ماهیتی کاملاً تصادفی هستند؛ لذا یک استوانه با زبری موضعی تحت اثر امواج تصادفی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این پژوهش، بررسی توزیع فشار روی سطح پایه و ارائه رابطه‌ای برای تعیین فشار در هر نقطه دلخواه روی این سطح، از طریق بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. داده‌های مورد استفاده، نتایج آزمایشاتی است که بر روی پایه‌های استوانه‌ای با زبری موضعی تحت اثر امواج تصادفی، در کانال موج دلتای آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلفت در هلند انجام شده است.

۲- توزیع فشار در اطراف پایه و تشکیل گردابه‌ها

بر اساس تئوری امواج با دامنه کوتاه (تئوری موج ایری)، در اثر برخورد موج به یک پایه قائم، فشاری به آن وارد می‌شود که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۶]:

$$P = -\rho g z + \frac{\rho g H \cosh k(d+z)}{2 \cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (1)$$

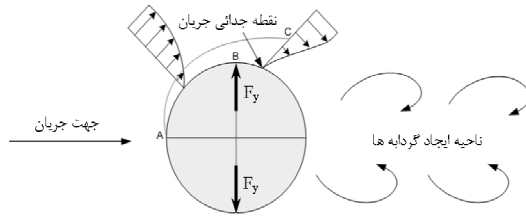
در رابطه فوق، H ارتفاع موج، d عمق آب، z موقعیت قائم نقطه مورد نظر نسبت به مبدأ قرار گرفته در تراز آب ساکن، k عدد موج، σ فرکانس زاویه‌ای موج، x پارامتر مکانی فاز، t پارامتر زمانی فاز، g شتاب گرانش و ρ جرم مخصوص آب است. مشاهده می‌شود که در این رابطه توجهی به موقعیت افقی نقطه مورد نظر نشده است. در واقع رابطه مذکور صرفاً مقدار فشار روی محور استوانه را

Huang و Eatock Taylor [۶] در سال ۱۹۹۶، یک روش نیمه تحلیلی برای تعیین نیروهای افقی و عمودی وارد بر پایه‌های استوانه‌ای قائم تا مرتبه دوم، ارائه نمودند. Stansberg [۷] در سال ۱۹۹۷، تحقیقاتی به منظور تعیین نیروهای هارمونیک مراتب بالا با استفاده از مخزن موج انجام داد. در این پژوهش، نیروی افقی ناشی از امواج منظم و نامنظم تا مرتبه سوم تعیین شده است. Kim و Wang [۸] در سال ۱۹۹۹، روشی برای تعیین نیروهای افقی وارد بر یک ستون عمودی تحت اثر امواج استوکس مرتبه پنجم، با استفاده از تئوری تفرق ارائه نمودند.

Boo [۹] در سال ۲۰۰۲، یک حل عددی در حوزه زمانی برای شبیه‌سازی امواج نامنظم خطی و پیش‌بینی نیروهای وارد بر یک سازه در اثر تفرق امواج خطی و غیرخطی ارائه نموده و نتایج حاصله را با مقادیر بدست آمده از روابط نظری مورد مقایسه قرار داد. Akyildiz [۱۰] در سال ۲۰۰۲، به صورت آزمایشگاهی توزیع فشار حول یک پایه استوانه‌ای قائم که از بستر تا تراز بالاتر از سطح آزاد آب امتداد یافته است را تحت اثر امواج منظم مورد مطالعه قرار داد.

Roopsekhar و Sundar [۱۱] در سال ۲۰۰۴، فشارهای هیدرودینامیک ناشی از امواج منظم حول یک خط لوله عمود به جهت انتشار موج که در مجاورت یک بستر صلب با شیب ۱:۱۰ قرار گرفته است را در یک فلوم موج مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، با انتگرال‌گیری از مقادیر فشار، تاریخچه زمانی نیرو بدست آمده و بر مبنای آن مقادیر حدی نیروهای افقی و قائم استخراج شده است. سپس ضرایب نیروی افقی و عرضی بیشینه و rms تعیین شده و تأثیر فاصله بستر شیبدار با خط لوله روی این ضرایب مورد بحث قرار گرفته است.

Boo [۱۲] در سال ۲۰۰۵، نیروهای افقی و عمودی وارد بر یک پایه استوانه‌ای عمودی تحت اثر امواج استوکس، با شیب موج متغیر از ۰/۰۶ تا ۰/۲۴ را در یک مخزن موج، مورد مطالعه قرار داد. لاغری استوانه‌های انتخابی بین ۰/۰۸۷ تا ۰/۳۶۵ متغیر در نظر گرفته شد. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، تفاوت بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار نظری، در نیروهای افقی هارمونیک مرتبه دوم و سوم، در فرکانس‌های پائین امواج، با افزایش شیب موج، کاهش می‌یابد و مقادیر اندازه‌گیری شده نیروهای هارمونیک مرتبه سوم به ازای تمام فرکانس‌ها، با افزایش شیب موج به مقدار نظری نزدیک می‌شوند. مقادیر نیروهای هارمونیک مراتب بالاتر بطور قابل توجهی کوچکتر از نیروهای هارمونیک مرتبه اول هستند.



شکل ۱- تولید متناوب گردابه‌ها در پائین دست پایه

بدست می‌دهد و تعیین فشار روی نقاط مختلف روی سطح استوانه از طریق این رابطه امکان پذیر نیست. پروفیل سطح آب را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

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

با توجه به روابط (۱) و (۲)، می‌توان نوشت:

$$P = \rho g[\beta\eta - z] \quad (3)$$

ملاحظه می‌شود که رابطه فشار با پروفیل سطح آب خطی است. در این رابطه، β ضریبی است که تابع موقعیت قائم نقطه مورد نظر است. در صورتی که تئوری‌های امواج دامنه محدود نظیر تئوری استوکس مورد بررسی قرار گیرند، با توجه به روابط (۴) و (۵) ملاحظه خواهد شد که رابطه فشار با پروفیل سطح آب خطی نیست.

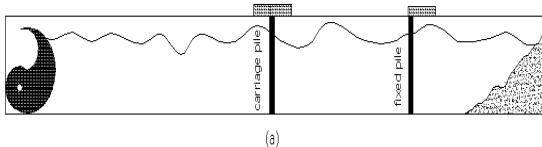
$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma) + \frac{\pi H}{8} \left(\frac{H}{L}\right) \frac{\cosh(2 + \cosh 2kd)}{\sinh^3 kd} \cos 2(kx - \sigma) \quad (4)$$

$$P = -\rho g z + \frac{\rho g H}{2} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma) + \frac{3\pi\rho g H^2}{4L \sinh 2kd} \left[\frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right] \cos 2(kx - \sigma) - \frac{\pi\rho g H^2}{4L \sinh 2kd} (\cos 2k(d+z) - 1) \quad (5)$$

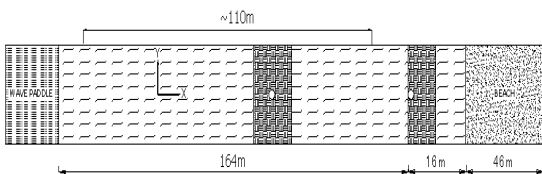
در هنگام عبور جریان، در اثر توزیع نامتقارن فشار در اطراف پایه و ایجاد گردابه‌ها، نیرویی به پایه وارد می‌شود که مؤلفه آن در جهت جریان، نیروی پسا و مؤلفه عمود بر جهت جریان در پلان را نیروی برآ می‌نامند. نیروی حاصل از اختلاف فشار بین دو طرف پایه که در اثر جدایی جریان از پایه بوجود می‌آید، بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

گردابه‌ها به طور متناوب در پشت استوانه تشکیل شده و پراکنش فشار در این ناحیه به طور متناوب تغییر می‌کند در نتیجه، پایه در اثر نیروی عمود بر راستای جریان که جهت آن بطور متناوب معکوس می‌شود، قرار گرفته و ارتعاش بوجود می‌آید. در شکل (۱)، Von Karman Vortex Street نشان داده شده است که از گردابه‌هایی با جهت مخالف تشکیل می‌شود.

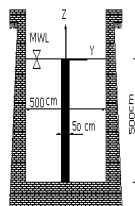
۳- تحقیقات آزمایشگاهی به منظور مطالعه توزیع فشار در سال ۱۹۹۳ تحقیقات گسترده‌ای در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلفت انجام گرفت و دو استوانه به قطرهای ۲۱۰ و ۵۰۰ میلی‌متر، در کانال موج دلتای این آزمایشگاه تحت اثر امواج منظم و تصادفی مورد مطالعه قرار گرفتند. در شکل (۲)، موقعیت پایه ۵۰۰ میلی‌متری با زبری سطح موضعی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، در داخل کانال موج نشان داده شده است. روی این پایه دو روکش نیروسنج در ترازهای ۱/۵ و ۲/۵ متری نسبت به تراز آب میانگین (MWL) نصب شده است. طول روکش‌های نیروسنج نصف قطر استوانه بوده و قادر هستند مقادیر نیرو را در جهت انتشار موج (X) و عمود بر آن (Y) اندازه‌گیری کنند. یک حلقه که ۱۶ فشارسنج از نوع Druch PDCR42 روی آن نصب شده است، فشار را در هر لحظه در اطراف استوانه ثبت می‌کند [۱۷].



(a)

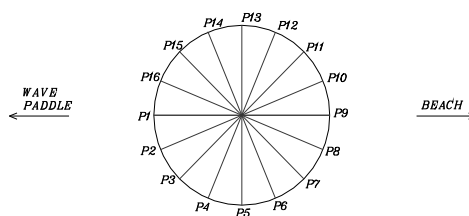
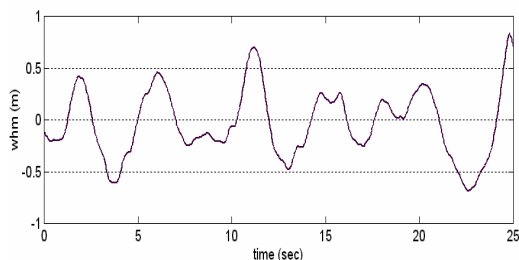


(b)



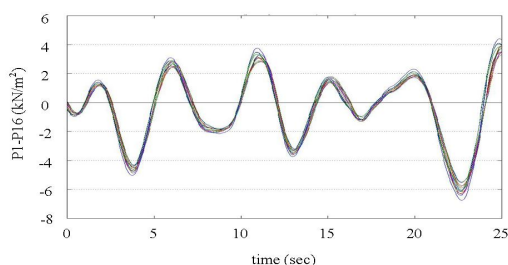
(c)

شکل ۲- طرح‌واره کانال موج دلتا [۱۷]

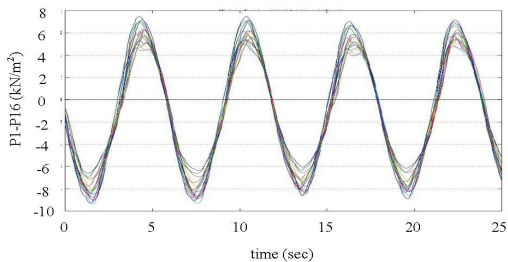


شکل ۳- نمایش ثبت کننده‌های فشار در پلان استوانه

شکل ۴- تاریخچه زمانی تغییرات سطح آب



شکل ۵- تاریخچه زمانی فشار دینامیکی در ۱۶ نقطه روی پایه تحت اثر امواج تصادفی



شکل ۶- تاریخچه زمانی فشار دینامیکی در ۱۶ نقطه روی پایه تحت اثر امواج منظم

با مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که منحنی‌های فشار در نقاط مختلف اطراف پایه تحت اثر امواج تصادفی، اختلاف ناچیزی دارند. در حالی که اختلاف فشار نقاط مختلف در پایه تحت امواج منظم بیشتر شده است. به نظر می‌رسد ماهیت تصادفی امواج، باعث شده است که اثر تشکیل و جاری شدن گردابه‌ها به عنوان عامل اصلی اختلاف فشار بین نقاط مختلف روی پایه، تا حدودی کم رنگ شود. این نتیجه با توجه به شکل (۷) و جدول (۱) نیز قابل استنباط می‌باشد. شکل (۷) به طور کیفی منحنی‌های هم‌فشار حول پایه، بین لحظات ۰/۲۵ تا ۰/۱۵ ثانیه را نشان می‌دهد.

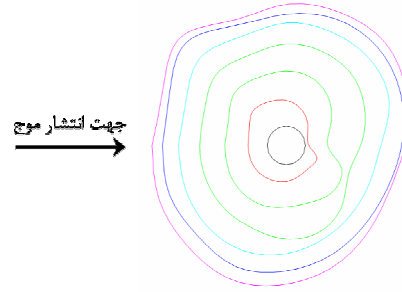
موقعیت فشارسنج‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. یک دیسک نواری ثبت فشار استاتیکی نیز در همان تراز که حلقه فشار قرار گرفته، نصب گردیده است. برای ایجاد زبری، لایه‌هایی از سمباده ریز به سطح پایه چسبانده شد. در نمونه مورد بررسی، از دو لایه با زبری متفاوت استفاده شده است که هر کدام بخشی از طول استوانه را پوشش می‌دهند. برای مشاهده جزئیات بیشتر در مورد نحوه ایجاد زبری، می‌توان به مرجع [۱۷] مراجعه نمود.

خصوصیات امواج تصادفی تولید شده منطبق بر طیف تراز سطح آب JONSWAP با ارتفاع موج اصلی ۱/۵ متر و دوره تناوب پیک ۵/۹ ثانیه می‌باشد. فرکانس ثبت داده‌ها ۴۰ هرتز بوده و در کل آزمایش ۱۴۴۰۰۰ داده ثبت شده است [۱۷]. عدد رینولدز (Re) براساس بیشینه سرعت افقی ذرات آب (۱/۴۷ متر بر ثانیه) برابر $10^5 \times 7/25$ می‌باشد. علت اصلی انتخاب داده‌های این آزمایش‌ها جهت انجام پژوهش حاضر، دقت و قابلیت اعتماد بالای آنها می‌باشد. پیشتر با استفاده از سایر داده‌های حاصل از این آزمایش‌ها، شامل مقادیر نیروهای طولی و عرضی وارد بر پایه، مقالاتی ارائه شده است [۱۸-۲۰].

۴- بررسی و تحلیل نتایج آزمایشات

پس از اعمال ضرایب کالیبره و تبدیل فرمت داده‌ها، به بررسی نتایج پرداخته می‌شود. در شکل‌های (۴) و (۵)، به ترتیب تاریخچه زمانی تغییرات تراز سطح آب و مقادیر فشار در ۱۶ نقطه روی سطح پایه تحت اثر امواج تصادفی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود ضمن اینکه مقادیر فشار در نقاط مختلف متفاوت است، ولی تغییرات آن در مقیاس کلی با تغییرات تراز سطح آب متناسب می‌باشد. در شکل (۶)، به منظور مقایسه توزیع فشار تحت اثر امواج منظم و تصادفی، تاریخچه زمانی فشار دینامیکی تحت اثر امواج منظم نشان داده شده است.

برای درک رابطه حاکم بر تغییرات فشار بین نقاط مختلف روی سطح استوانه، فشار ثبت شده توسط تک تک فشارسنج‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به لحاظ نظری، رابطه فشار- موج (رابطه فشار با تراز سطح آب) مستقل از موقعیت افقی نقاط است. با ترسیم فشار بر حسب تراز سطح آب در نقاط مختلف می‌توان صحت این مسئله را بررسی نمود. ابتدا با فرض اینکه رابطه فشار - موج، تقریباً خطی است $(P = C_1 + C_2 \eta)$ ، با توجه به متقارن بودن مقطع عرضی پایه و همسان بودن شرایط، می‌توان به داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نقاط یک نیمه از مقطع پایه، یک خط برازش نمود. در شکل‌های (۹) تا (۱۷) نمونه‌هایی از خطوط برازش داده شده به داده‌های نقاط سمت راست مقطع پایه (نسبت به زاویه دید هم جهت با انتشار موج) ارائه شده است. در این شکل‌ها، محور افقی (X) نشان دهنده تراز سطح آب بر حسب متر، محور قائم (Y) نشان دهنده مقدار فشار در نقطه مورد نظر بر حسب کیلو پاسکال و α زاویه بین راستای گذرنده از نقطه مورد نظر با راستای برخورد موج است. واضح است که برای امواج با دامنه محدود، با تقریب‌های غیر خطی و توابع درجات بالاتر، می‌توان بررسی دقیق‌تری به عمل آورد؛ با این وجود در ادامه نشان داده خواهد شد که خط‌های ناشی از فرض خطی بودن، قابل قبول می‌باشند.

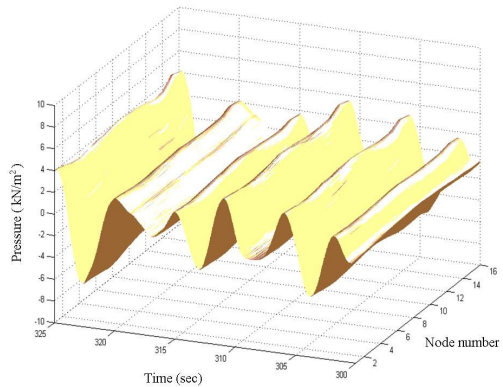


شکل ۷- توزیع فشار در اطراف پایه بین لحظات ۰/۲۵ تا ۰/۱۵ ثانیه با گام زمانی ۰/۰۲۵ ثانیه

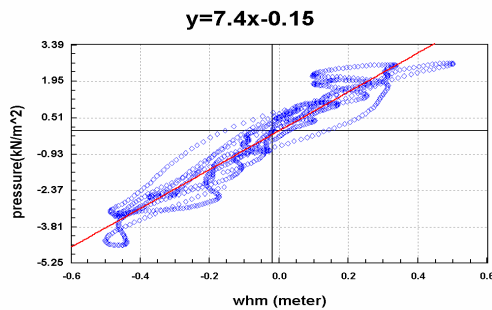
جدول ۱- نسبت فشار در نقاط مختلف به مقدار فشار در جلوی پایه (فشارسنج P1)، در زمان ۵ دقیقه و ۸/۷ ثانیه

شماره	نسبت P_i/P_1	شماره	نسبت P_i/P_1	شماره	نسبت P_i/P_1
۱	۰/۸۰۴	۷	۰/۸۵۴	۱	۰/۸۰۴
۲	۰/۸۲۷	۸	۰/۹۶۲	۲	۰/۹۳۱
۳	۱/۰۲۳	۹	۰/۹۴۰	۳	۰/۸۴۶
۴	۰/۹۸۴	۱۰	۰/۹۰۷	۴	۰/۸۰۸
		۱۱	۰/۹۰۷	۵	۰/۸۵۳
		۱۲	۰/۸۶۸	۶	۰/۸۳۲

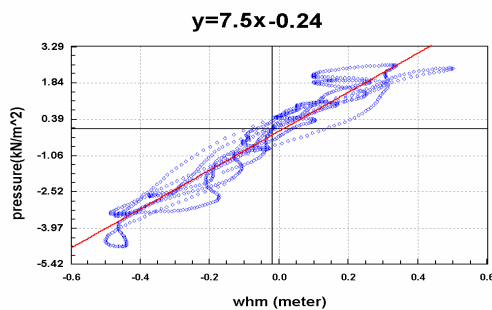
در جدول (۱)، نسبت فشار در نقاط مختلف به مقدار فشار در جلوی پایه (فشارسنج P1)، به عنوان نمونه در زمان ۵ دقیقه و ۸/۷ ثانیه ارائه شده است. شکل (۸) به طور واضح‌تری تغییرات زمانی فشار در ۱۶ نقطه روی سطح پایه را نشان می‌دهد. در این شکل محور قائم نشان دهنده فشار و محورهای افقی نشان دهنده زمان و شماره گره مورد نظر برای اندازه‌گیری فشار هستند.



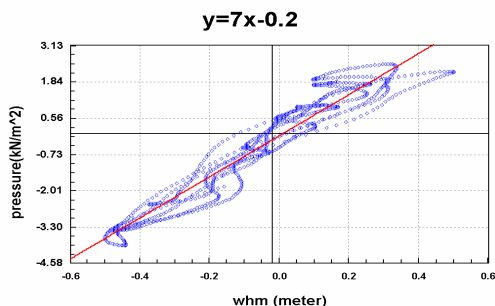
شکل ۸- نمودار سه بعدی فشار - زمان - مکان برای ۱۶ نقطه حول پایه تحت اثر امواج تصادفی



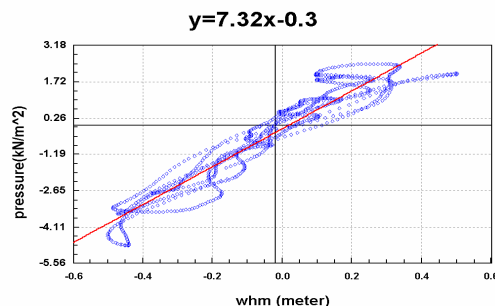
شکل ۹- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = 0$



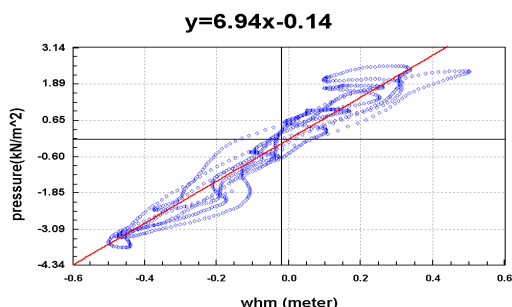
شکل ۱۰- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = \pi/8$



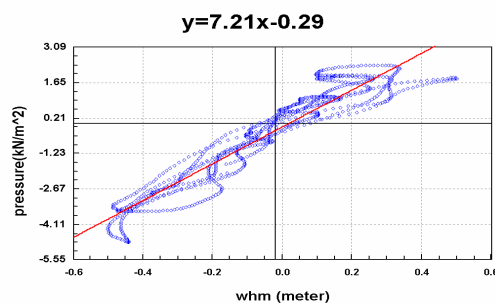
شکل ۱۵- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = 3\pi/4$



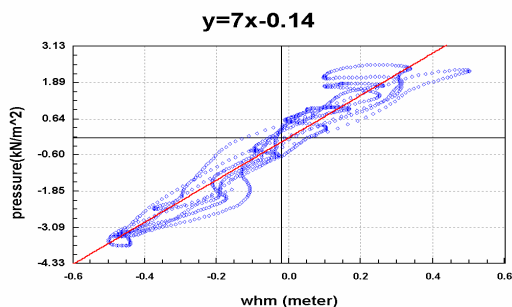
شکل ۱۱- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = \pi/4$



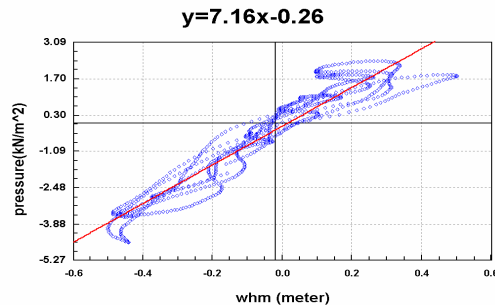
شکل ۱۶- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = 7\pi/8$



شکل ۱۲- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = 3\pi/8$

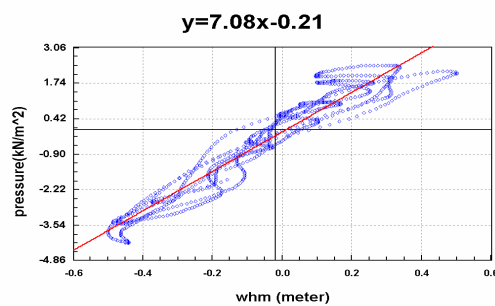


شکل ۱۷- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = \pi$



شکل ۱۳- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = \pi/2$

در جداول (۲) و (۳)، نتایج تقریب خطی به ترتیب برای نقاط نیمه‌های سمت راست و چپ پایه ارائه شده است. از آنجا که نقاط نیمه سمت چپ پایه، شرایطی کاملاً یکسان با نقاط متناظر در سمت راست دارند، انتظار می‌رود فشار در نقاط متناظر مساوی باشد. با این وجود، مشاهده می‌شود که اختلاف‌هایی بین مقادیر فشار در این نقاط وجود دارد. به نظر می‌رسد بخشی از این اختلاف‌ها ناشی از انتشار گردابه‌ها است. با این وجود، ممکن است خطاهای آزمایشگاهی نیز در این مسئله دخیل باشند. به منظور حصول یک مقدار متوسط برای فشار و همچنین کاهش تأثیرگذاری خطاهای

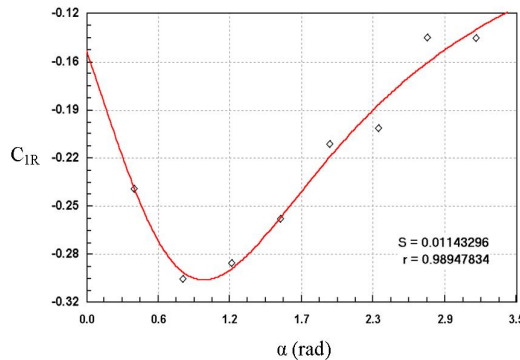


شکل ۱۴- رابطه خطی بین پروفیل موج و فشار در $\alpha = 5\pi/8$

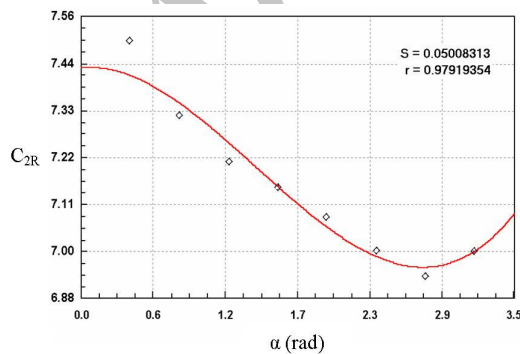
در جداول (۲) تا (۴)، s انحراف معیار، Γ ضریب همبستگی و α زاویه بین راستای گذرنده از نقطه مورد نظر با راستای برخورد موج است.

با ترسیم داده‌های ستون‌های سوم و چهارم (ضرایب C_1 و C_2) برحسب ستون دوم (زاویه α) و برازش یک منحنی به آنها، روابط بین این ضرایب و زاویه α بدست می‌آید. نمونه‌ای از این کار برای نقاط سمت راست استوانه در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) ارائه شده است. در این شکل‌ها، s انحراف معیار و Γ ضریب همبستگی بوده و مقدار زاویه α بر حسب رادیان بیان شده است.

محل جدائی سیال از پایه به عوامل مختلفی از جمله عدد رینولدز وابسته بوده و نقطه ثابتی نیست. با عنایت به این مسئله که داده‌های موجود، مربوط به نقاط بخصوصی حول پایه هستند که ممکن است هیچکدام نقطه جدائی سیال نباشند، شناسائی نقطه جدائی بر اساس شکل‌های (۹) تا (۱۷) کار دشواری بوده و نیازمند بررسی در پژوهشی جداگانه است.



شکل ۱۸- رابطه بین C_1 و زاویه α برای نقاط سمت راست پایه



شکل ۱۹- رابطه بین C_2 و زاویه α برای نقاط سمت راست پایه

آزمایشگاهی در روند بررسی، یک بار هم برازش برای متوسط مقادیر مربوط به نقاط متناظر در نیمه‌های سمت راست و چپ پایه انجام شده و نتایج در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج بررسی فشار در نقاط نیمه سمت راست پایه

شماره گره	α	C_{1R}	C_{2R}	s	Γ
۱	0	-۰/۱۵	۷/۴	۰/۵۶	-۰/۹۶
۲	$\pi/8$	-۰/۲۴	۷/۵	۰/۵۶	-۰/۹۶
۳	$\pi/4$	-۰/۳	۷/۳۲	۰/۵۹	-۰/۹۵
۴	$3\pi/8$	-۰/۲۹	۷/۲۱	۰/۶۲	-۰/۹۵
۵	$\pi/2$	-۰/۲۶	۷/۱۶	۰/۵۹	-۰/۹۵
۶	$5\pi/8$	-۰/۲۱	۷/۰۸	۰/۵۵	-۰/۹۶
۷	$3\pi/4$	-۰/۱۲	۷	۰/۵۲	-۰/۹۶
۸	$7\pi/8$	-۰/۱۴	۶/۹۴	۰/۵۲	-۰/۹۶
۹	π	-۰/۱۴	۷	۰/۵۲	-۰/۹۶

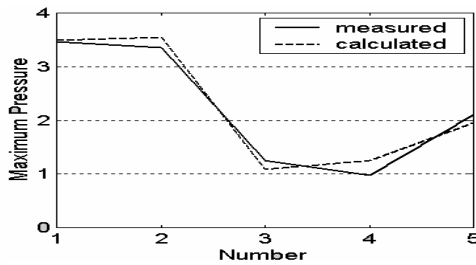
جدول ۳- نتایج بررسی فشار در نقاط نیمه سمت چپ پایه

شماره گره	α	C_{1L}	C_{2L}	s	Γ
۱	0	-۰/۱۵	۷/۴	۰/۵۶	-۰/۹۶
۱۶	$\pi/8$	-۰/۲۴	۷/۲۵	۰/۵۶	-۰/۹۶
۱۵	$\pi/4$	-۰/۱۲	۸/۲۹	۰/۶۲	-۰/۹۶
۱۴	$3\pi/8$	-۰/۲۵	۷/۳	۰/۵۸	-۰/۹۵
۱۳	$\pi/2$	-۰/۲۷	۷/۱۹	۰/۶	-۰/۹۵
۱۲	$5\pi/8$	-۰/۲۶	۷/۲۸	۰/۵۹	-۰/۹۵
۱۱	$3\pi/4$	-۰/۲۵	۷/۱۷	۰/۵۶	-۰/۹۶
۱۰	$7\pi/8$	-۰/۱۲	۷/۰۸	۰/۵۳	-۰/۹۶
۹	π	-۰/۱۴	۷	۰/۵۲	-۰/۹۶

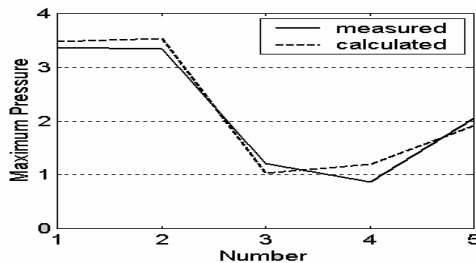
جدول ۴- نتایج بررسی فشار مربوط به متوسط مقادیر نقاط

متناظر در نیمه‌های سمت راست و چپ پایه

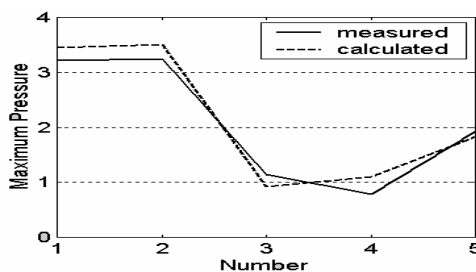
شماره گره	α	\bar{C}_1	\bar{C}_2	s	Γ
۱	0	-۰/۱۵	۷/۴	۰/۵۶	-۰/۹۶
۱۶ و ۲	$\pi/8$	-۰/۱۸	۷/۴	۰/۵۶	-۰/۹۶
۱۵ و ۳	$\pi/4$	-۰/۲۵	۷/۸۱	۰/۶	-۰/۹۶
۱۴ و ۴	$3\pi/8$	-۰/۲۷	۷/۲۵	۰/۵۹	-۰/۹۵
۱۳ و ۵	$\pi/2$	-۰/۲۶	۷/۱۷	۰/۶	-۰/۹۵
۱۲ و ۶	$5\pi/8$	-۰/۲۴	۷/۱۸	۰/۵۷	-۰/۹۵
۱۱ و ۷	$3\pi/4$	-۰/۲۲	۷/۰۹	۰/۵۴	-۰/۹۶
۱۰ و ۸	$7\pi/8$	-۰/۱۷	۷	۰/۵۲	-۰/۹۶
۹	π	-۰/۱۴	۷	۰/۵۲	-۰/۹۶



شکل ۲۲- مقایسه بیشینه فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در ۵ چرخه متوالی در نقطه ۹



شکل ۲۳- مقایسه بیشینه فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در ۵ چرخه متوالی در نقطه ۱۰



شکل ۲۴- مقایسه بیشینه فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در ۵ چرخه متوالی در نقطه ۱۱

به منظور بررسی میزان خطا، رابطه بین فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده باید مشخص شود. بدین منظور از درون یابی خطی استفاده شده است. نمونه‌ای از این کار در شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، محور افقی نشان دهنده فشار اندازه‌گیری شده و محور قائم نشان دهنده فشار محاسبه شده است. S انحراف معیار، Γ ضریب همبستگی و α زاویه بین راستای گذرنده از نقطه مورد نظر با راستای برخورد موج است.

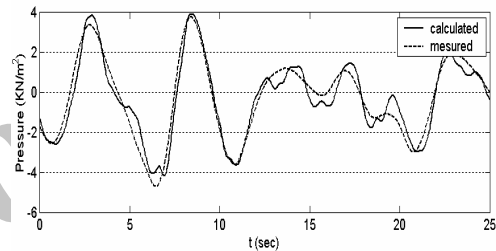
روابط بدست آمده برای نقاط سمت راست استوانه به صورت زیر خواهند بود:

$$C_{1R} = -0.13 - 0.06\alpha - 0.04\alpha^2 + 0.02\alpha^3 \quad (6)$$

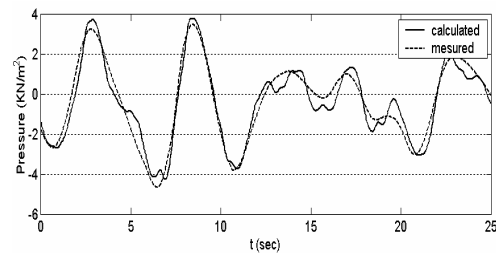
$$C_{2R} = 7.53 + 0.88\alpha - 0.76\alpha^2 + 0.14\alpha^3 \quad (7)$$

$$P = (-0.13 - 0.06\alpha - 0.04\alpha^2 + 0.02\alpha^3) + (7.53 + 0.88\alpha - 0.76\alpha^2 + 0.14\alpha^3)\eta \quad (8)$$

جهت ملاحظه میزان انطباق فشارهای محاسبه شده از رابطه (۸) به مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، ۱۶ گراف ترسیم شده، که شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به عنوان نمونه ارائه شده‌اند.



شکل ۲۰- فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در $\alpha = 0$



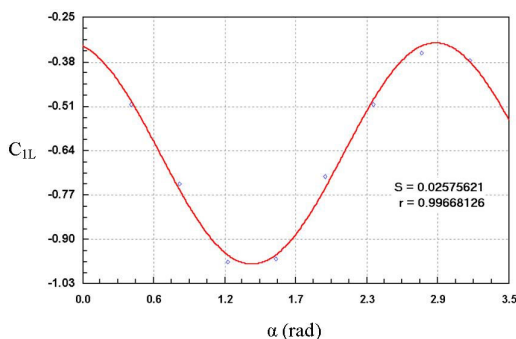
شکل ۲۱- فشار آزمایشگاهی و محاسباتی در $\alpha = \pi/8$

مقادیر بیشینه فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در نقاط مختلف در ۵ چرخه متوالی به عنوان نمونه در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) به ترتیب برای نقاط ۹، ۱۰ و ۱۱، مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شکل‌ها، محور افقی، نشان دهنده شماره چرخه و محور قائم نشان دهنده حداکثر فشار در چرخه مورد نظر می‌باشد. خط توپر نشان دهنده حداکثر فشار اندازه‌گیری شده و خط چین بیانگر حداکثر فشار محاسبه شده است.

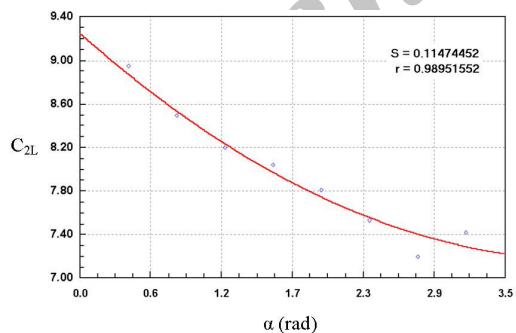
۲- روش مربعات خطای نرمال (RMSE):

$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_m - P_p}{P_m} \right)^2} \quad (10)$$

در روابط فوق، P_m بیشینه مقدار متغیر محاسبه شده، P_p بیشینه مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد نظر در طول یک چرخه و N بیانگر تعداد چرخه‌هاست [۱۷]. مقادیر شیب و عرض از مبدأ رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار محاسبه شده از رابطه (۸) و مقادیر خطای حاصله، در جدول (۵) ارائه شده است. روابط بین ضرایب C_1 و C_2 با زاویه α برای نقاط نیمه سمت چپ پایه در شکل‌های (۲۸) و (۲۹) نشان داده شده است.

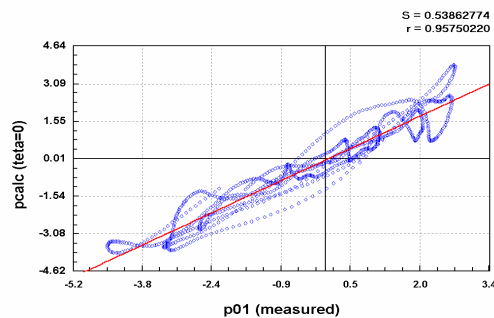


شکل ۲۸- رابطه بین C_1 و زاویه α برای نقاط سمت چپ پایه



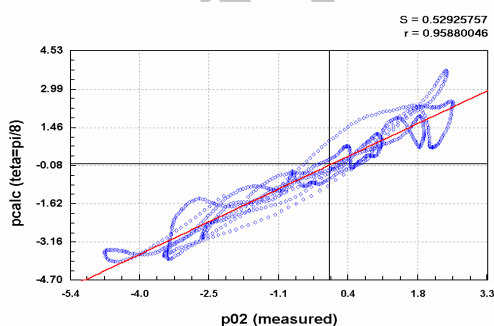
شکل ۲۹- رابطه بین C_2 و زاویه α برای نقاط سمت چپ پایه

با توجه به جدول (۵)، مشاهده می‌شود که مقادیر خطا در برخی نقاط نسبتاً زیاد است. برای رفع این مشکل می‌توان از توابع مرتبه بالاتر برای رابطه فشار - موج استفاده نمود. این مسئله به عنوان موضوعی برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.



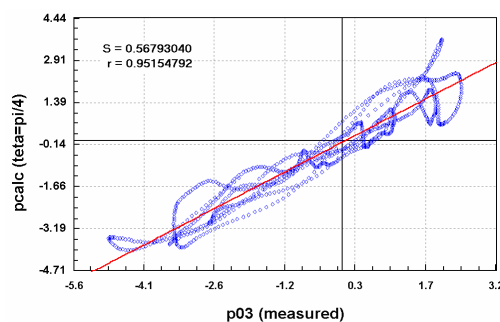
شکل ۲۵- رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

در $\alpha = 0$



شکل ۲۶- رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

در $\alpha = \pi/8$



شکل ۲۷- رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده

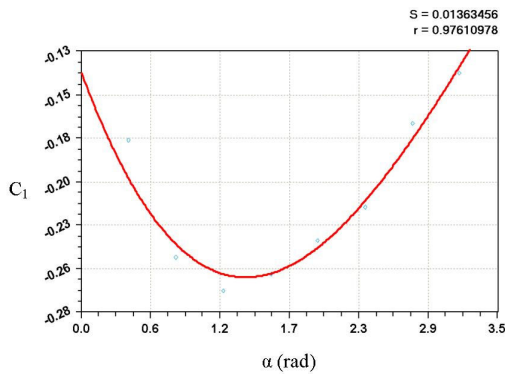
در $\alpha = \pi/4$

به منظور کمی نمودن خطای مقادیر محاسبه شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای تغییرات فشار، از دو روش میانگین خطای نرمال و مربعات خطای نرمال استفاده می‌شود:
۱- روش میانگین خطای نرمال (MNE):

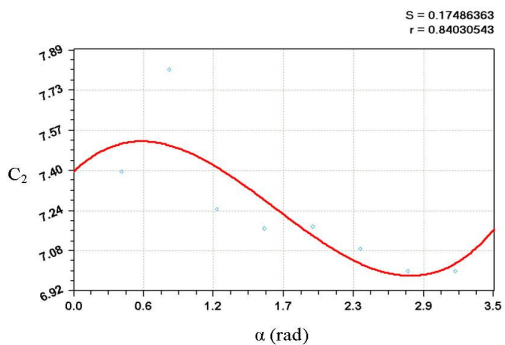
$$MNE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_m - P_p}{P_m} \quad (9)$$

$$P = (-0.14 - 0.19\alpha + 0.09\alpha^2 - 0.008\alpha^3) + (7.4 + 0.46\alpha - 0.5\alpha^2 + 0.1\alpha^3)\eta \quad (16)$$

مقادیر شیب و عرض از مبدأ رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار محاسبه شده از رابطه (۱۶) و مقادیر خطای حاصله در جدول (۷) ارائه شده است. در این جداول، s انحراف معیار و r ضریب همبستگی است.



شکل ۳۰- رابطه بین C_1 و زاویه α برای متوسط مقادیر مربوط به نقاط متناظر در نیمه‌های سمت راست و چپ استوانه



شکل ۳۱- رابطه بین C_2 و زاویه α برای متوسط مقادیر مربوط به نقاط متناظر در نیمه‌های سمت راست و چپ استوانه

باتوجه به جداول (۵) تا (۷) مشاهده می‌شود که خطای مقادیر محاسبه شده از طریق رابطه (۱۶)، نسبت به روابط (۸) و (۱۳) کمتر است. در نتیجه رابطه نهایی برای محاسبه فشار به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$P = \psi(\alpha) + \xi(\alpha)\eta \quad (17)$$

$$\psi(\alpha) = -0.14 - 0.19\alpha + 0.09\alpha^2 - 0.008\alpha^3 \quad (18)$$

$$\xi(\alpha) = 7.4 + 0.46\alpha - 0.5\alpha^2 + 0.1\alpha^3 \quad (19)$$

جدول ۵- شیب و عرض از مبدأ رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از رابطه (۸) و مقادیر خطای حاصله

node	α	$P_{calc} = a + b * P_{measured}$		s	r	میزان خطا به روش	میزان خطا به روش
		a	b			MNE	RMSE
						%	%
۱	۰	-۰/۰۳	-۰/۹۲	-۰/۵۴	-۰/۹۶	۱۱	۱۴
۲	۲۲/۵	-۰/۰۵	-۰/۹۱	-۰/۵۳	-۰/۹۶	۱۵	۱۷
۳	۴۵	-۰/۰۴	-۰/۹۱	-۰/۵۷	-۰/۹۵	۲۲	۲۴
۴	۶۷/۵	-۰/۰۵	-۰/۹	-۰/۵۹	-۰/۹۵	۲۳	۲۶
۵	۹۰	-۰/۰۴	-۰/۹	-۰/۵۶	-۰/۹۵	۲۲	۲۶
۶	۱۱۲/۵	-۰/۰۴	-۰/۹۱	-۰/۵۳	-۰/۹۵	۲۰	۲۳
۷	۱۳۵	-۰/۰۲	-۰/۹۲	-۰/۵۰	-۰/۹۶	۱۷	۲۱
۸	۱۵۷/۵	-۰/۰۴	-۰/۹۲	-۰/۵۰	-۰/۹۶	۱۳	۱۷
۹	۱۸۰	-۰/۰۲	-۰/۹۲	-۰/۵۰	-۰/۹۶	۱۲	۱۶
۱۰	۲۰۲/۵	-۰/۰۵	-۰/۹۲	-۰/۵۱	-۰/۹۶	۱۵	۲۰
۱۱	۲۲۵	-۰/۱۱	-۰/۹۳	-۰/۵۴	-۰/۹۵	۲۰	۲۳
۱۲	۲۴۷/۵	-۰/۱۴	-۰/۹۵	-۰/۵۹	-۰/۹۵	۲۱	۲۵
۱۳	۲۷۰	-۰/۱۷	۱/۰۲	-۰/۶۵	-۰/۹۵	۲۳	۲۷
۱۴	۲۹۲/۵	-۰/۱۸	۱/۰۹	-۰/۶۶	-۰/۹۵	۲۱	۲۴
۱۵	۳۱۵	-۰/۱۱	۱/۰۶	-۰/۶۹	-۰/۹۶	۶	۱۱
۱۶	۳۳۷/۵	-۰/۰۶	۱/۳۳	-۰/۷۸	-۰/۹۵	۱۳	۱۵

روابط بدست آمده برای نقاط سمت چپ استوانه به صورت زیر خواهند بود:

$$C_{1L} = -0.15 - 0.33\alpha - 0.22\alpha^2 - 0.04\alpha^3 \quad (11)$$

$$C_{2L} = 7.43 + 0.03\alpha - 0.21\alpha^2 + 0.5\alpha^3 \quad (12)$$

$$P = (-0.15 - 0.33\alpha - 0.22\alpha^2 - 0.04\alpha^3) + (7.43 + 0.03\alpha - 0.21\alpha^2 + 0.5\alpha^3)\eta \quad (13)$$

مقادیر شیب و عرض از مبدأ رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار محاسبه شده از رابطه (۱۳) و مقادیر خطای حاصله در جدول (۶) ارائه شده است. ارتباط بین ضرایب C_1 و C_2 با زاویه α برای متوسط مقادیر مربوط به نقاط متناظر در نیمه‌های سمت راست و چپ استوانه در شکل‌های (۳۰) و (۳۱) نشان داده شده است. روابط بدست آمده برای متوسط مقادیر مربوط به نقاط متناظر در نیمه‌های سمت راست و چپ استوانه به صورت زیر خواهند بود:

$$\bar{C}_1 = -0.14 - 0.19\alpha + 0.09\alpha^2 - 0.008\alpha^3 \quad (14)$$

$$\bar{C}_2 = 7.4 + 0.46\alpha - 0.5\alpha^2 + 0.1\alpha^3 \quad (15)$$

۵- جمع‌بندی نتایج

در این مقاله، توزیع فشار در اطراف یک پایه استوانه‌ای با مقطع مدور، از طریق تحلیل و بررسی نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و روابطی برای تعیین فشار در یک نقطه دلخواه روی سطح المان استوانه‌ای پیشنهاد گردید. نتایج حاصل از این تحقیق بر اساس داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده، به شرح زیر قابل بیان است:

۱- به رغم اینکه به لحاظ تئوری رابطه فشار- موج (رابطه فشار با تراز سطح آب) مستقل از موقعیت افقی نقاط است، توزیع فشار روی محیط استوانه متغیر بوده و نسبت به محور طولی آن نیز نامتقارن می‌باشد.

۲- مقادیر فشار در جهت‌های عرضی استوانه مرتباً تغییر کرده و موقعیت مقادیر حداکثر فشار در طرفین استوانه جابجا می‌شوند که این مسأله باعث ایجاد نیروی دینامیکی جانبی (برآ) می‌شود.

۳- تاریخچه‌های زمانی فشار در نقاط مختلف اطراف پایه تحت امواج تصادفی، در یک بازه زمانی مشخص، اختلاف ناچیزی دارند. در حالی که اختلاف فشار نقاط مختلف در پایه تحت امواج منظم بیشتر شده است. به نظر می‌رسد ماهیت تصادفی امواج، باعث شده است که اثر تشکیل و جاری شدن گردابه‌ها به عنوان عامل اصلی اختلاف فشار بین نقاط مختلف روی پایه، تا حدودی کم رنگ شود.

۴- توزیع فشار در اطراف استوانه متأثر از پروفیل سطح آب است. همچنین روابط (۱۷) تا (۱۹) که رابطه بین فشار و پروفیل سطح آب را خطی در نظر گرفته و رابطه بین شیب و عرض از مبدأ این خط با موقعیت افقی نقاط را از طریق یک رابطه درجه سوم بیان می‌کنند، مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشته و خطاهای موجود و پیش‌بینی شده در حد قابل قبولی می‌باشند.

۵- به علت هزینه بالای ثبت فشار در اعماق مختلف، در داده‌های استخراج شده از آزمایش‌ها، تغییر عمق مشاهده نمی‌شود. به همین علت امکان لحاظ نمودن این پارامتر در معادلات وجود نداشت. از آنجا که نتایج آزمایش‌های انجام شده تحت اثر امواج تصادفی، به طور ویژه برای پایه‌های سکوه‌های فراساحل مفید خواهد بود، طبیعی است که زبری انتخاب شده در آزمایش برای سطح پایه باید به مقادیر واقعی نزدیک باشد. قطر انتخابی برای پایه نیز در مقایسه با قطر پایه‌های یک سکوی فراساحلی متداول، مقدار متوسطی محسوب می‌شود. از آنجا که امواج تصادفی بر اساس طیف تراز سطح آب JONSWAP شبیه‌سازی شده‌اند و این طیف معمولاً انطباق مناسبی به شرایط واقعی دارد، انتظار می‌رود سینماتیک ذرات آب از جمله سرعت به وجود آمده در محیط موج، شبیه‌سازی

جدول ۶- رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار محاسبه شده از رابطه (۱۳) و مقادیر خطای حاصله

node	α	$P_{calc} = a + b * P_{measured}$		s	r	میزان خطا به روش	میزان خطا به روش
		a	b			MNE	RMSE
						%	%
۱	۰	-۰/۲۲	-۰/۹۲	۰/۵	-۰/۹۶	۱۱	۱۴
۲	۲۲/۵	۲/۸۳	۱/۸۸	۱/۰	-۰/۹۷	۱۵	۱۷
۳	۴۵	۲/۳۳	۱/۶۱	-۰/۸۸	-۰/۹۶	۲۲	۲۳
۴	۶۷/۵	۱/۸	۱/۳۸	۰/۸	-۰/۹۶	۲۳	۲۶
۵	۹۰	۱/۳۳	۱/۲	-۰/۶۸	-۰/۹۶	۲۲	۲۵
۶	۱۱۲/۵	-۰/۹۴	۱/۰۹	-۰/۵۷	-۰/۹۶	۲۰	۲۴
۷	۱۳۵	-۰/۶۵	۱/۰	-۰/۵۱	-۰/۹۷	۱۷	۲۱
۸	۱۵۷/۵	-۰/۳۹	-۰/۹۴	-۰/۶۸	-۰/۹۷	۱۳	۱۷
۹	۱۸۰	-۰/۲۴	-۰/۹۱	-۰/۶۷	-۰/۹۷	۱۲	۱۶
۱۰	۲۰۲/۵	-۰/۲۲	-۰/۹۱	-۰/۶۶	-۰/۹۷	۱۵	۱۹
۱۱	۲۲۵	-۰/۲۳	-۰/۹۱	-۰/۶۸	-۰/۹۶	۱۹	۲۳
۱۲	۲۴۷/۵	-۰/۲۳	-۰/۹۳	-۰/۵۲	-۰/۹۶	۲۱	۲۴
۱۳	۲۷۰	-۰/۲۶	-۰/۹۷	-۰/۵۴	-۰/۹۶	۲۳	۲۶
۱۴	۲۹۲/۵	-۰/۲۵	-۰/۹۹	-۰/۵۳	-۰/۹۶	۲۱	۲۴
۱۵	۳۱۵	-۰/۲	-۰/۸۸	-۰/۵۲	-۰/۹۶	۶	۱۱
۱۶	۳۳۷/۵	-۰/۱۷	-۰/۹۸	-۰/۵۳	-۰/۹۶	۱۳	۱۵

جدول ۷- رابطه خطی بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار محاسبه شده از رابطه (۱۶) و مقادیر خطای حاصله

node	α	$P_{calc} = a + b * P_{measured}$		s	r	میزان خطا به روش	میزان خطا به روش
		a	b			MNE	RMSE
						%	%
۱	۰	-۰/۲۲	-۰/۹۲	۰/۵۱	-۰/۹۶	۱۲	۱۴
۲	۲۲/۵	۲/۸۳	۱/۸۸	۰/۵۱	-۰/۹۷	۱۶	۱۷
۳	۴۵	۲/۳۳	۱/۶۱	-۰/۵۳	-۰/۹۶	۲۲	۲۴
۴	۶۷/۵	۱/۸	۱/۳۸	-۰/۵۵	-۰/۹۶	۲۳	۲۶
۵	۹۰	۱/۳۳	۱/۲	-۰/۵۳	-۰/۹۶	۲۲	۲۶
۶	۱۱۲/۵	-۰/۹۴	۱/۰۹	-۰/۵۰	-۰/۹۶	۲۰	۲۴
۷	۱۳۵	-۰/۶۵	۱/۰	-۰/۶۷	-۰/۹۷	۱۷	۲۱
۸	۱۵۷/۵	-۰/۳۹	-۰/۹۴	-۰/۶۶	-۰/۹۷	۱۳	۱۷
۹	۱۸۰	-۰/۲۴	-۰/۹۱	-۰/۶۷	-۰/۹۷	۱۲	۱۶
۱۰	۲۰۲/۵	-۰/۲۲	-۰/۹۱	-۰/۶۸	-۰/۹۷	۱۵	۲۰
۱۱	۲۲۵	-۰/۲۳	-۰/۹۱	-۰/۵۳	-۰/۹۶	۲۰	۲۳
۱۲	۲۴۷/۵	-۰/۲۳	-۰/۹۳	-۰/۵۸	-۰/۹۶	۲۱	۲۵
۱۳	۲۷۰	-۰/۲۶	-۰/۹۷	-۰/۶۶	-۰/۹۶	۲۳	۲۷
۱۴	۲۹۲/۵	-۰/۲۵	-۰/۹۹	-۰/۷	-۰/۹۶	۲۲	۲۴
۱۵	۳۱۵	-۰/۲	-۰/۸۸	-۰/۷۸	-۰/۹۶	۶	۱۱
۱۶	۳۳۷/۵	-۰/۱۷	-۰/۹۸	-۰/۹۲	-۰/۹۶	۱۳	۱۵

- [8] Kim, C. H., Wang, Z. M., "Horizontal Forces of Vertical Truncated Column in Stokes 5th-Order Waves", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1999, 9 (3), 167-174.
- [9] Boo, S. Y., "Linear and Nonlinear Irregular Waves and Forces in a Numerical Wave Tank", *Ocean Engineering*, 2002, 29, 475-493.
- [10] Akyildiz, H., "Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Cylinder due to the Wave Diffraction in a Finite Water Depth", *Ocean Engineering*, 2002, 29, 1119-1132.
- [11] Roopsekhar, K. A., Sundar, V., "Regular Wave Pressures and Forces on Submerged Pipelines near a Sloping Boundary", *Ocean Engineering*, 2004, 31, 2295-2317.
- [12] Boo, S. Y., "Measurements of Higher Harmonic Wave Forces on a Vertical Truncated Circular Cylinder", *Ocean Engineering*, 2005, 33, 219-233.
- [13] Jian, Y., Zhen, J., Zhu, Q., "Short Crested Wave-Current Forces around a Large Vertical Circular Cylinder", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2008, 27, 346-360.
- [14] Mahir, N., "Three-Dimensional Flow around a Square Cylinder near a Wall", *Ocean Engineering*, 2009, 36, 357-367.
- [15] Wang, C. Z., Wu, G. X., "Interactions between Fully Nonlinear Water Waves and Cylinder Arrays in a Wave Tank", *Ocean Engineering*, 2010, 37, 400-417.
- [16] Sorensen, R. M., "Basic Coastal Engineering", Springer Science Business Media, Inc., USA, 2006.
- [17] Mackwood, P. R., "Wave and Current Flows around Circular Cylinders at Large Scale", Lip Project, 10 D, UK, 1993.
- [۱۸] لطف‌اللهی یقین، م.ع.، مجتهدی، ع.، "توابع احتمالی حاکم بر نیروها و لنگرهای ناشی از امواج تصادفی دریا بر پایه قائم"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۶.
- [۱۹] لطف‌اللهی یقین، م.ع.، کیوان، ف.، نقی‌پور، م.، "تخمین نیروی جانبی موثر بر یک پایه قائم زیر سکوی دریائی تحت اثر امواج تصادفی دریا"، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان (استقلال)، ۱۳۸۳، ۲۳ (۱)، ۸۳-۹۴.
- [۲۰] نقی‌پور، م.، رئوفی، م.، "تخمین نیروی هیدرودینامیکی در اعضای استوانه ای با سطح صاف تحت اثر مشترک امواج تصادفی و جریان پایا"، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان (استقلال)، ۱۳۷۹، ۱۹ (۱)، ۷۵-۹۲.
- مناسبی از شرایط متداول واقعی باشد. عدد رینولدز تابعی از سرعت ذرات موج، قطر پایه و ویسکوزیته آب است. با توجه به این که برای این پارامترها، مقادیر متداولی در نظر گرفته شده است، انتظار می‌رود عدد رینولدز نیز شبیه‌سازی مناسبی از شرایط واقعی متداول برای سازه‌های فراساحل باشد. با توجه به مطالب فوق به نظر می‌رسد نتایج کیفی استخراج شده، برای شرایط متداول قابل تعمیم باشند. روابط ارائه شده برای محاسبه فشار، نیاز به یک سری ضرایب اصلاحی دارند تا تأثیرپذیری مقادیر فشار از پارامترهایی نظیر سرعت در محیط آبی، عمق آب در اطراف پایه، زبری سطح پایه و عدد رینولدز لحاظ گردد. بنا به اطلاعات نویسندگان مقاله، تاکنون چنین رابطه جامعی که اثر تمام پارامترهای مذکور را در نظر گرفته باشد، برای توزیع فشار تحت اثر امواج تصادفی ارائه نشده است. این کار می‌تواند به عنوان موضوعی برای تحقیقات آتی پیشنهاد شود.

۶- مراجع

- [1] Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., Schaaf, S. A., "Forces Exerted by Surface Waves on Piles", *Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineering*, 1950, 189, 149-154.
- [2] Chakrabarti, S. K., "Hydrodynamics of Offshore Structures", WIT Press, UK, 2001.
- [3] Dawson, T. H., "Offshore Structural Engineering", Prentice-Hall Inc., USA, 1983.
- [4] Hallam, M. G., Heaf, N. J., Wootton, L. R., "Dynamics of Marine Structures: Methods of Calculating the Dynamic Response of Fixed Structures Subject to Wave and Current Action", Atkins Research and Development, CIRIA Underwater Engineering Group, Report UR8, 2nd Edition, UK, 1978.
- [5] Summer, B. M., Fredsoe, J., "Hydrodynamics around Cylindrical Structures", World Scientific Publishing Co. Ltd, Singapore, 2006.
- [6] Huang, J. B., Eatock Taylor, R., "Semi-Analytical Solution for Second-Order Wave Diffraction by a Truncated Circular Cylinder in Monochromatic Waves", *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 319, 171-196.
- [7] Stansberg, C. T., "Comparing Ringing Loads from Experiments with Cylinders of Different Diameters - an empirical study", *Proceedings of the 8th Conference on Behavior of Offshore Structures (Boss'97)*, 1997, Vol. 2, pp 95-109.