



بررسی پاسخ دینامیکی یک سیلندر قائم شناور در برخورد با یک موج منظم به روش المان مرزی

محمود اعتماددار^۱، حسن قاسمی^۲، محمد جواد کتابداری^۲
دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

هدف اصلی این تحقیق بررسی پاسخ دینامیکی یک شناور در برخورد با یک موج منظم سینوسی میباشد. یک سازه دریایی ثابت یا شناور بطور مداوم در معرض برخورد با امواج دریایی با پریودها و دامنه های متفاوتی قرار دارد. شاید بتوان گفت مهمترین مساله برای هر سازه دریایی چه در هنگام طراحی و چه در هنگام نصب و بهره برداری محاسبه نیروهای محیطی وارد بر آن سازه و بررسی پاسخ آن سازه به این نیروها میباشد. در این تحقیق ما با استفاده از روش المان مرزی و تهیه کد تهیه شده (FASA) به محاسبه دامنه نیروهای وارده و دامنه حرکات یک سیلندر عمودی شناور که میتواند بعنوان المان اصلی در برخی از سازه های دریایی نظیر TLP یا سکوهای شناور و نیمه شناور و یا شمعهای دریایی باشد، میپردازیم. در نهایت نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تحقیقات پروفسور نیومن از دانشگاه MIT و مطالعات انجام گرفته در دانشگاه نیویورک بوسیله نرم افزار MOSES معتبر سازی میگردد.

کلمات کلیدی: روش المان مرزی-سیلندر قائم، پاسخ دینامیکی شش درجه آزادی

^۱ دانشجوی هیدرودینامیک کارشناسی ارشد

^۲ عضو هیئت علمی



۱- مقدمه

برای طراحی ایمن و کارآمد یک سازه دریایی ابتدا لازم است تاثیر عوامل محیطی نظیر باد، موج، جریانهای دریایی، گردابه ها و زلزله مورد مطالعه قرار گیرد. در این بین موج با توجه به اینکه بیش از سایر عوامل در طول عمر یک سازه دریایی میتواند بر آن اثر کند از حیث مطالعه در درجه اول اهمیت قرار دارد. تاکنون محققان زیادی با استفاده از روشهای مختلف عددی و تجربی به بررسی این موضوع پرداخته اند. روشهای عددی نسبت به آزمایشهای تجربی نیاز به صرف وقت و هزینه کمتری دارند که یکی از دلایل اصلی علاقمندی محققان به این روشها میباشد. روشهای عددی که تاکنون بطور گسترده در هیدرودینامیک دریایی مورد استفاده قرار گرفته اند عبارتند از روشهای تفاضل محدود، المان محدود، المان مرزی و استریپ تئوری.

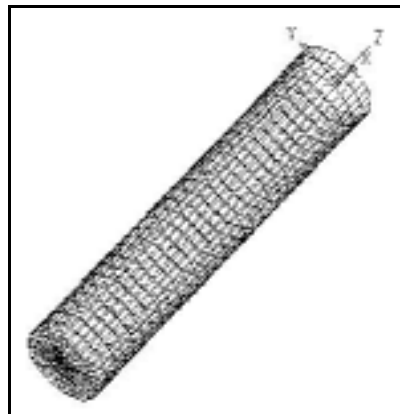
المان مرزی برای بررسی برخی از مسائل بسیار مناسب و کارآمد میباشد. چرا که میتواند نتایجی نزدیک به واقعیت را با استفاده از محاسباتی سبکتر نسبت به دیگر روشها در اختیار ما قرار دهد. در این تحقیق نیز ما با استفاده از روش المان مرزی به بررسی پاسخ یک سازه شناور در برخورد با یک موج منظم سینوسی پرداخته ایم. سازه مورد مطالعه یک استوانه عمودی شناور می باشد که سطح مغروق آن را با استفاده از المانهای چهار گوش شبکه بندی نموده ایم و با استفاده از روش المان مرزی به محاسبه دامنه نیروها و ممانهای وارده از طرف موج بر آن و بدنبال آن با محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی استوانه به محاسبه دامنه پاسخ سازه در حالت ۶ درجه آزادی پرداخته ایم. نتایج نهایی برای یک دامنه وسیعی از موجها با پیوند ۲ الی ۴۴ ثانیه محاسبه گردیده و در انتها بصورت گرافهایی رسم شده است.

L [m]	R [m]	KG [m]	T [m]	M [Ton]	I_{xx} [m]	I_{yy} [m]	I_{zz} [m]
400.0	20.0	200.0	200.0	256011.0	115.90	115.90	14.14

(جدول-۱): مشخصات فیزیکی مدل مورد بررسی

۲- مدل مورد بررسی:

همانطور که پیشتر نیز ذکر گردید مدل مورد مطالعه یک استوانه شناور قائم با توزیع جرم یکنواخت میباشد. ابعاد و مشخصات مورد نیاز در (جدول-۱) آورده شده است. سپس سطح استوانه با استفاده از المانهای چهار گوش شبکه بندی گردیده است. نمای ایزومتریک از شبکه تولید شده در (شکل-۱) مشاهده میگردد. شبکه تولید شده دارای ۱۱۲۰ پنل چهارگوش میباشد. تعداد تقسیمات طولی ۳۰ و تعداد تقسیمات شعاعی ۵ و زاویه ای ۳۲ میباشد. شعاع مرده برای کف استوانه یک پنجاهم شعاع کل میباشد زیرا المانهای کف نیز المانهای چهار گوش میباشد.



(شکل-۱): نمای ایزومتریک از مدل تولید شده بعد از شبکه بندی

۳- فرمولبندی و بکار گیری روش عددی روش المان مرزی :

فرضیات در نظر گرفته شده از این قرار میباشد. ابتدا فرض بر این است که سازه شناور در پاسخ به موج ورودی با دامنه کوچک در آب عمیق، با دامنه کم شروع نوسان می کند. در تئوری موج خطی مسائلی از این دسته را میتوان با برهم نهی خطی دو زیر مساله زیر مورد بررسی قرار داد.

الف) موج ورودی در برخورد با این سازه شناور با فرض ثابت بودن سازه پراکنده میگردد و جبهه آن تغییر میکند. این مساله به مساله پراکندگی^۱ معروف میباشد.

^۱ - Diffraction Problem



ب) بلافاصله بعد از اینکه موج پراکند گردید سازه شناور نیز بصورت هارمونیک حرکت نوسانی را در آب آرام آغاز میکند که این موضوع سبب انتشار یک سری امواج از سازه به محیط میگردد. ما این مساله را بنام مساله انتشار¹ میشناسیم.

سیال مورد بررسی یک سیال ایده ال و غیرچرخشی با عمق نا محدود می باشد. پتانسیل کل وابسته به زمان از ترکیب خطی سه ترم پتانسیل موج ورودی و پتانسیل موج منتشر شده و پتانسیل پراکندگی حاصل میگردد،

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R \quad (1)$$

که در آن Φ_I پتانسیل موج ورودی میباشد و از رابطه زیر تعریف میشود،

$$\Phi_I = \phi_I e^{-i\omega t} = \frac{igA \cosh[k(z+h)]}{\omega \cosh kh} e^{-ikx \cos \mu -iky \sin \mu} e^{-i\omega t} \quad (2)$$

پارامترهای بکار رفته در عبارت فوق بترتیب عبارتند از ،

A : دامنه موج ورودی بر حسب متر

ω : فرکانس زاویه ای موج ورودی

k : عدد موج $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ که از رابطه پراکندگی محاسبه میگردد. $\omega^2 = kg \tanh kh$

h : عمق آب مورد بررسی بر حسب متر

g : شتاب ثقل که برابر $9.81 [m/s^2]$ قرار داده شده است.

μ : راستای حمله موج نسبت به جهت مثبت محور X ها در دستگاه مختصات اصلی

همانطور که در (شکل-۱) مشاهده میگردد، دستگاه مختصات مورد استفاده یک دستگاه مختصات با محورهای متعام راستگرد (X, Y, Z) میباشد که بر روی سطح آب نسبت به موقعیت اولیه جسم قرار داده شده است و جهت مثبت محور Z ها بسمت بالا میباشد و راستای آن از مرکز جرم مدل عبود میکند. صفحه XOY منطبق

¹ - Radiation Problem



بر سطح صفحه آب در نظر گرفته شده است و صفحات XOY و YOZ و ZOX بعنوان صفحات تقارن شناور در نظر گرفته شده است.

Φ_D پتانسیل دیفرکشن می باشد که بصورت حاصل ضرب دو ترم زمان و مکان نمایش داده میشود

$$\Phi_D = \phi_D(x, y, z)e^{-i\omega t} \quad (3)$$

Φ_R پتانسیل ردییشن می باشد که از ترکیب خطی ۶ ترم مربوط به هر یک از درجات نوسانی ۶ گانه جسم حاصل میگردد،

$$\Phi_R = \phi_R(x, y, z)e^{-i\omega t} = i\omega \sum_{j=1}^6 \phi_j \xi_j e^{-i\omega t} \quad (4)$$

ϕ_j بنام ترم پتانسیل ردییشن واحد شناخته میشود که تنها به هندسه جسم بستگی دارد و ξ_j دامنه حرکت نوسانی در مد مربوطه است.

برای حل مساله المان مرزی مطرح شده به یک سری شرایط مرزی که با استفاده از پتانسیل جریان ارضا میگردد نیاز میباشد که از این قرار میباشند،
معادله لاپلاس در حوزه سیال :

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

شرط مرزی سطح آزاد خطی شده :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (6)$$

شرط مرزی در کف :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = -h \quad (7)$$

شرط مرزی ردییشن در فاصله خیلی دور :

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial r} - ik\Phi \right) = 0 \quad (8)$$



که در آن r فاصله شعاعی از مرکز شناور در کلیه جهات میباشد.

شرط مرزی بر روی سطح خیس :

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = n_j \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad \text{on } S_0 \quad (9)$$

n_j بردارهای نرمال بر سطح در هر نقطه بر روی سطح شناور نسبت به دستگاه مختصات اصلی میباشد،

$$\text{و } (n_4, n_5, n_6) = \vec{r} \times \vec{n} = (x, y, z) \times (n_1, n_2, n_3)$$

برای محاسبه پتانسیل ردییشن و دیفرکشن از رابطه دوم گرین و تابع گرین در فضای سه بعدی استفاده میشود، رابطه دوم گرین بصورت زیر تعریف میگردد،

$$\iint \frac{\partial \phi(\vec{X})}{\partial n} G(\vec{X}; \vec{\xi}) dS - \iint \frac{\partial G(\vec{X}; \vec{\xi})}{\partial n} \phi(\vec{X}) dS = 2\pi\phi(\vec{X}) \quad (10)$$

که با قرار دادن ϕ_D و ϕ_j بجای ترم پتانسیل و شرایط مرزی مربوطه در روابط فوق و با استفاده از تابع گرین فضای سه بعدی که بصورت زیر تعریف شده، حل و پتانسیلهای مجهول بدست می آید.

$$G(\vec{X}; \vec{\xi}) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \quad (11)$$

که در آن R فاصله کنترل پنل تا سینگولار پنل واقع بر روی سطح جسم واقعی و R' فاصله کنترل پنل تا سینگولار پنل واقع بر روی سطح جسم تصویر شده نسبت به سطح آب آرام است. حال برای حل این معادله انتگرالی بروش عددی لازم است که ما آن را بر روی سطح شبکه خورده جسم گسسته سازی کنیم که خواهیم داشت،

$$2\pi\phi(X_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik} \phi_k = \sum_{k=1}^N S_{ik} \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_k \quad (12)$$

N تعداد پنلها مغروق میباشد. از رابطه فوق برای محاسبه پتانسیل ردییشن استفاده می کنیم و برای محاسبه پتانسیل دیفرکشن کل از معادله زیر استفاده میشود،

$$2\pi\phi(X_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik} \phi_k = 4\pi\phi_I(X_i) \quad (13)$$

در روابط فوق D_{ik} و S_{ik} بترتیب ترم قدرت دوقطبی و چشمه میباشدند که بصورت زیر تعریف میگرددند،



$$D_{ik} = \iint_{S_k} \frac{\partial G(X_i; \xi)}{\partial n_\xi} dS_\xi \quad (14)$$

$$S_{ik} = \iint_{S_k} G(X_i; \xi) dS_\xi$$

که در آن S_k نمایشگر سطح پنل سینگولار میباشد.

برای محاسبه ترمهای قدرت چشمه و دوقطبی ما از روش گوس هشت نقطه ای [۳] و مورینو [۴] استفاده کردیم. در نهایت برای محاسبه ترمهای پتانسیل مجهول به یک دستگاه معادله $N \times N$ میرسیم. برای حل این دستگاه معادله از روش حذفی گوس یا هر روش معتبر دیگری میتوان استفاده نمود. بعد از تعیین پتانسیلهای دیفرکشن و ردیشن ابتدا از رابطه زیر به محاسبه ضرایب جرم اضافی و دمپینگ میپردازیم.

$$A_{ij} - \frac{i}{\omega} B_{ij} = \rho \iint_{S_b} n_i \phi_j dS \quad (15)$$

برای محاسبه ممانهای برگردان هیدرواستاتیکی از روش توزیع فشار هیدرواستاتیکی استفاده میگردد که در آن با محاسبه فشار هیدرواستاتیکی در پنلهای مغروق و محاسبه مرکز فشار و لنگرگیری ضرایب هیدرو استاتیکی محاسبه میشوند.

$$V_B = - \iint_{S_b} n_1 x dS = - \iint_{S_b} n_2 y dS = - \iint_{S_b} n_3 z dS \quad (16)$$

$$\text{Bouyancy Center : } \begin{cases} x_b = \frac{-1}{2V_B} \iint_{S_b} n_1 x^2 dS \\ y_b = \frac{-1}{2V_B} \iint_{S_b} n_2 y^2 dS \\ z_b = \frac{-1}{2V_B} \iint_{S_b} n_3 z^2 dS \end{cases} \quad (17)$$

در نهایت نیروی وارده از طرف موج بر سازه مورد نظر از رابطه زیر موسوم به رابطه *Haskind* و یا از رابطه دوم موسوم به انتگرال مستقیم فشار هیدرو دینامیکی محاسبه میگردد،



$$F_i = -i\omega\rho \iint_{S_b} \left(n_i \phi_0 - \phi_i \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \right) dS \quad (18)$$

$$F_i = -i\omega\rho \iint_{S_b} (n_i \phi_D) dS \quad (19)$$

صورت کلی معادله ارتعاشی یک شناور در حالت سه بعدی از این قرار است.

$$\sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (M_{ij} + A_{ij}) + i\omega (B_{ij}) + C_{ij} \right] \xi_j = F_i \quad (20)$$

که با جایگزاری ترمهای ماتریس جرم و جرم اضافی و دمپینگ و ممان برگردان و نیروی موج ورودی میتوان دامنه حرکات نوسانی در ۶ درجه را براحتی محاسبه نمود.

۴- نتایج :

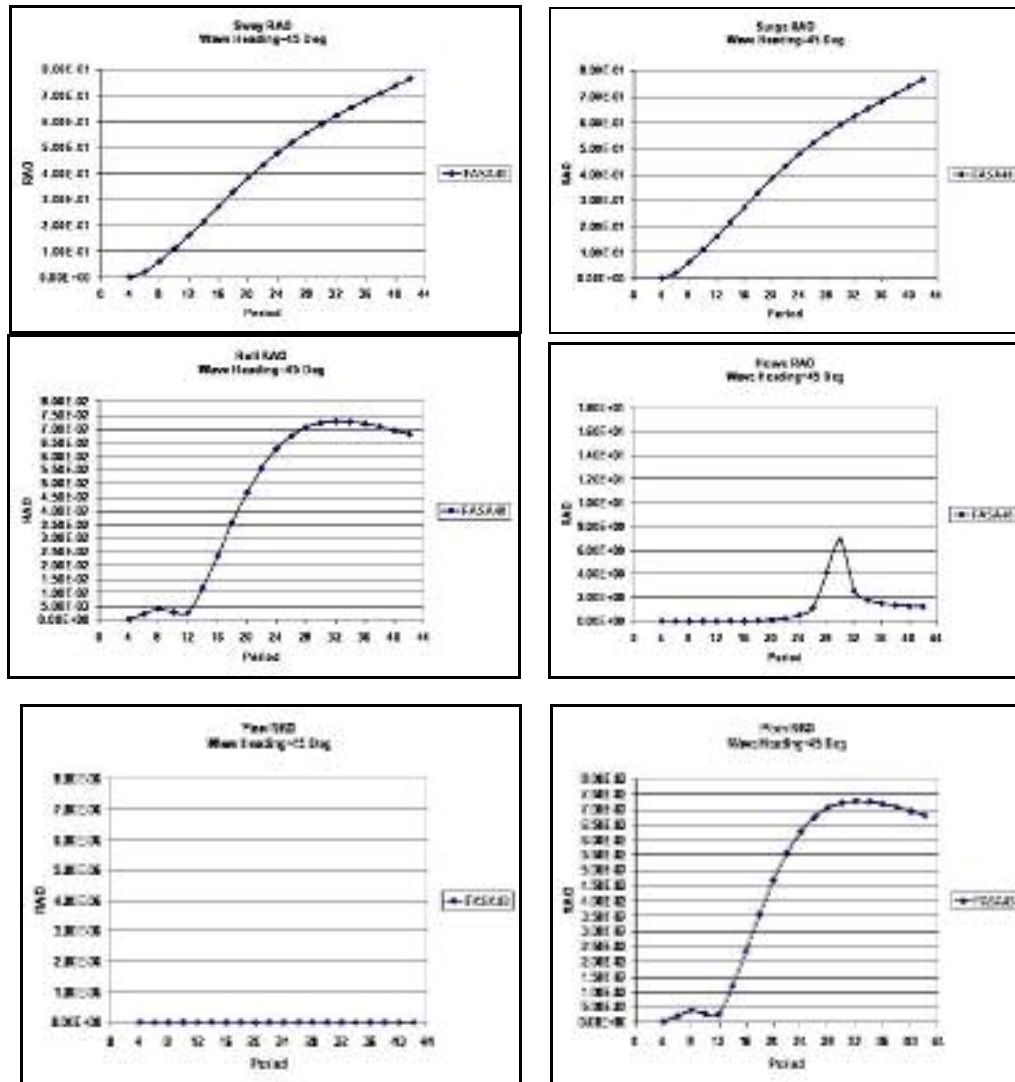
در این تحقیق ما یک سیلندر قائم شناور را در معرض یک موج منظم سینوسی تحت زاویه برخورد ۴۵ درجه قرار دادیم و بروش المان مرزی دامنه نیروها و ممانهای وارده بر سیلندر و دامنه حرکات ۶ درجه آزادی سیلندر را بر حسب پریود موج بر خوردی بدست آوردیم در این راستا یک کد نرم افزاری نسبتاً جامع تهیه شده که تمام محاسبات حرکات دینامیکی سیلندر (یا هر جسم دیگری) را محاسبه می کند. برای مطالعه بهتر نتایج ما یک دامنه وسیعی از امواج با پریود ۲ تا ۴۴ ثانیه را با سیلندر برخورد دادیم. نتایج بصورت گرافهایی بر حسب پریود امواج برخوردی رسم گردیده است. واحدهای بکار رفته برای این نتایج بشرح (جدول-۲) میباشد.

نتیجه محاسبه شده	واحد	متغیر نرمالیزه شده
ضریب جرم اضافی	Mass	A_{ij}/Mass
ضریب دمپینگ	Mass/Time	$\text{SQRT}(B_{ij}/\text{Mass})$
نیروی تحریک موج	Tons	Tons/A
ممان تحریک موج	Tons Meter	TonsMeter/A
حرکت خطی RAO	Meter	Meter/A
حرکت زاویه ای RAO	Degree	Degree/A

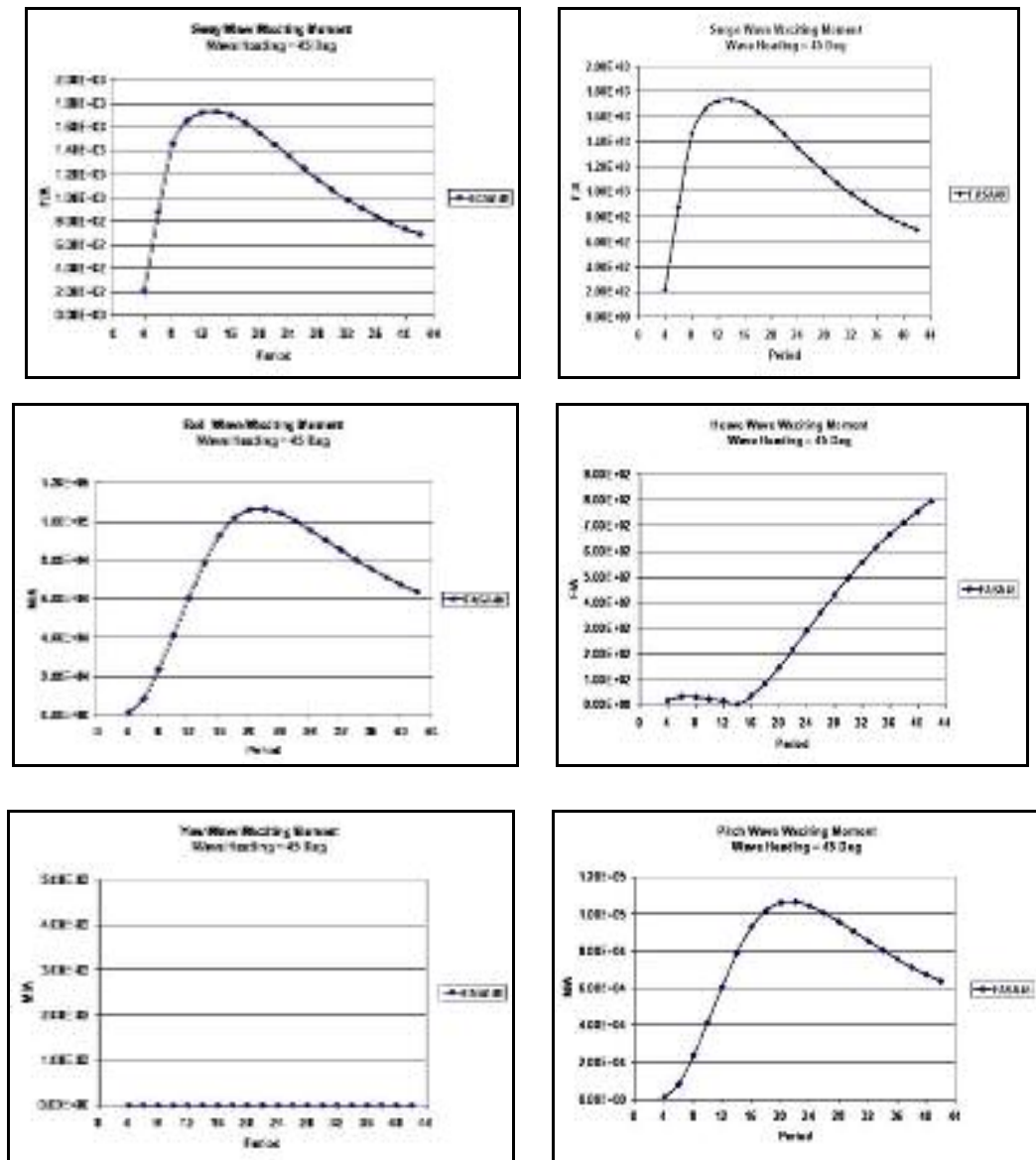
(جدول-۱) : واحد کمیت‌های بکار رفته در محاسبات

در (جدول-۲) دامنه موج ورودی میباشد.

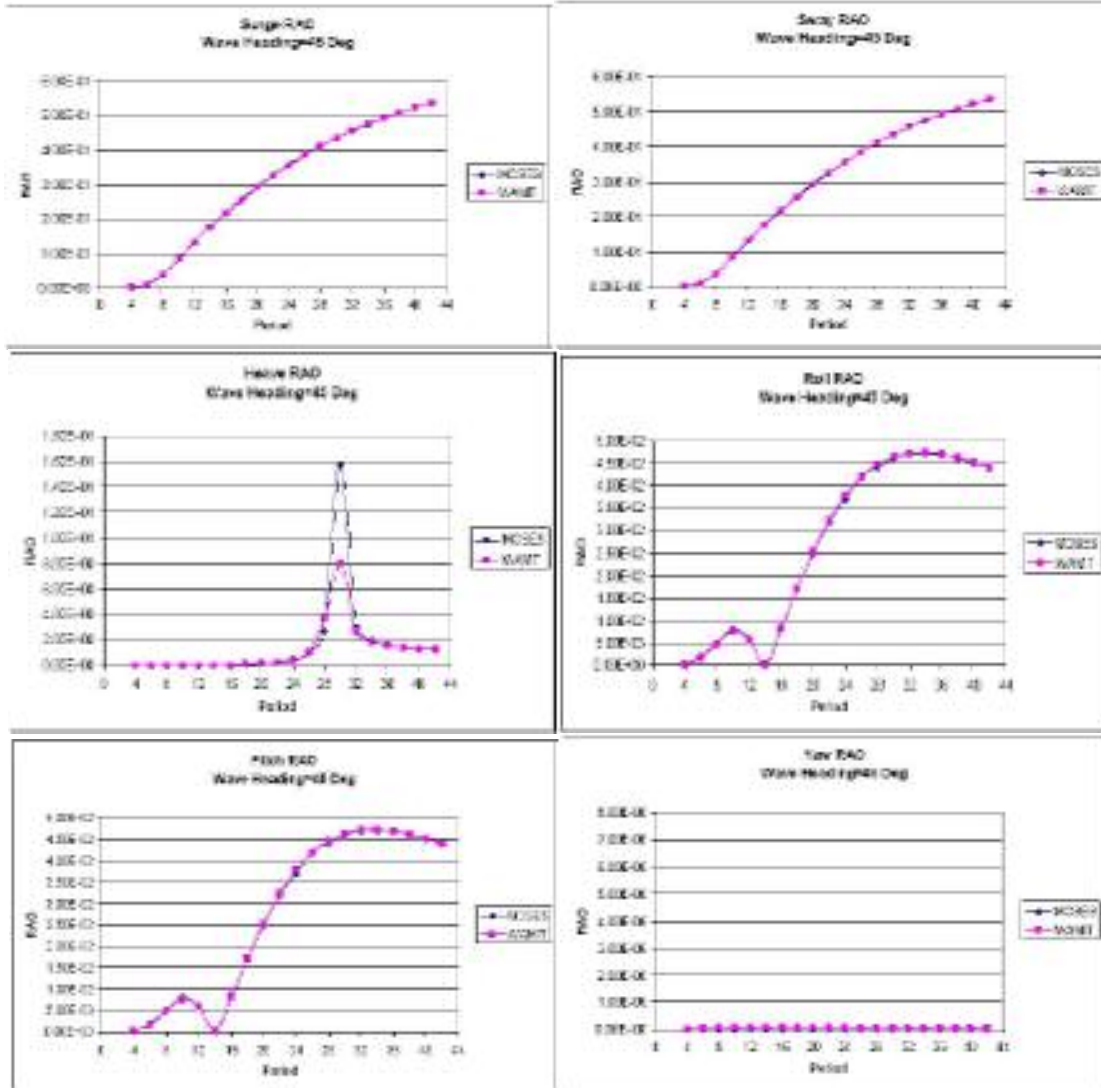
در ادامه ابتدا نتایج محاسبه شده در این تحقیق و بدنبال آن نتایج محاسبه شده توسط دکتر *Newman* از دانشگاه *MIT* با نرم افزار *WAMIT* و نتایج محاسبه شده توسط نرم افزار *MOSES* در دانشگاه نیویورک بمنظور مقایسه و معتبر سازی آورده شده است.



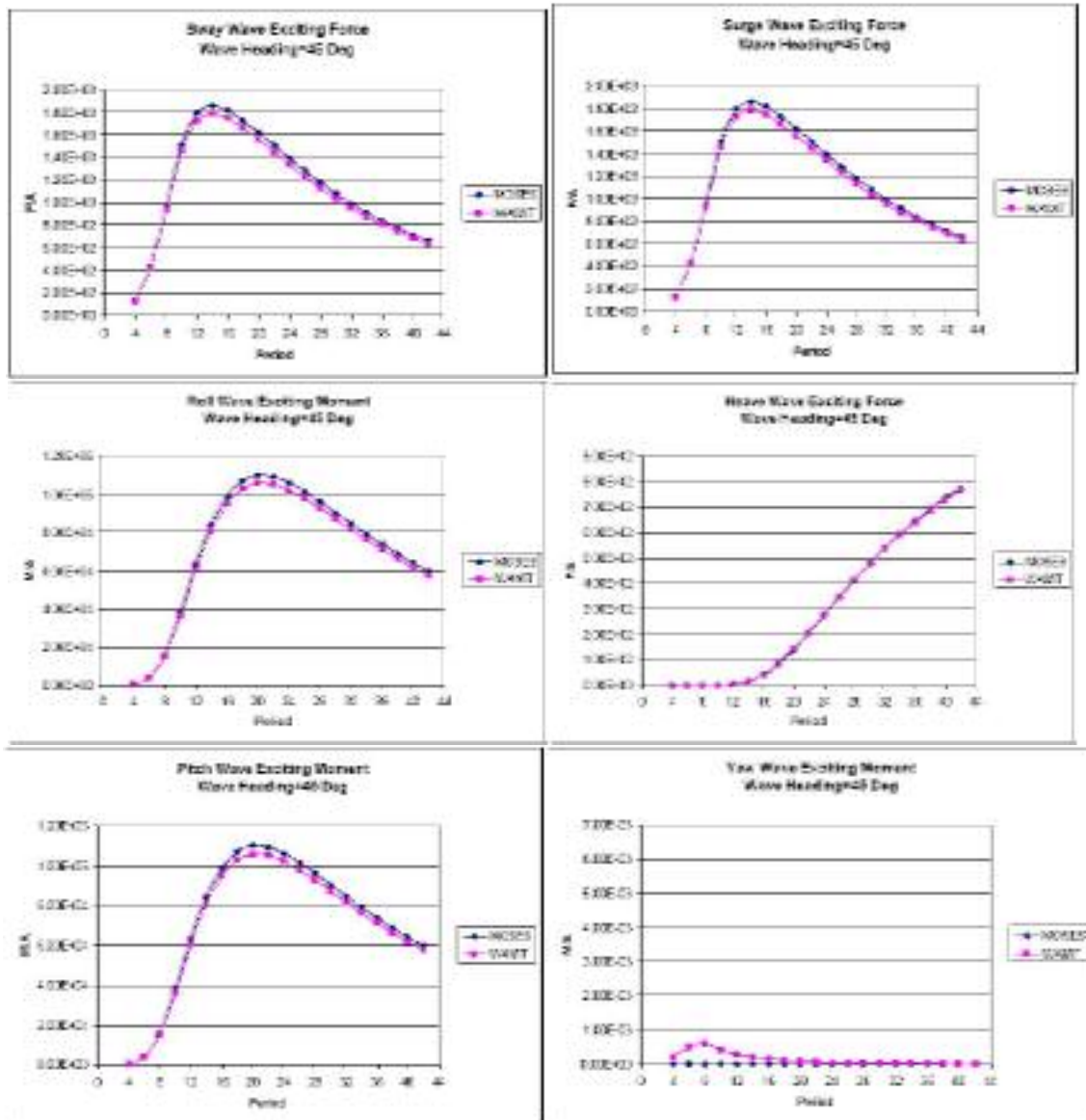
(شکل-۲): دامنه حرکات در ۶ درجه آزادی



(شکل-۳): دامنه نیروها و ممانها در ۶ درجه آزادی



شکل-۴) : دامنه حرکات در ۶ درجه آزادی توسط نرم افزارهای WAMIT و MOSES [۵]



(شکل-۵): دامنه نیروه ها و ممانها در ۶ درجه آزادی توسط نرم افزارهای WAMIT و MOSES [۵]



۵- بحث و نتیجه گیری :

۱. همانطور که در نمودارها مشاهده میگردد نتایج محاسباتی روش المان مرزی با کد نرم افزاری ما FASA با نتایج حاصل از نرم افزارهای WAMIT و MOSES مطابقت بسیار خوبی دارد
۲. در نزدیکی پریود تشدید، مقداری تفاوت مشاهده میگردد که البته این اختلاف با توجه به اینکه از روشهای متفاوتی برای محاسبه قدرت چشمه و دو قطبی استفاده شده، امری طبیعی است. در نزدیکی پریود تشدید محاسبات RAO خیلی حساس میباشد، در نتیجه اختلاف اندکی در روش محاسبات میتواند بنسبت، اختلاف بزرگتری را باعث شود. البته پیش بینی میشود که هر چه مدل پیچیده تر شود این اختلاف نیز بیشتر مشاهده شود. بعنوان مثال این اختلاف برای یک سکوی نیمه شناور نسبت به این مدل بیشتر خواهد بود.
۳. با توجه به اینکه در این روش فقط کافی است یک بار زمان برای محاسبه قدرت چشمه و دو قطبی صرف گردد و محاسبات در بقیه پریودها با سرعت بالایی انجام میگردد روش بسیار مفید و کارآمدی میباشد. بعنوان مثال برای این مدل با ۱۱۲۰ پنل بعد از محاسبه قدرت چشمه و دو قطبی در مدت زمانی حدود ۱۰ دقیقه بوسیله یک سیستم پنتیوم IV با 512MB RAM کلیه محاسبات برای ۱۲ نمودار در زمانی کمتر از یک دقیقه انجام میگردد.

مراجع :

1. Dr. J.Newman, Department of Ocean Engineering MIT University, "WAMIT User Manual", 1998.
2. Saeid Kazemi, PhD Researcher "Wagner-based Hydrodynamic Analysis of Wave Impact underneath the Deck of Semi-submersible using Direct Boundary Element Method", 2005.
3. L. Morino, "Steady & Oscillatory Subsonic and Supersonic Aerodynamics around Complex Configurations", Boston University, 1975.
4. H. Gasemi, "Boundary Element Method Applied to Marine Propeller and Its Cavitation Problems", Yokohama National University, PhD. Thesis, 1996.
5. J. Ray, "WAMIT-MOSES Hydrodynamic Analysis Comparison" , New York University, July 2005