



طراحی موجساز لولایی برای تولید امواج منظم در حوضچه کشش

محمد اسدیان قهفرخی^۱، علی حاجیلوی^۲، محمد سعید سیف^۳

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک

M.Asadian@Gmail.com

چکیده

امواج ناشی از باد یکی از پدیده های پیچیده اقیانوس ها هستند و معادلات حاکم بر این امواج بخصوص در حالت هایی که عبارتهای غیرخطی نیز در نظر گرفته می شوند، بسیار پیچیده می باشند. از این رو نقش موجسازها در شبیه سازی امواج در آزمایشگاه های دریایی بسیار مهم جلوه می کند. در بیشتر آزمایشهای مربوط به سازه های شناور و یا سازه هایی که به بستر دریا متصل هستند و یا مطالعات مربوط به سواحل از حوضچه کشش که در انتهای آن یک موجساز قرار گرفته است، استفاده می گردد.

حرکت امواج، شرایط ایجاد آنها و قدرت مورد نیاز برای تولید امواج از روی تئوری خطی موج به خوبی تعیین می گردد. از آنجائیکه تحلیل امواج منظم، ساده تر و امکان پذیرتر است معمولا امواج از نوع منظم در نظر گرفته شده و سپس امواج نامنظم از ترکیب این گونه امواج بدست می آیند. در این مقاله به بررسی و تشریح عملکرد موجساز لولایی و همچنین نحوه ایجاد امواج منظم در آبهای عمیق پرداخته می شود.

کلمات کلیدی: موجساز لولایی - امواج منظم - حوضچه کشش - تولید موج منظم

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ دانشیار

^۳ دانشیار



مقدمه

بسیاری از مسایل دینامیک سیالات با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی قابل بررسی هستند. در این بین یکی از پارامترهای محیطی که نمی توان نقش آن را در طراحی و ساخت سازه های دریایی و شناور ها نادیده گرفت موج است. به منظور مطالعه رفتار شناورها در دریا می بایست به گونه ای مصنوعی امواج را در یک حوضچه آزمایش ایجاد کرد. از آنجائیکه تحلیل امواج منظم، ساده تر و امکان پذیرتر است معمولا امواج از نوع منظم در نظر گرفته شده و سپس امواج نامنظم از ترکیب این گونه امواج بدست می آیند، عموما این امواج منظم، سینوسی هستند و گرچه واقعی نیستند اما برای شبیه سازی نیروهای وارده از طرف امواج واقعی، مناسب به نظر میرسند. درکنار این مسائل تکرار امواج سینوسی ساده تر است و لذا تحلیل داده های تست مدل هم ساده تر می نماید. به علاوه، نتایج حاصل از بررسی عملکرد شناور در امواج بر اساس شرایط موجهای سینوسی در فضای آزمایشگاهی، به سادگی قابل بررسی و تایید است. [4]

معادلات حاکم و رابطه میان حرکت صفحه و مشخصات موج تولید شده

به منظور دست یافتن به فرم ریاضی معادله موج حاکم، حرکت سیال به صورت دوبعدی، غیرچرخشی، غیر لزج و غیر قابل تراکم در یک کانال نیمه بینهایت ($0 \leq x \leq \infty$) با سطح مقطع مستطیلی و با عرض B و عمق ثابت h در نظر گرفته می شود. دستگاه مختصات سیستم و شکل ساده موجساز لولایی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

پتانسیل سرعت $\varphi(x, y, t)$ موج کم دامنه ایجاد شده توسط حرکت هارمونیک ساده پارو^۴ حول $x = 0$ همراه با شرایط مرزی مربوطه توسط معادله لاپلاس به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq \infty \quad \text{و} \quad 0 \leq y \leq h \quad (1)$$

همراه با شرایط مرزی:

⁴ Flap



$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y = 0 \quad (2)$$

$$\omega^2 \phi + g(\partial \phi / \partial y) = 0 \quad \text{on } y = h \quad (3)$$

$$(\partial \phi / \partial x) = \omega \xi(y) \cos(\omega t) \quad \text{on } x = 0 \quad (4)$$

ω فرکانس زاویه ای حرکت پارو، g شتاب ثقل و $\xi(y)$ جابجایی عرضی پارو است.

در نهایت پس از حل معادله ۱، پتانسیل سرعت به فرم زیر در می آید: [2]

$$\phi = -\frac{\omega}{k} A \cosh(ky) \sin(\omega t - kx) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega}{k_n} A_n \cos(k_n y) \exp(k_n x) \cos(\omega t) \quad (5)$$

که k عدد موج و ریشه حقیقی مثبت رابطه تفرق^۵ است:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (6)$$

در حالیکه k_n ها ریشه های حقیقی مثبت معادله ۷ هستند:

$$\omega^2 = -gk_n \tan(k_n h) \quad (7)$$

با استفاده از معادله (۴) ضرایب A و A_n ها به صورت زیر بدست می آیند:

$$A \cosh(ky) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(k_n y) = \xi(y) \quad (8)$$

$$A = \frac{2k \int_0^h \xi(y) \cosh(ky) dy}{\sinh(kh) \cosh(kh) + kh} \quad (9)$$

$$A_n = \frac{2k_n \int_0^h \xi(y) \cos(k_n y) dy}{\sin(k_n h) \cos(k_n h) + K_n h} \quad (10)$$

واضح است که حرکت سیال ترکیبی از ۲ بخش است:

یک بخش موجی که در راستای x مثبت منتشر می شود و بخش دیگر مجموعه ای از ترمهای دیگر که

به صورت نمایی در طول محور x به تدریج از بین می روند. دامنه موج به صورت معادله ۱۱ ساده می

شود:

⁵ Dispersion



$$a = A \sinh(kh) \quad (11)$$

با استفاده از معادله برنولی فشار p از معادله ۵ بدست می آید. [1]

$$P = -\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \rho g(h - y) - \rho q^2 / 2 = P_w + P_i + \rho g(h - y) \quad (12)$$

$$P_w = \rho g A [\cosh(ky) / \cosh(kh)] \cos(\omega t - kx) \quad (13)$$

$$P_i = \sum_{n=1}^{\infty} \rho g A_n \tan(k_n h) \cos(k_n y) \exp(-k_n x) \sin \alpha t \quad (14)$$

P_w ، فشار عمودی بیان کننده بخش موجی نوسانات فشار هیدرودینامیکی و P_i ، فشار اینرسی ناشی از بخش گذرای فضای φ است. فشار عمودی در $x=0$ همفاز با سرعت پارو است که در نتیجه نیاز به مقداری کار در یک سیکل دارد از سوی دیگر فشار اینرسی P_i همفاز با شتاب پارو است و به طور متوسط کاری انجام نمی دهد، با این حال بخش اصلی P_i به صورت اینرسی افزوده پارو خود را نشان می دهد.

در معادلات مربوط به موجساز، آبخور پارو با f و بیشترین گام حرکت آن در سطح آزاد با S مشخص می شوند. به منظور ارضاء شرط مرزی سطح تماس، فرض می شود که زاویه ماکزیمم پارو

$$\theta = \arctan(s / f) \quad (15)$$

کوچک باشد، در نتیجه معادله سطح برخورد که با $\xi(y)$ نشان داده می شود به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \xi(y) &= (S / f)(y - d) & \text{for } d \leq y \leq h \\ \xi(y) &= 0 & \text{for } y < d \end{aligned} \quad (16)$$

بعد از جایگذاری معادله ۱۶ در معادلات ۹ و ۱۰، ضرایب A و A_n ها قابل محاسبه اند که البته گام حرکت پارو S و آبخور پارو f نیز به عنوان پارامترهایی در این معادلات ظاهر می شود تا به نوعی معادلات موج و موجساز به یکدیگر مرتبط گردند:

$$A = 2S \frac{kf \sinh(kh) - \cos(kh) + \cosh(kd)}{kf [\sinh(kh) \cosh(kh) + kh]} \quad (17)$$

$$A_n = 2S \frac{k_n f \sin(k_n h) + \cos(k_n h) - \cos(k_n d)}{k_n f [\sin(k_n h) \cos(k_n h) + k_n h]} \quad (18)$$

حال با استفاده از معادلات ۱۱ و ۱۷ رابطه میان دامنه و ماکزیمم گام حرکت بدست می آید.



$$a = 2S \frac{[kf \sinh(kh) - \cosh(kh) + \cosh(kd)] \sinh(kh)}{kf [\sinh(kh) \cosh(kh) + kh]} \quad (19)$$

توان لازم برای به حرکت درآوردن پارو بدون در نظر گرفتن هرگونه اتلاف مکانیکی و اصطکاکی برای تولید امواج سینوسی با طول موج λ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$P_0(t) = \left(\frac{\rho\omega^2 S_0 A}{2k}\right) \left[\sinh kh + \frac{(1 - \cosh kh)}{kh}\right] \cos^2 \omega t + \left(\frac{\rho\omega^2 S_0}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{k_n} [\sin k_n h + \frac{(\cos k_n h - 1)}{k_n h}] \sin \omega t \cos \omega t + \left(\frac{\rho\omega g S_0}{2}\right) \left[\frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{3h}\right] \cos \omega t \quad (20)$$

با انتگرال گیری از معادله فشار می توان کل نیروی هیدرودینامیکی را بدست آورد.

$$F_0(t) = \left(\frac{\rho\omega A \sinh kh}{k}\right) \cos \omega t + \left(\rho\omega \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{k_n} \sin k_n h\right) \sin \omega t + \frac{\rho g h^2}{2} \quad (21)$$

از نقطه نظر طراحی و بهینه سازی سیستم، این تمایل وجود دارد که اندازه پارو به گونه ای باشد که برای حرکت نیاز به کمترین گشتاور و نیروی هیدرودینامیکی داشته باشد.

محدودیت های تولید موج

معمولاً دو عامل پریود و ارتفاع موج را به عنوان شاخص های شناسایی امواج سطحی آب در نظر می گیرند و در یک موجساز تلاش می شود که این دو پارامتر را به نحوی به رفتار سیستم مرتبط کرد. اساساً برای تولید یک موج دلخواه توسط موجساز دو پارامتر را باید کنترل کرد: [5,6]

۱. سرعت حرکت پیستون یا پارو

۲. محدوده مکانی رفت و برگشت پیستون یا پارو

ظاهراً از نظر تئوری برای تولید موج با پریود خاص ولی با ارتفاع های مختلف محدودیتی وجود ندارد ولی در عمل دو محدودیت عمده سر راه این هدف قرار دارد

۱. محدودیت در سرعت حرکت پارو

۲. محدودیتهای مربوط به طبیعت موج که منجر به ناپایداری و شکست موج می شود.



همچنین برای حصول اطمینان از اینکه فرم موج تولید شده توسط امواج منعکس شده از انتهای حوضچه تغییر شکل پیدا نکند، جاذبه‌های موج^۶ برای میرا کردن موج و کمینه کردن انعکاسات نامطلوب موج، به کار گرفته می‌شوند. این جاذبه‌ها معمولاً در کل عرض حوضچه از سطح آزاد تا کف آن امتداد می‌یابند. [3]

نتایج

برای ایجاد موجی دلخواهی به ارتفاع ۰,۱۱ متر و طول موج ۱,۵۴ متر در حوضچه کشش به ابعاد داده شده در جدول ۱ بوسیله موجساز لولایی شکل ۲ با استفاده از معادلات بدست آمده در بخش معادلات حاکم و رابطه میان حرکت صفحه و مشخصات موج تولید شده این تحقیق نتایج زیر حاصل می‌شود که در جدول ۲ ارائه می‌گردد.

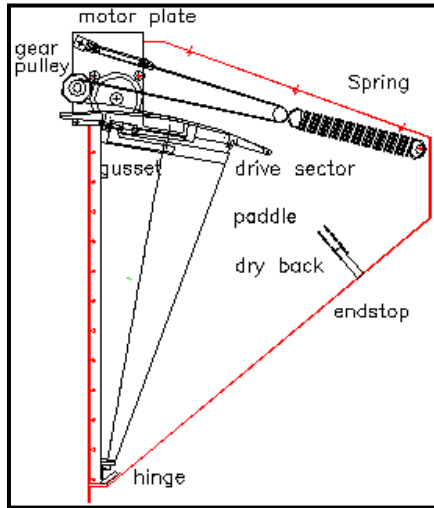
جدول ۱: ابعاد حوضچه کشش

طول حوضچه کشش	۲۵ متر
عرض حوضچه کشش	۲,۵۵ متر
ارتفاع حوضچه کشش	۱,۷۵ متر
عمق آب در حوضچه کشش	۱,۲۵ متر

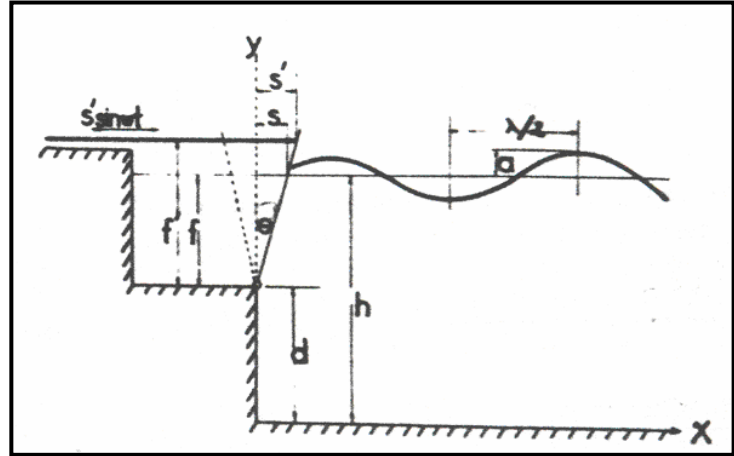
جدول ۲: نتایج حاصل از طراحی موجساز لولایی

عدد موج	۴,۰۶۱۵	rad/m
سرعت زاویه ای	۶,۳۱۰۶	rad/s
دوره تناوب	۰,۹۹۵۶۵	s
گام حرکت پارو	۰,۱۳۶۷	m
نیروی وارد بر صفحه	۲۰۹۱۰,۴۰۷۵	N
توان لازم برای به حرکت درآوردن پارو	۱۴۰۴,۲۱۵۱	W

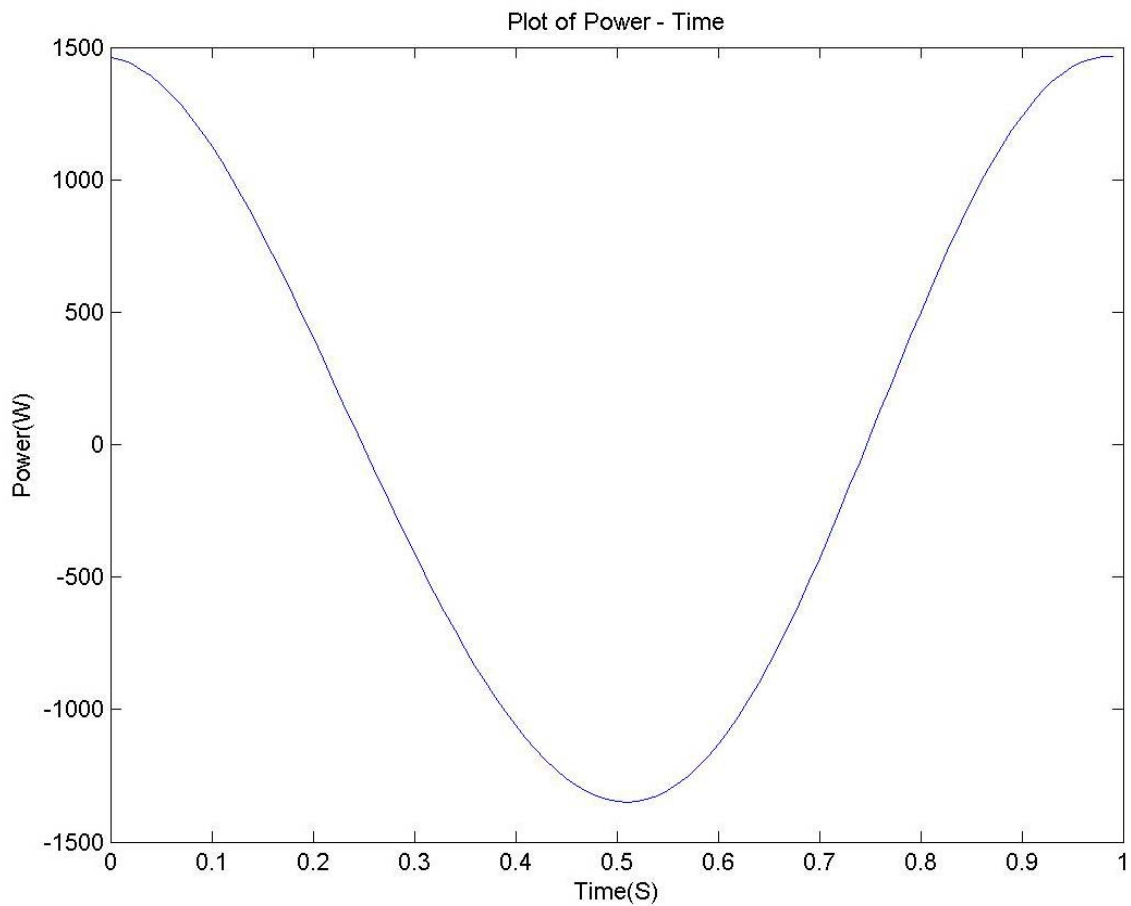
⁶ Wave Absorber



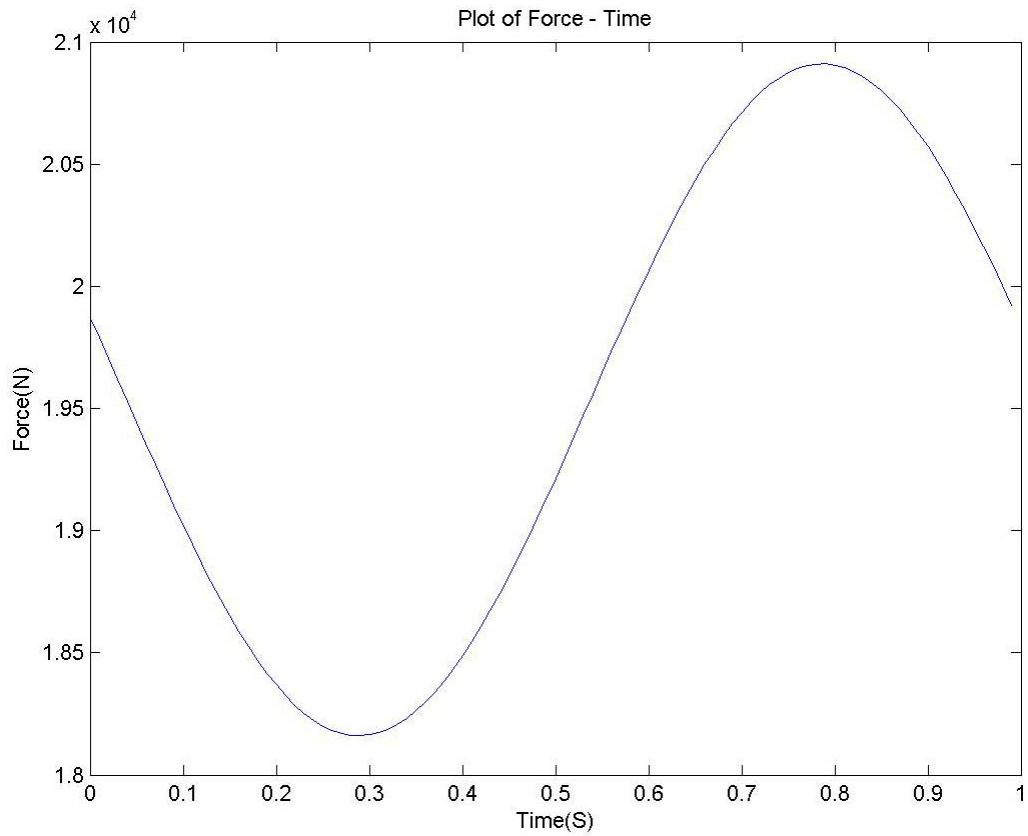
شکل ۲: اجزای موجساز لولایی (بارویی)



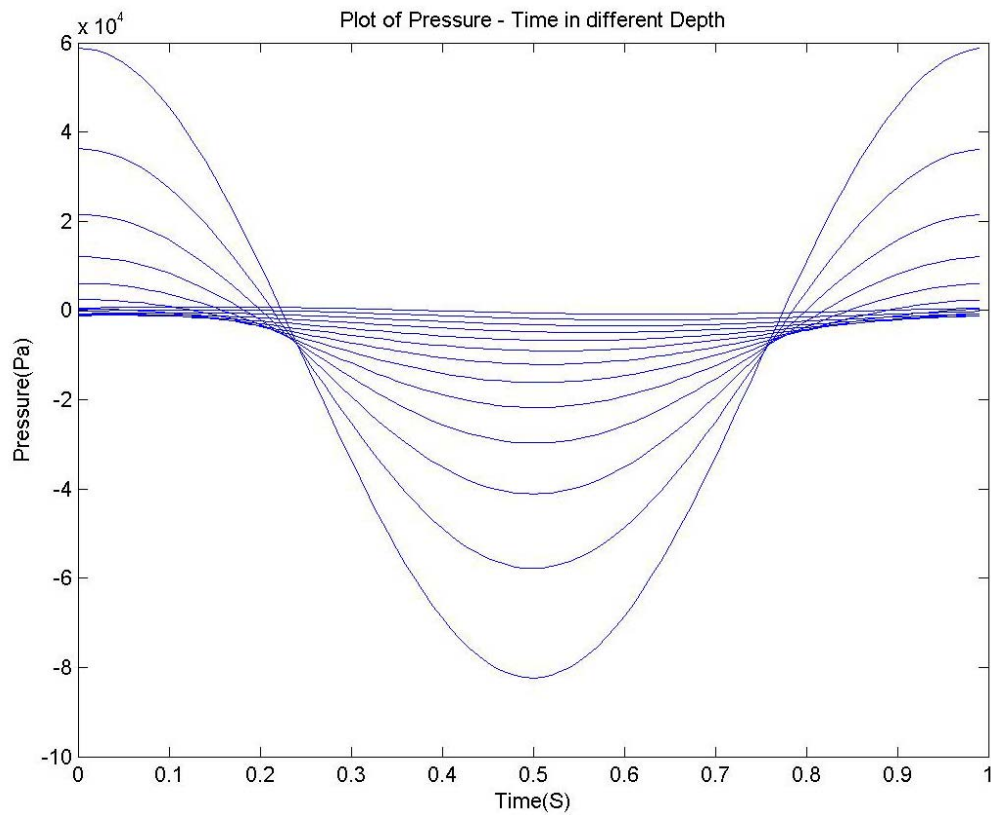
شکل ۱: نمای کلی نحوه قرار گیری مولد موج لولایی



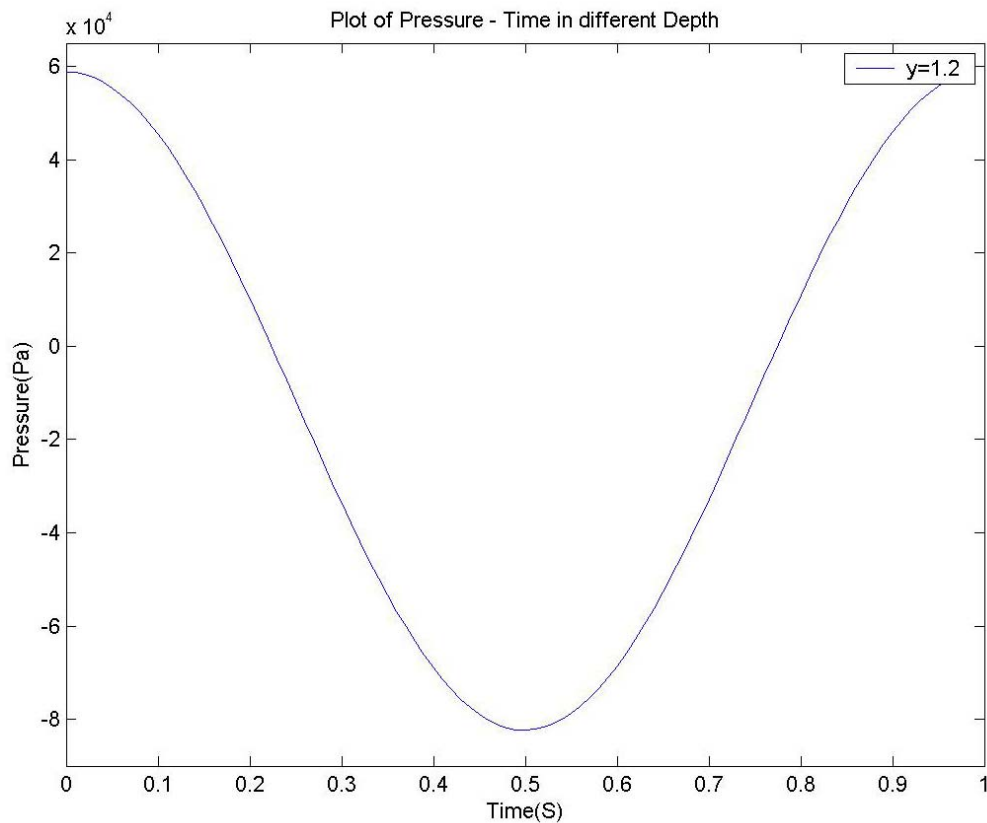
شکل ۳: نمودار توان مورد نیاز در یک دوره تناوب



شکل ۴: نمودار نیروی وارد بر صفحه در یک دوره تناوب



شکل ۵: نمودار فشار وارد بر صفحه در عمق های مختلف در یک دوره تناوب



شکل ۵: نمودار فشار وارد بر صفحه در عمق ۱,۲ متری در یک دوره تناوب

مراجع

- ۱- دکتر چگینی، نظریه امواج، جهاد تحقیقات و آبخیزداری، جلد اول.
- ۲- Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, "water wave mechanics for engineers and scientists", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1992.
- ۳- Subrata K. Chakrabarti, "Offshore structure modeling", World scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1994.
- ۴- M. E. McCormick, "Dynamics of marine vehicles", Ocean Engineering: A. Wiley Series, 1972.
- ۵- سلطانی و آق تومان، تولید امواج منظم در حوضچه کشش، مرکز تحقیقات هیدرو فیزیک شیراز، نهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، اسفند ۱۳۸۳، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مکانیک
- ۶- خلیل آبادی و بیدختی، روشی برای تولید تک موج در آزمایشگاه، نهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، اسفند ۱۳۸۳، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مکانیک