



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مکانیک

## پروژه درس دینامیک متحرک های دریایی

نگارش  
حمید باب

استاد راهنما  
دکتر محمد سعید سیف

خرداد 1403

## فهرست مطالب

3 .....	سوال اول
4 .....	سوال دوم
4.....	0-2 معرفی اجمالی مکسرف motion و نحوه کارکرد با آن
9.....	1-2 پاسخ الف
15.....	2-2 پاسخ ب
19.....	3-2 پاسخ ج
22.....	4-2 پاسخ د
25.....	5-2 پاسخ ه
27.....	6-2 پاسخ و
33.....	منابع

فایل تهیه شده از فرم بدنه شناور موجود در پوشه مربوطه را در نرم افزار **Maxsurf** وارد نمایید. با توجه به فرم بدنه مورد نظر مطلوب است موارد زیر :

## 1 - مشخصات هیدرواستاتیک شناور از نوار ابزار قسمت Data در نرم افزار استخراج نمایید.

فایل Calculation VLCC.msd را وارد نرم افزار میکنیم، سپس با توجه به افرونه Data و سپس جدول 1 را می‌یابیم.

جدول 1- مشخصات هیدرواستاتیکی شناور

Measurement	Value	Units
Displacement	308625	t
Volume (displaced)	301097.6	m <sup>3</sup>
Draft at AP	20.422	m
Draft Amidships	20.422	m
Draft at FP	20.422	m
Trim angle (+ve by stern)	0	rad
Heel	0	rad
WL Length	330.366	m
Beam max extents on WL	54.252	m
Wetted Area	26468.97	m <sup>2</sup>
Waterpl. Area	16055.72	m <sup>2</sup>
Prismatic coeff. (Cp)	0.826	
Block coeff. (Cb)	0.823	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.996	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.896	
LCB length	-152.876	from zero pt. (+ve fwd) m
LCF length	-160.427	from zero pt. (+ve fwd) m
KG	20.422	m
GMt	2.081	m
GML	391.741	m
Length:Beam ratio	6.089	
Beam:Draft ratio	2.657	
Length:Vol <sup>0.333</sup> ratio	4.929	

Precision

Medium

61 stations

2- با انتخاب طیف موج JONSWAP و استفاده از روش تئوری نواری (Theory Strip) و تحلیل شناور در نرم افزار موارد خواسته شده را استخراج نمایید:

2-1) معرفی اجمالی مکسرف motion و نحوه کار کرد با آن

در نرم افزار مکسرف motion، برای شناور موارد زیر بررسی می شود:

1- در شرایط دریانوردی مختلف بررسی می شود ( sea state های مختلف دریایی از جمله 0- 1- 2- ...- 9 )

slamming -2

3- میزان راحتی خدمه و مسافرین

4- خیس شوندگی

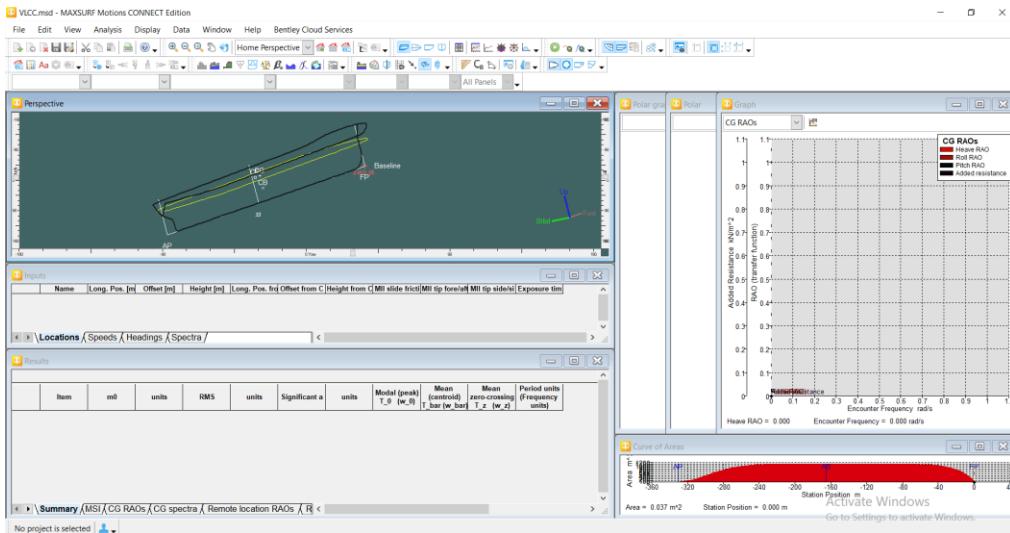
بدین منظور از این نرم افزار استفاده میکنیم؛ متدهای آنالیزی آن به دو روش می باشد:

الف) تئوری نواری : مدل کشته بصورت منحنی های عرضی در می آید و تنها حرکات roll-heave-pitch بررسی میشوند، البته قابل توجه است که تنها شناور هایی که طول به عرض بالایی دارند را میتوانیم وارد کنیم.

این مقدار حدود  $\frac{L}{B} \geq 5$  می باشد.

2- Panel Method : در این روش سرعت شناور را صرف فرض میکنیم و میتوانیم برای 6 درجه آزادی بررسی انجام دهیم، محدودیت های نرم افزار باید دقیق شوند.

در این بخش از روش تئوری نواری پیش رفته ایم، در ابتدا مدل را وارد میکنیم.



تصویر ۱- وارد کردن مدل به نرم افزار

سپس روش آنالیزی را باید انتخاب کنیم، در منوی Analysis با انتخاب strip theory روش را انتخاب میکنیم.

سپس مقادیر مورد نظر را برای تحلیل وارد میکنیم، شناور بدون تریم میباشد و عمق آب حدود 20 متر میباشد.

در این بخش میتوان trim angle داده شود که لازم نیست.

همچنین نوع شناور monohull در نظر گرفته میشود. در بخش mass distribution باید مقادیری داده شود،

بطور معمول براساس مطالب تدریس شده در کلاس میدانیم که یک بازه برای شعاع های زیراسیون حرکات تعريف شده است:

$$K_{xx} = (0.33B, 0.45B) = 0.38B$$

$$K_{yy} = 0.23 L$$

$$K_{zz} = 0.25 L$$

که در نرم افزار بطور اتوماتیک این مقادیر را درج میکنیم.

برای Damping factors برای حرکت heave-pitch مقداری را خود مکسرف در نظر میگیرد. برای حرکت

roll نیز بصورت متعارف مقدار آن بین 0.05 تا 0.1 میباشد و میتوان بصورت دقیقتر آن را مشخص کرد.

همانطور که میدانیم حرکت رول کشتی نیز یکی از حرکات بسیار مهم شمرده میشود، این حرکت غلتیش عرضی

میباشد ، معادله حرکت رول بصورت زیر میباشد:

$$a\frac{d^2\phi}{dt^2} + b\frac{d\phi}{dt} + c\phi = M_0 \cos \omega_e t$$

همچنین دمپینگی ناشی از ساخت موج، اصطکاک های روی سطح ، وجود بیلچ کیل<sup>۱</sup>، وجود اغتشاشات هوا و تنش های سطحی آب باشد که به سبب اینکه عوامل مختلفی روی آن تاثیرگذار هستند غیرخطی است و باید آن را خطی سازی کرد.

$$B(\dot{\phi})=B_1\dot{\phi}+B_2|\dot{\phi}|\dot{\phi}+B_3\phi^3$$

که در خطی سازی به صورت زیر تقریب زده خواهد شد:

$$Beq=Bf+Be+Bw+B_L+B_K$$

میرایی اصطکاکی در اثر تنش اصطکاکی سیالات روی سطح بدن کشته ایجاد می شود و زمانی که کشته می چرخد شکل می گیرد. بنابراین می توان تصور کرد که تحت تأثیر امواج باشد. برای سرعت صفر ( $U=0$ )، کاتو (1965) بیانی برای میرایی اصطکاک می دهد. در یک میدان جریان آرام بر حسب ضریب میرایی خطی معادل به شرح زیر است:

$$B_{f0}=\frac{4}{3\pi}\rho Sr_e^3 R_0 \omega C_f$$

که  $C_f$  به صورت زیر می باشد:

$$C_f=1.328\left[\frac{2\pi\nu}{3.22r_e^2R_0^2\omega}\right]^{1/2}$$

و  $re$  بصورت زیر می باشد:

$$r_e=\frac{1}{\pi}\left[(0.887+0.145C_B)\frac{S}{L}-2OG\right]$$

در روابط بالا  $p$  چگالی سیال،  $V$  ویسکوزیته سیال،  $W$  فرکانس موج،  $B, D, L$  به ترتیب طول و ارتفاع و عرض شناور،  $C_B$  ضریب بلوكه شناور،  $R_O$  شاعر موثر حرکت رول (بر حسب رادیان)،  $OG$  فاصله بین still water و مرکز ثقل شناور می باشد و  $S$  نیز سطح خیس شده شناور می باشد.

---

<sup>1</sup> Bilge Keel

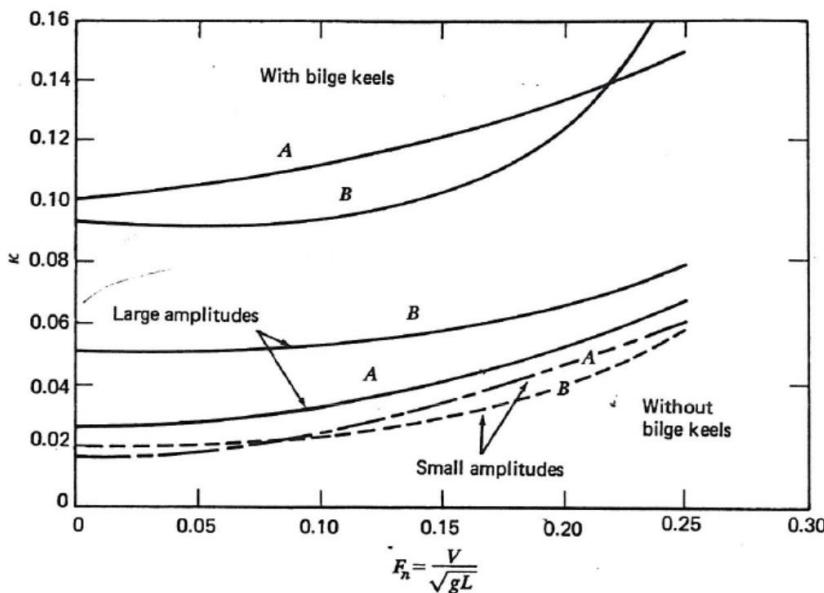
میرایی گردابی در نظر گرفته شده برای یک بدنه در رول به دلیل جدا شدن در گوشه های تیز و گردابه های ایجاد شده توسط جداسازی جریان می باشد. این ناشی از تغییر فشار در گوشه های تیز بدنه به دلیل جدا شدن جریان در پایین کشتی می باشد.

$$B_{e0} = \frac{4}{3\pi} \rho D^4 R_0 \omega C_p C_R$$

و همچنین ضریب دمپینگ ناشی از موج میتواند به صورت زیر باشد:

$$B_w = B_{w0} \frac{1}{2} \{ [(A_2 + 1) + (A_2 - 1) \tanh 20(\tau - 0.3)] + (2A_1 - A_2 - 1) \exp(-150(\tau - 0.25)^2) \}$$

و پارامتر های دیگر ضریب میرایی بدین صورت میتوان براساس منبع موجود یافت.

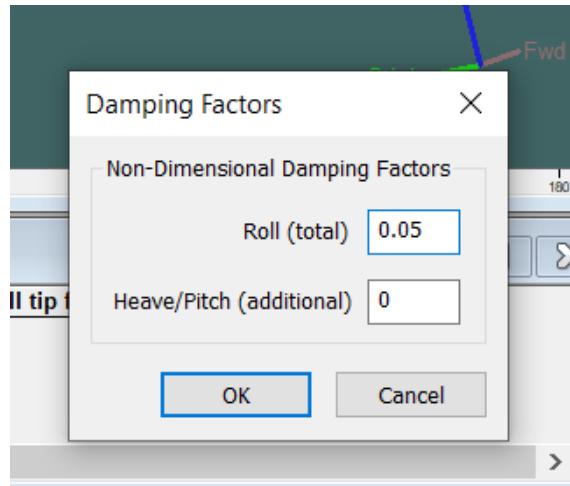


نمودار 1) تعیین ضریب دمپینگ در حرکت رول

برای یافتن ضریب دمپینگ از نمودار بدلیل عدم وجود bilge keel در بدنه شناور و عدد فرود آن که:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{Lg}} = \frac{10}{\sqrt{330.366 \times 9.81}} = 0.175$$

با توجه به مقدار عدد فرود ضریب دمپینگ را 0.05 در نظر میگیریم.



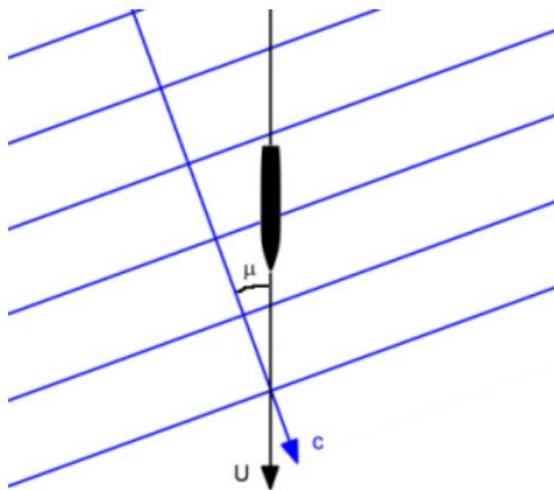
تصویر 2 – تعیین ضریب دمپینگ حرکت رول (بخش Damping factor analysis)

در ادامه وارد جدول input میشویم و پاسخ به سوالات این بخش خواهیم داد، در ابتدا در مقدمه ای بخش motion را توضیح میدهیم، این افزونه دارای 4 فیلد میباشد که با Ctrl+A میتوان موارد جدیدی را اضافه کرد، هر کدام از فیلد ها به صورت زیر میباشند:

-1 Location: اگر شناور را وارد کردیم ممکن است بخش هایی مانند سوپراستراکچر یا bridge که تاثیر دارند ولی لحاظ نشده اند، بدین منظور از این بخش استفاده میتوان کرد.

-2 Speed : سناریو های مختلف سرعت را میتوانیم لحاظ کنیم.

Heading -3: جهتی که امواج برخورد میکنند به آن تعیین میشود، دقت شود که زاویه 0 درجه Heading sea، زاویه 90 درجه beam sea، زاویه 180 درجه star board، زاویه 270 درجه Following sea میباشد.



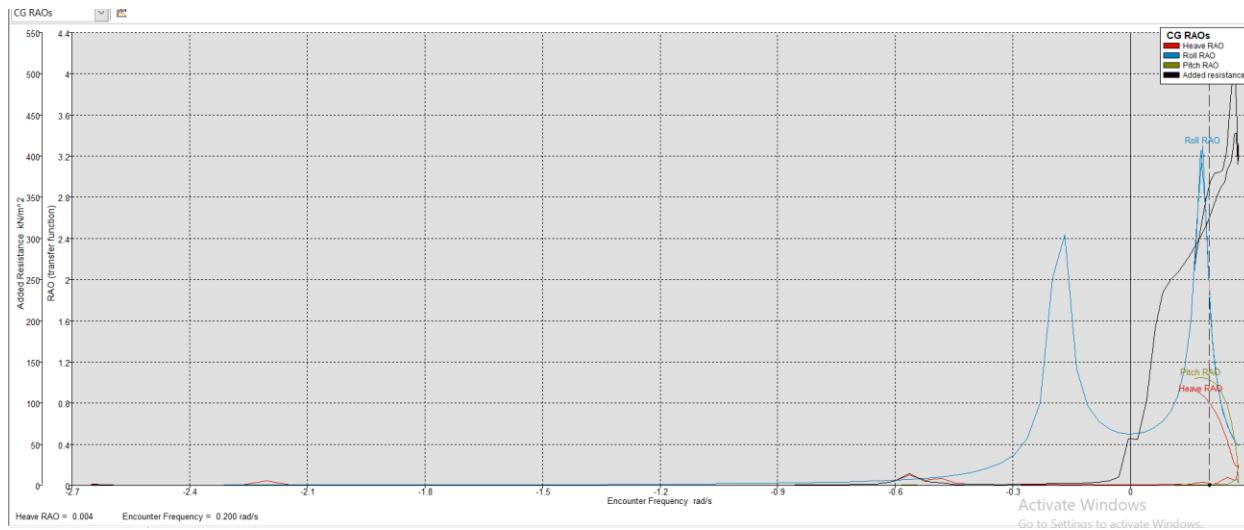
تصویر3- زوایای موج نسبت به شناور

spectra -4: میتوانیم شرایط دریایی را تعیین کنیم، حالت های مختلف دریایی در این بخش تعیین خواهند شد.

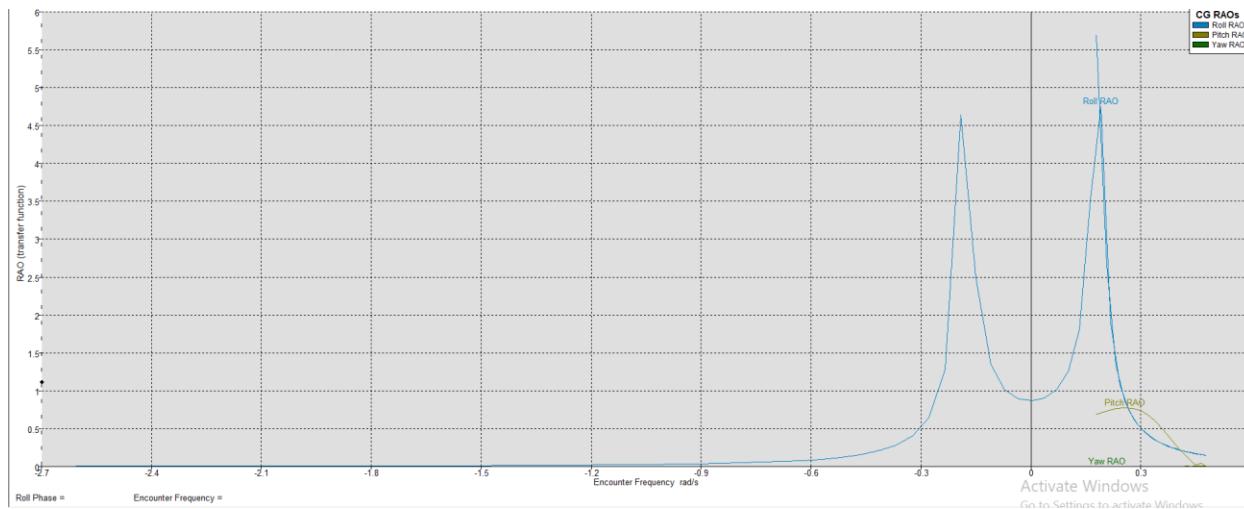
الف) نمودارهای RAO و فاز مربوط به حرکات Roll و Pitch. Heave مرکز جرم شناور را در سرعت طراحی و در زوایای برخورد، 30، 60، 90 و 180 استخراج و نتایج را با تئوریهای موجود تطابق داده و تجزیه و تحلیل کنید. انیمیشن مربوط به هر حالت را تهیه کنید.

زوایای مشخص شده را در بخش زوایای برخورد وارد میکنیم و سرعت طراحی شناور را 20 نات در نظر میگیریم، خروجی خواهیم گرفت.

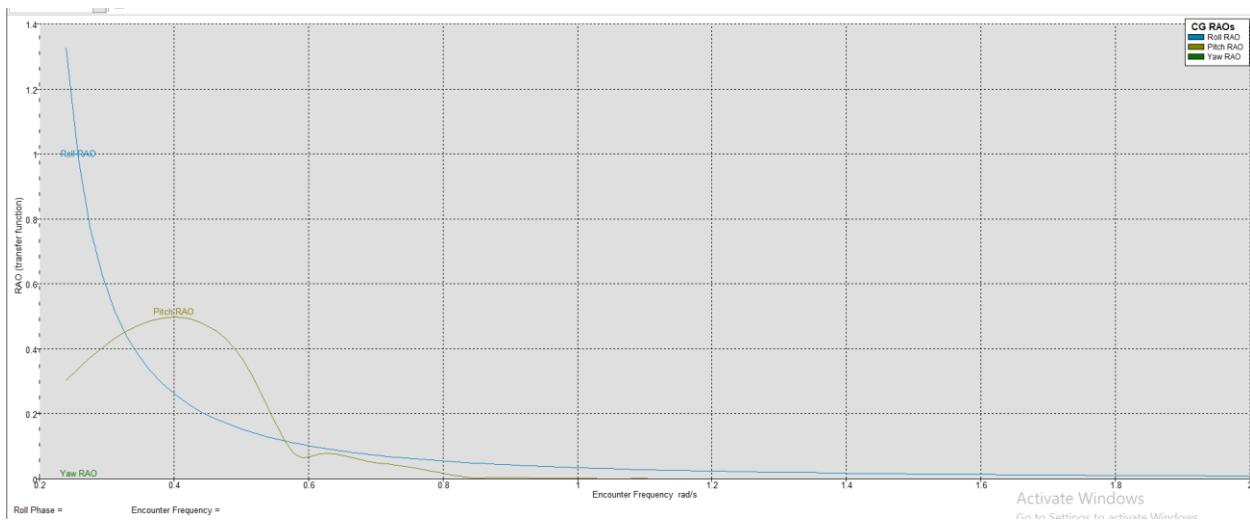
## نمودار های RAO



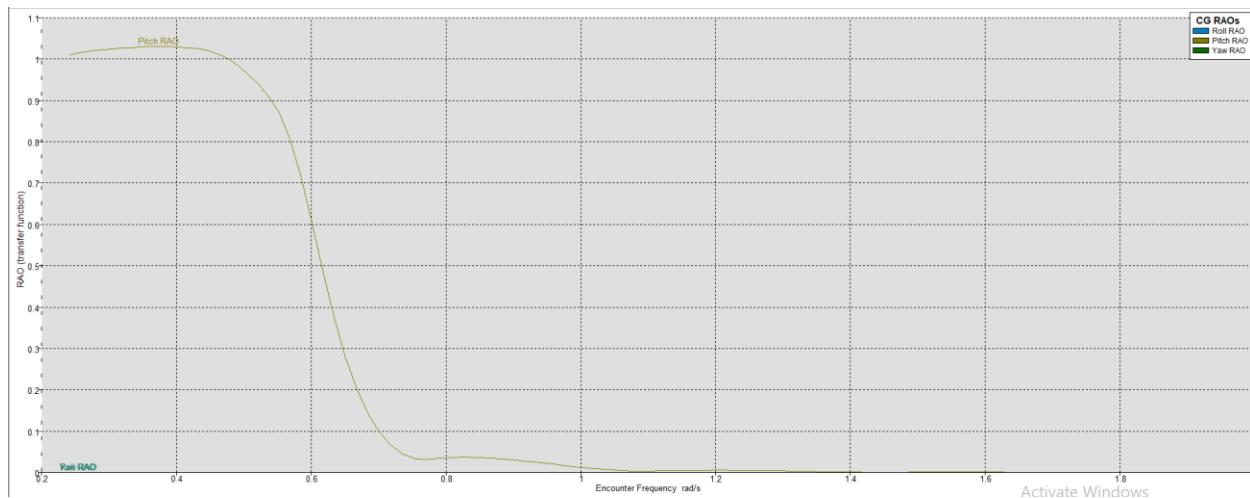
تصویر 4- نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Roll و Pitch شناور در زاویه 30 درجه



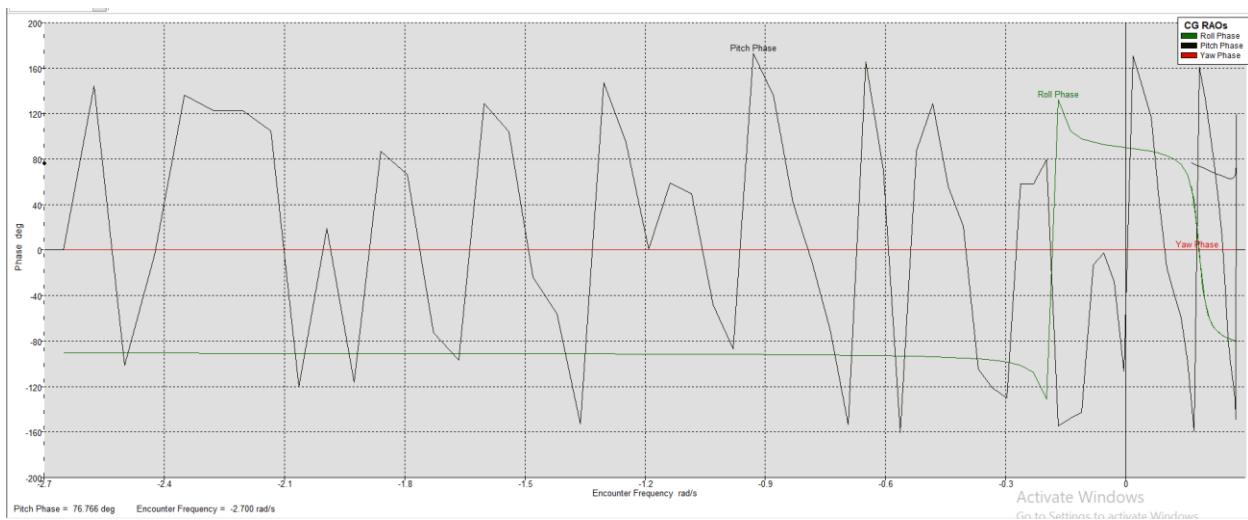
تصویر 5- نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Roll و Pitch شناور در زاویه 60 درجه



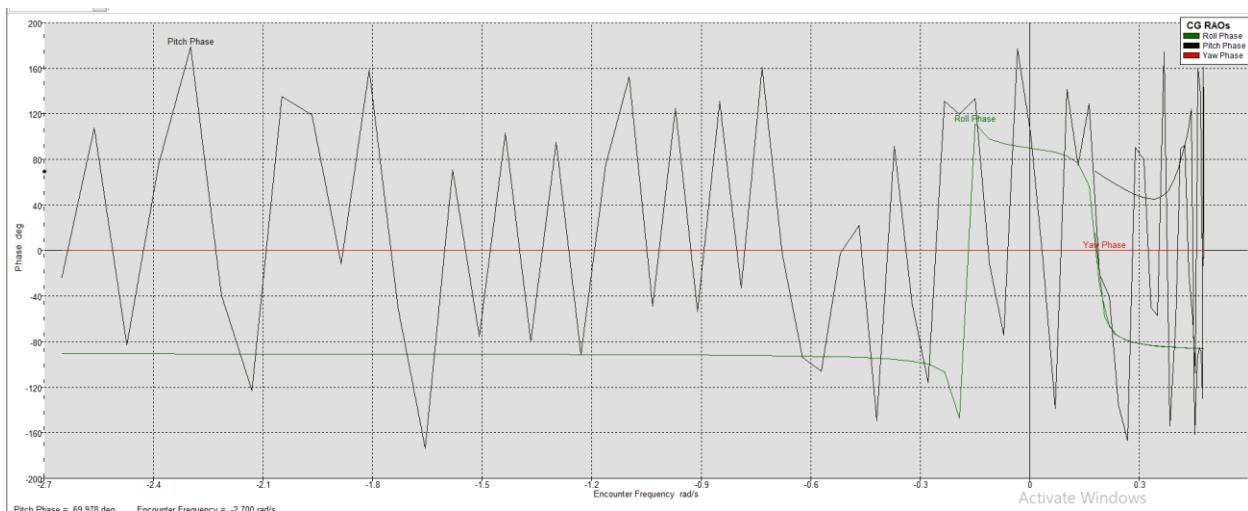
تصویر 6 – نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Roll و Pitch شناور در زاویه 90 درجه



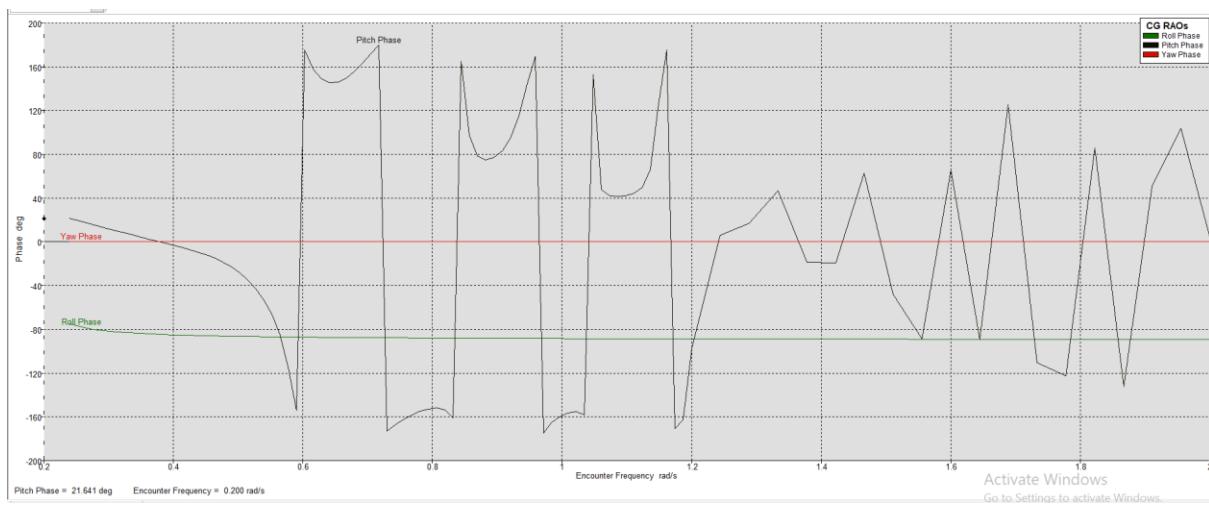
تصویر 7 – نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Roll و Pitch شناور در زاویه 180 درجه



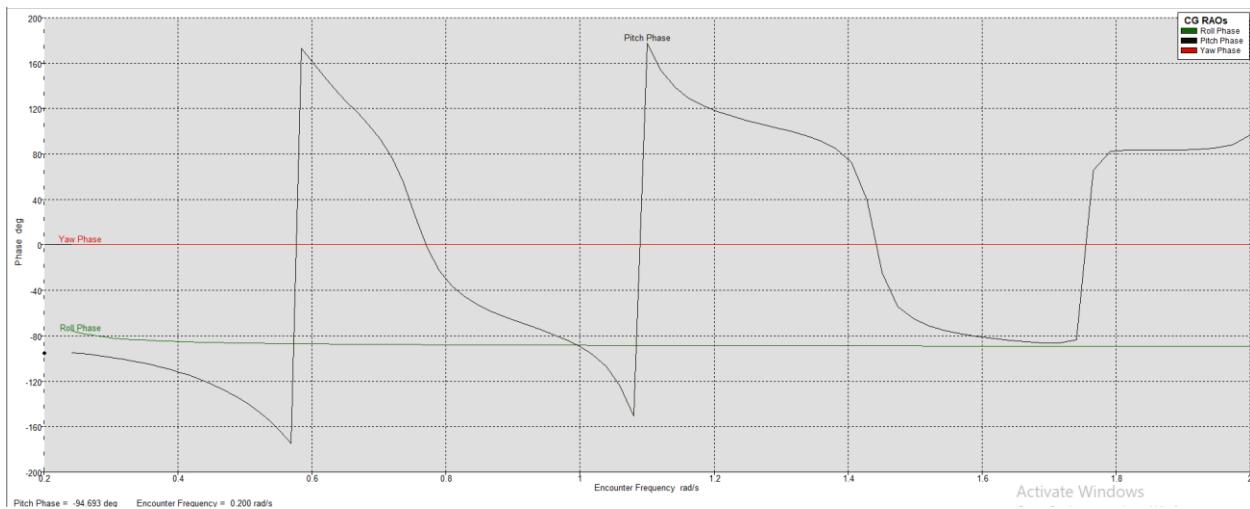
تصویر 8- نمودار های فاز مربوط به حرکات Heave و Pitch و Roll شناور در زاویه 30 درجه



تصویر 9- نمودار های فاز مربوط به حرکات Heave و Pitch و Roll شناور در زاویه 60 درجه



تصویر 10- نمودار های فاز مربوط به حرکات Heave و Pitch و Roll شناور در زاویه 90 درجه



تصویر 11- نمودار های فاز مربوط به حرکات Heave و Pitch و Roll شناور در زاویه 180 درجه

یکی از نکات مهم آن است که شناور در حالت زاویه 90 یا 270 درجه (beam sea) مقدار Heave ماقزیم را دارد.

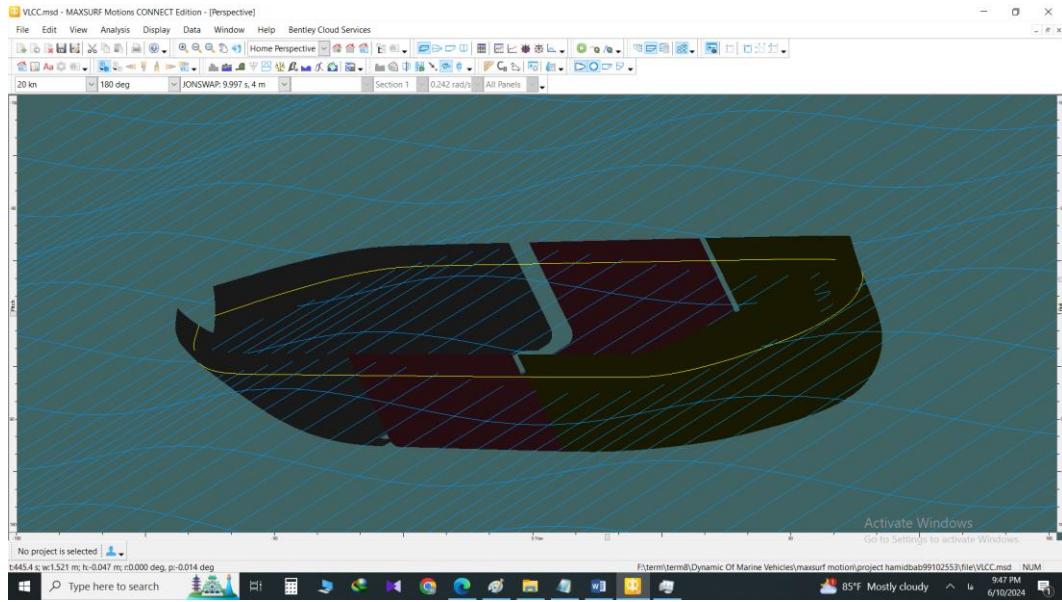
بر حسب موارد گفته شده در کلاس، نمودار RAO نسبت تغییرات ارتفاع موج نسبت به تغییرات ارتفاع شناور می‌باشد. مقدار تغییرات ارتفاعی RAO Root در زاویه 90 درجه بیشترین مقدار است در صورتی که این مقدار در زاویه 180 درجه چون امواج از جلو به شناور برخورد میکنند برابر صفر می‌باشد. در زوایای 180 درجه حرکت MaxSurf Motion pitch بسیار بیشتر می‌باشد. در مجموع، می‌توان گفت که نتایج RAO و فاز از نرم افزار MaxSurf Motion در اکثر موارد با مدل‌های تئوری مطابقت خوبی دارند. این نشان می‌دهد که مدل‌سازی و محاسبات انجام شده در نرم افزار به طور مناسبی واقعیت فیزیکی را منعکس می‌کند. موارد اندکی از انحراف نیز می‌تواند ناشی از فرضیات و محدودیت‌های هر یک از رویکردهای مدل‌سازی باشد.

معادله فرکانسی بصورت زیر می‌باشد:

$$z = \frac{F}{\sqrt{(c - a\omega^2)^2 + b^2\omega^2}} \cos(\omega t + \varepsilon)$$

و اختلاف فاز بصورت زیر خواهد بود:

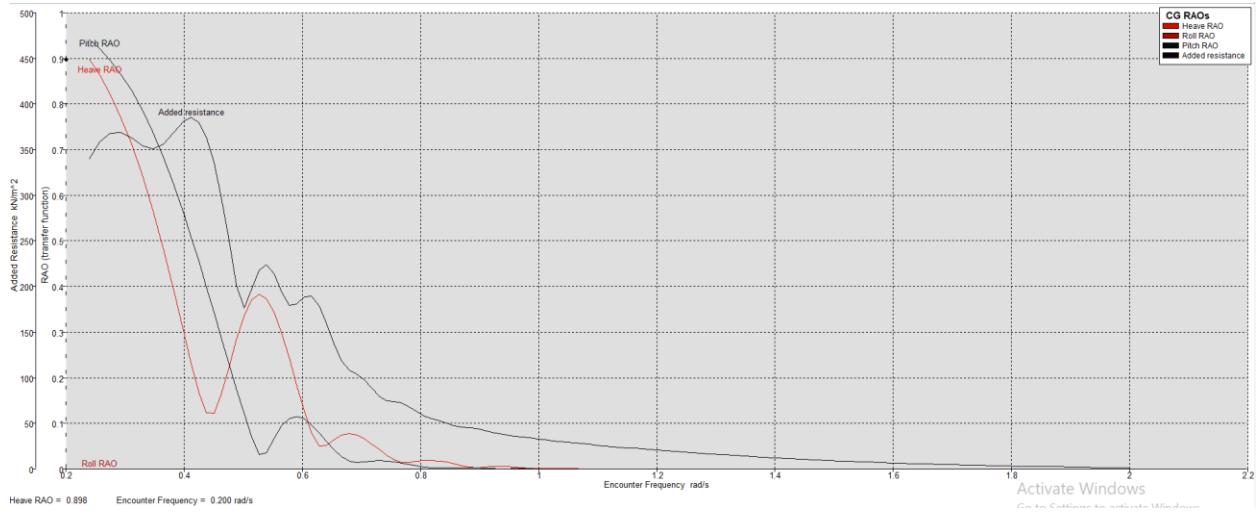
$$\varepsilon = \frac{b\omega}{c - a\omega^2}.$$



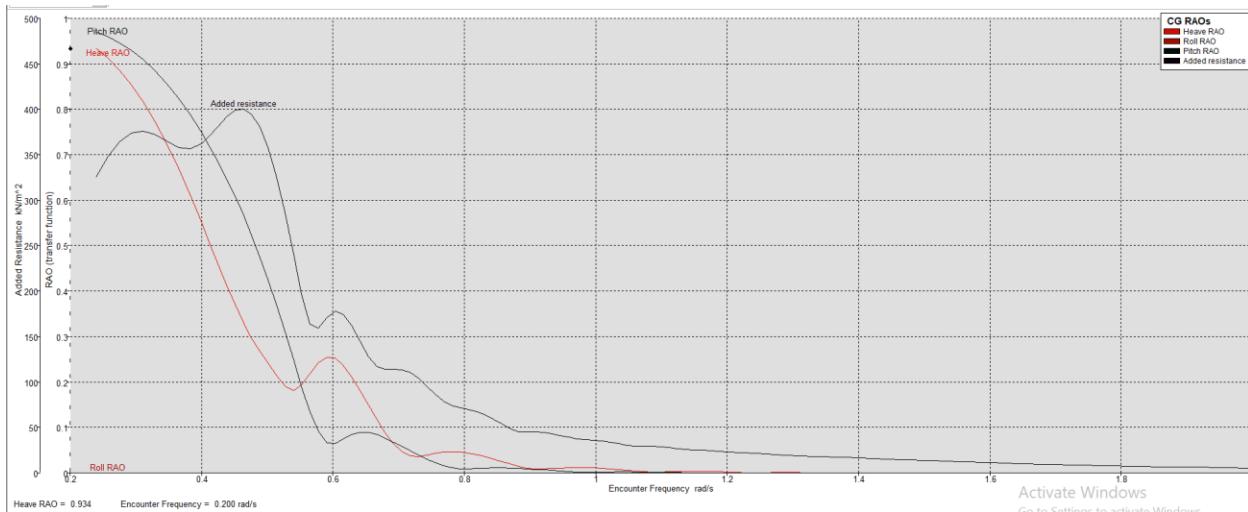
تصویر 12- اینیمیشن های مربوطه ، در فایل ضمیمه شده است.

ب) برای چهار عدد فرود در حالت Sea Head RAO نمودارهای Heave و Roll و Pitch برای مرکز جرم شناور محاسبه و اثرات تغییر سرعت را تحلیل نمایید.

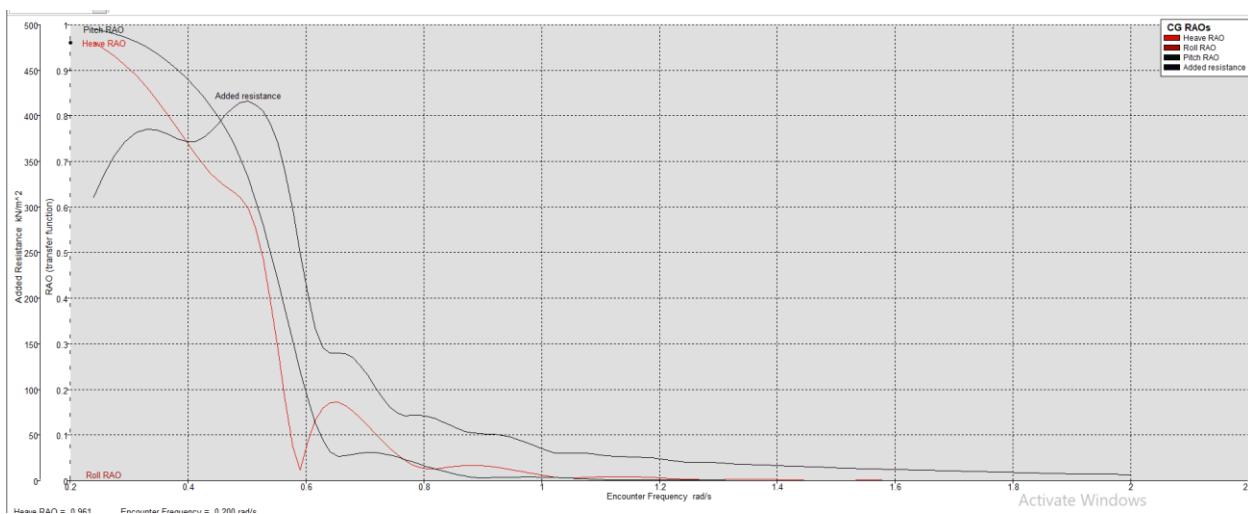
حالت Head sea به معنای آن است که زاویه برخوردی 180 درجه باشد و موج از روی برخورد کند، 4 سرعت مختلف را در نظر میگیریم، سرعت های 0.5، 1.0، 10، 20 نات را لحاظ میکنیم.



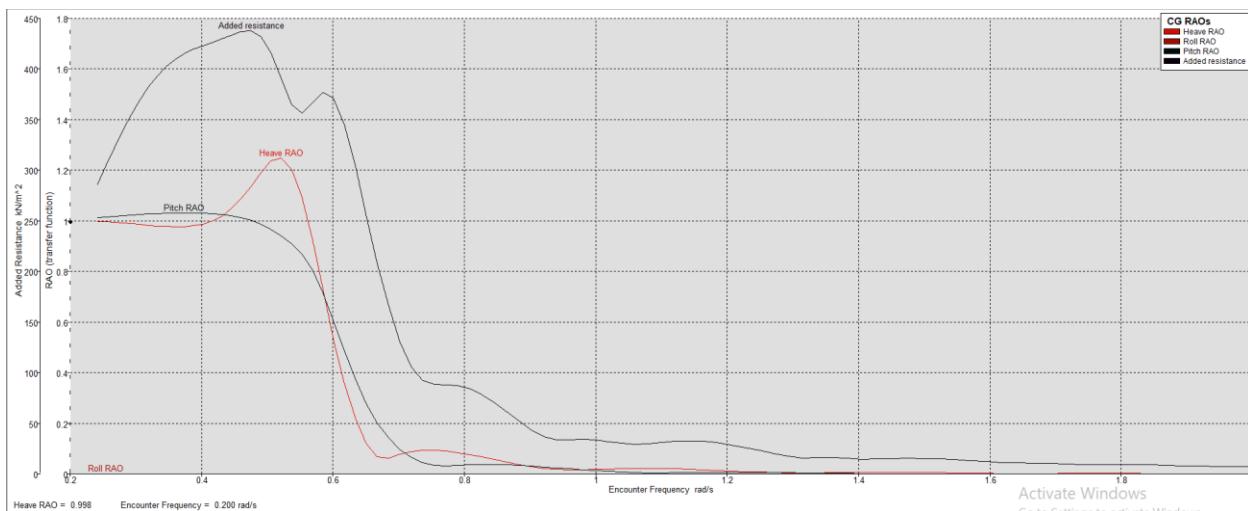
تصویر 13- نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Roll و Pitch در زاویه 180 درجه و 0 knot



تصویر ۱۴- نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Pitch و Roll شناور در زاویه ۱۸۰ درجه و 5 knot

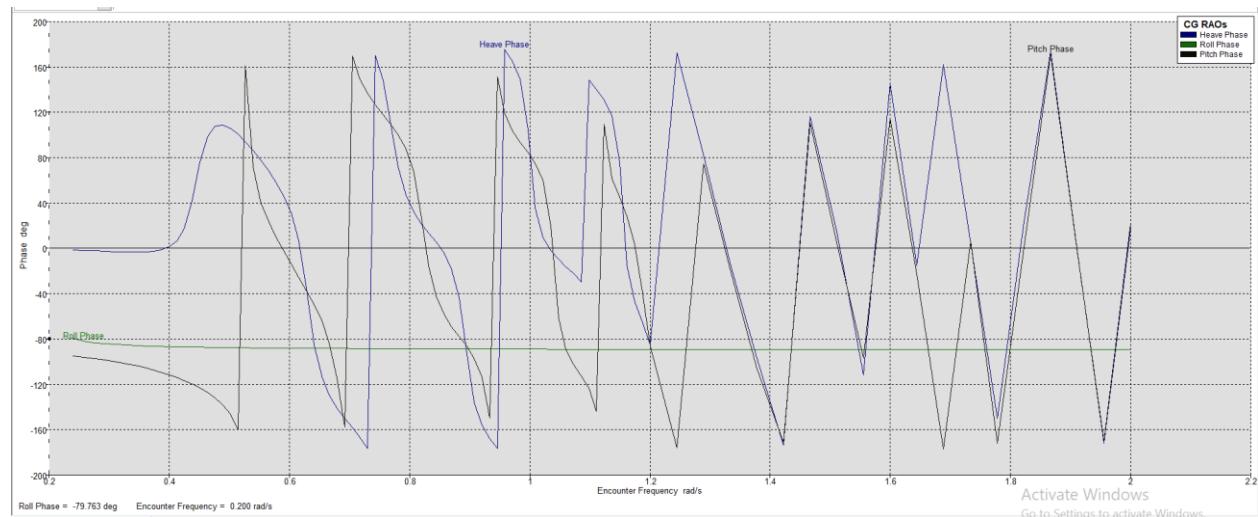


تصویر ۱۵- نمودار های RAO مربوط به حرکات Heave و Pitch و Roll شناور در زاویه ۱۸۰ درجه و 10 knot

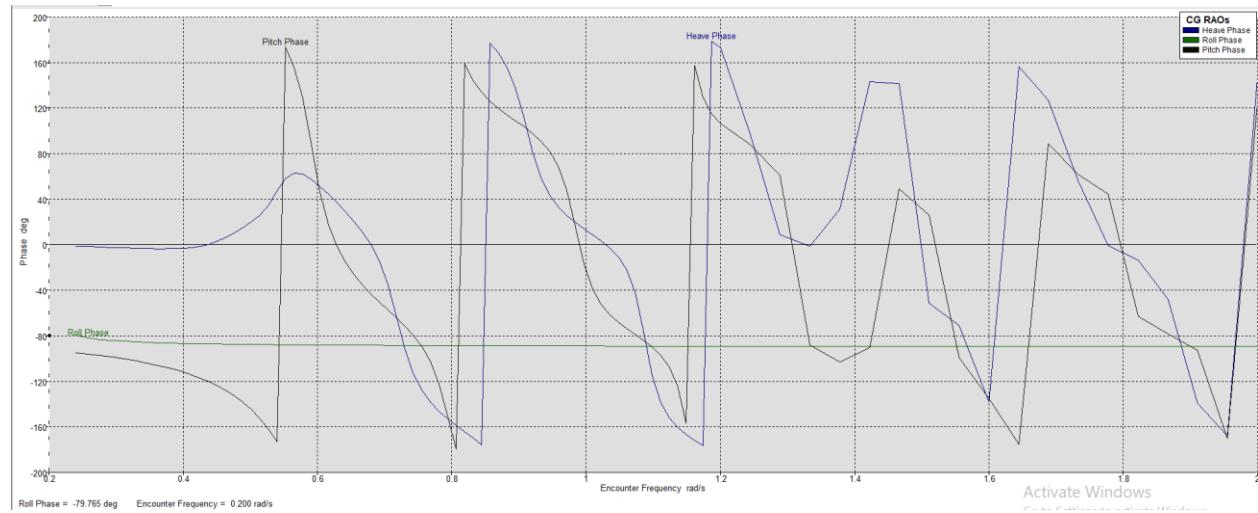


تصویر 16- نمودار های RAO مربوط به حرکات Roll و Pitch و Heave شناور در زاویه 180 درجه و 20 knot

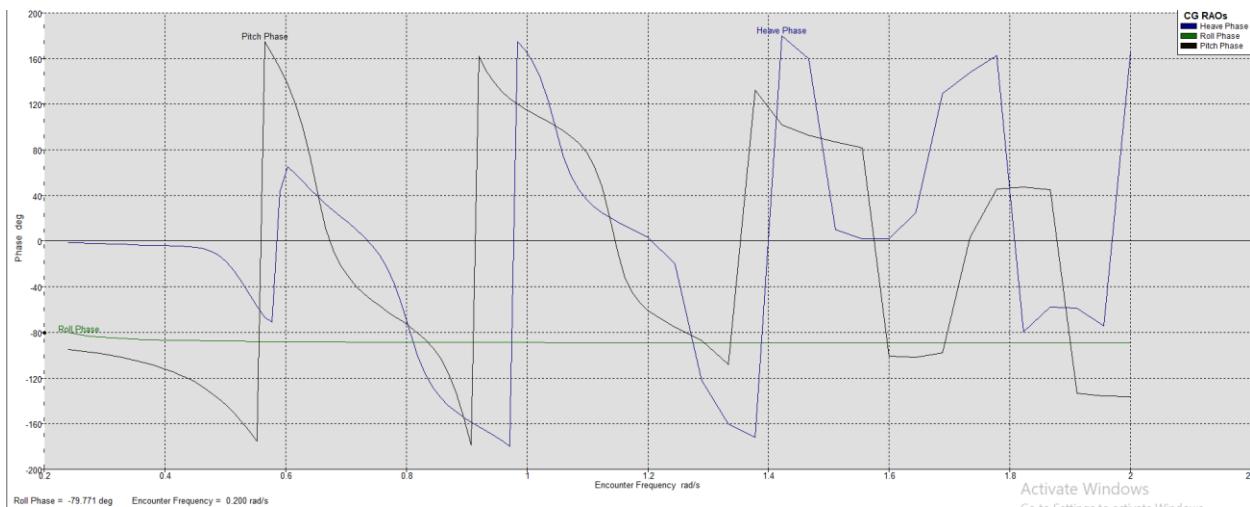
همانطور که قابل ملاحظه است با افزایش سرعت مقادیر RAO در حال تغییرات هستند، بطور مثال هرچقدر سرعت افزایش میابد مقدار RAO پیچ به 1 نزدیک تر میشود که نشان دهنده آن است که دارد روی موج سوار میشود و مانند آن حرکت میکند، از سمتی Pitch افزایش میابد چون سرعت آن در حال افزایش است .



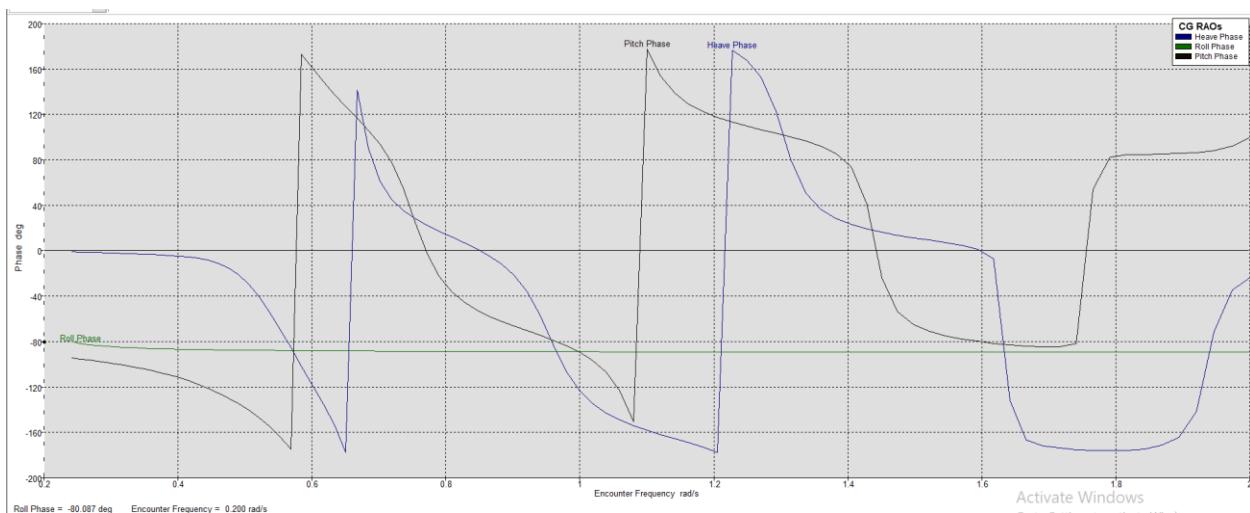
تصویر 17- نمودار های فاز مربوط به حرکات Roll و Pitch و Heave شناور در زاویه 180 درجه و 0 knot



تصویر 17- نمودار های فاز مربوط به حرکات Roll و Pitch و Heave شناور در زاویه 180 درجه و 5 knot



تصویر 18- نمودار های فاز مربوط به حرکات Roll و Pitch و Heave شناور در زاویه 180 درجه و 10 knot

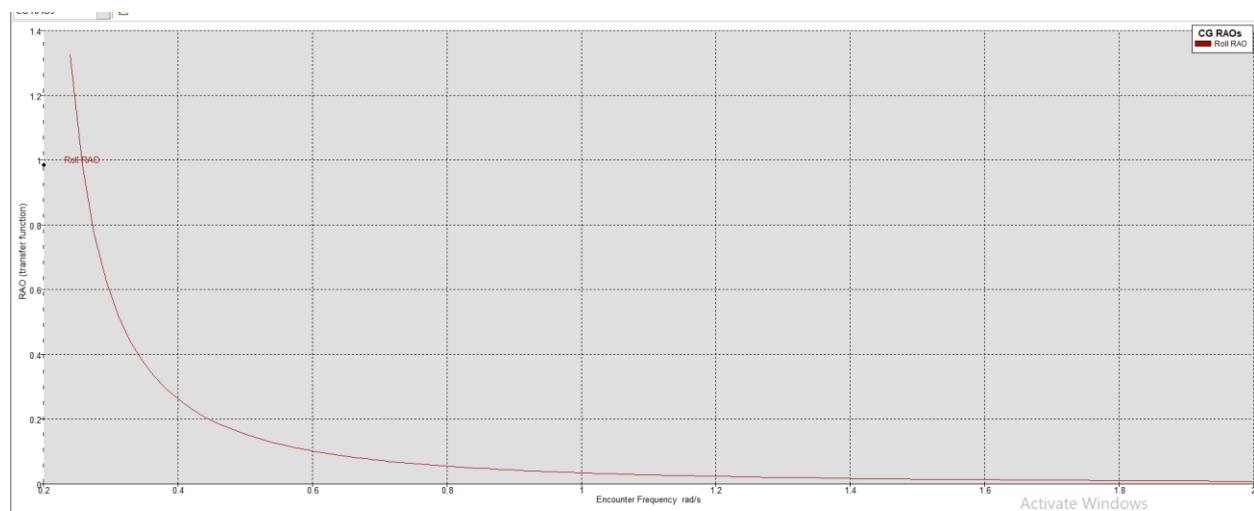


تصویر 19- نمودار های فاز مربوط به حرکات Roll و Pitch و Heave شناور در زاویه 180 درجه و 20 knot

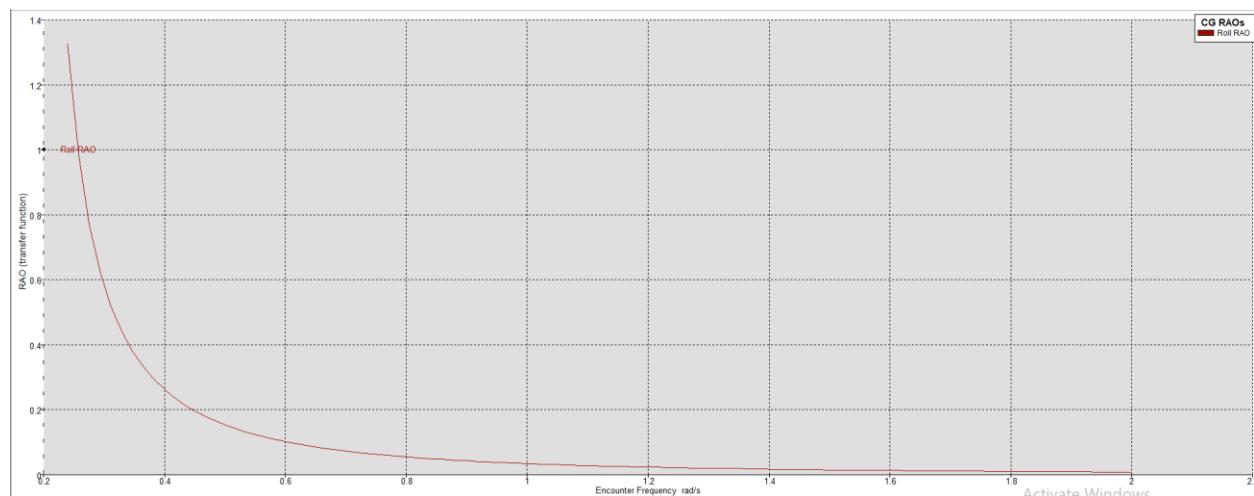
چون سرعت در حال افزایش می باشد، فاز های کمتری با موج برخورد میکنند.

ج) در حالت Sea Beam ، در سرعت صفر و سرعت طراحی برای 3 حالت موقعیت عمودی مرکز جرم نمودار RAO حرکت رول شناور را استخراج و نتایج را با تئوریهای موجود تطابق داده و تجزیه و تحلیل کنید. (انیمیشن مربوط به هر حالت را تهیه کنید)

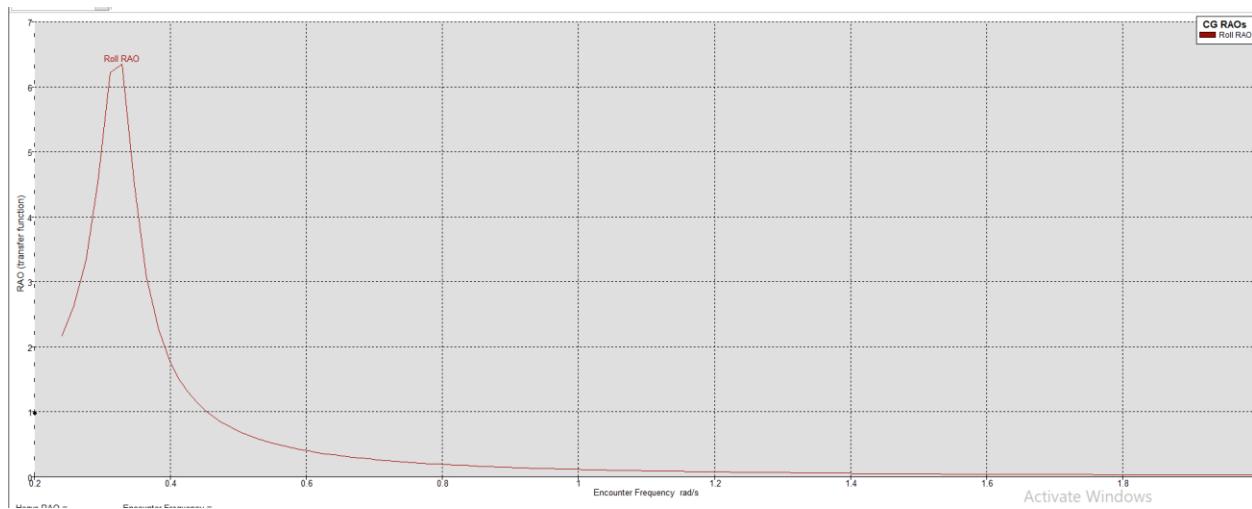
سرعت کشتی را صفر و 20 knot در ناظر میگیریم و سه حالت موقعیت عمودی را با تغییر CG شناور انجام میدهیم. میدانیم که زاویه برخورد 90 Beam Sea درجه میباشد. برای تغییر آن VCG را در بخش مکسرف موشن تغییر میدهیم در ابتدا 24 متر و سپس 20 و 16 متر میکنیم تا با جابجایی موقعیت عمودی مرکز جرم نمودار RAO را بررسی کنیم. (در بخش Mass distrubtion مرکز جرم را تغییر میدهیم)



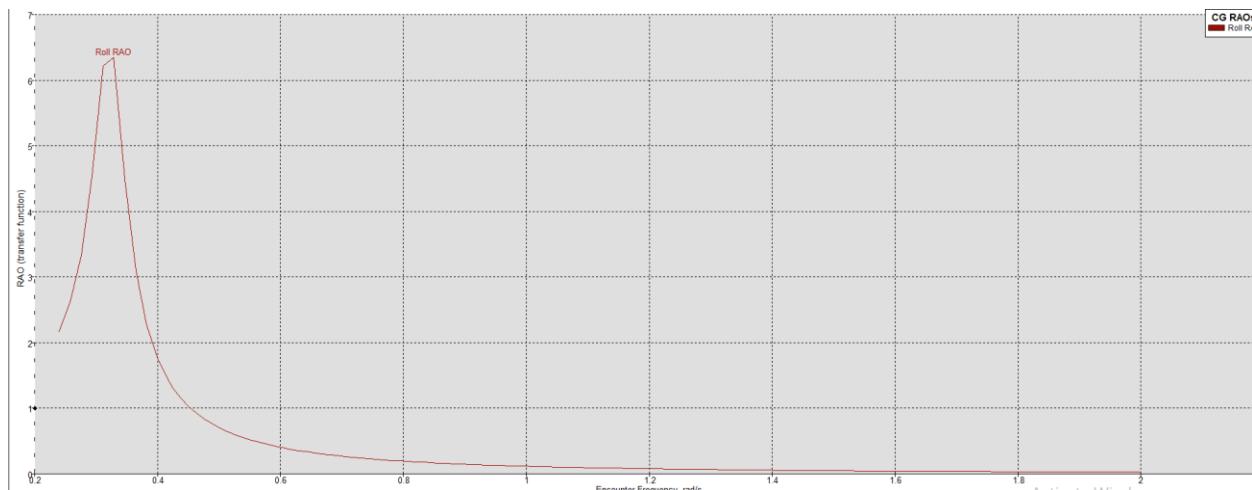
تصویر 20- نمودار Rao roll در مرکز ثقل 1 در سرعت 20 knot



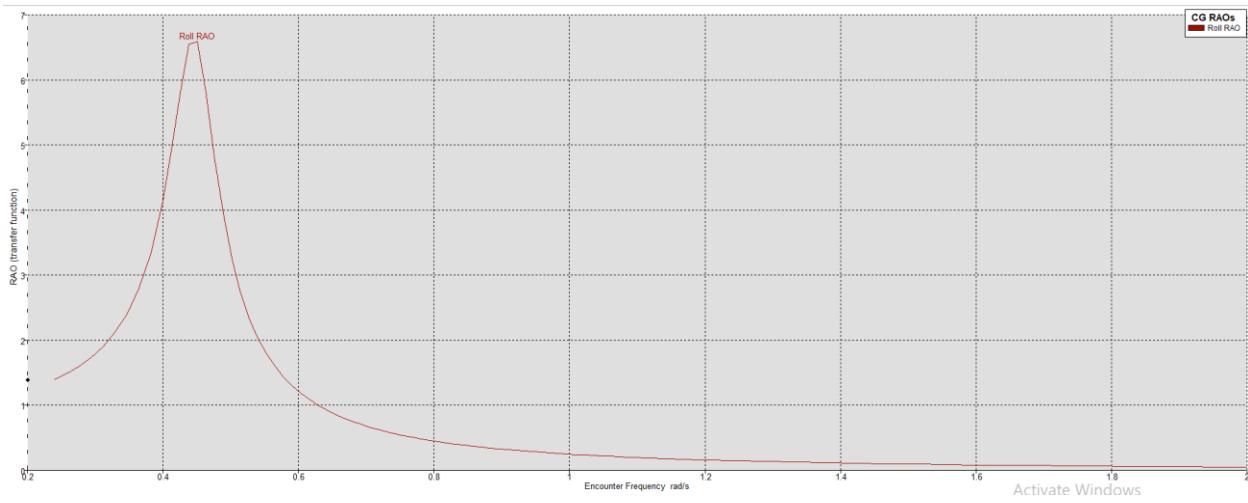
تصویر 21- نمودار Rao roll در مرکز ثقل 1 در سرعت 0



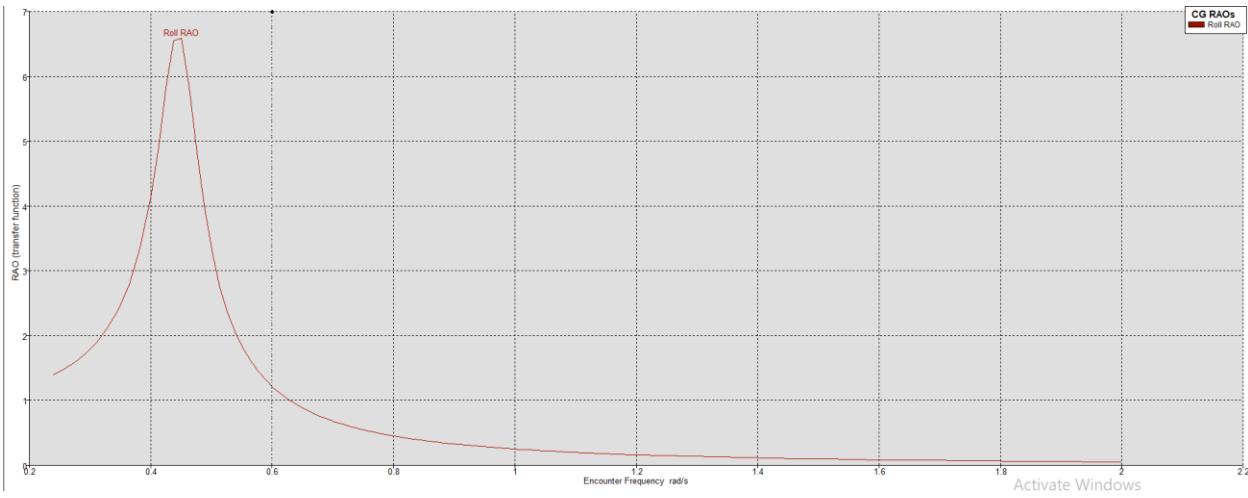
تصویر 21- نمودار Rao roll در مرکز ثقل 2 در سرعت 20 knot



تصویر 22- نمودار Rao roll در مرکز ثقل 2 در سرعت 20 knot



تصویر 32- نمودار Rao roll در مرکز ثقل 3 در سرعت 20 knot



تصویر 33- نمودار Rao roll در مرکز ثقل 3 در سرعت 0 knot

مشخص است که با تغییر مرکز ثقل RAO در حال تغییرات می باشد، از سمتی که حرکت Roll به مرکز ثقل وابسته می باشد ، این نکته محسوس است که تغییراتی وجود داشته باشند.

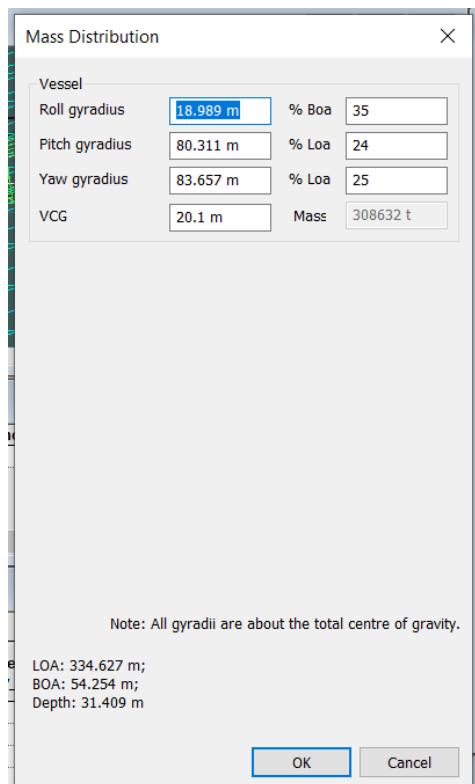
د) در دو حالت **Sea Beam** و **Sea Head**، برای دو حالت شعاع ژیراسیون رول و پیچ، نمودارهای **RAO** و فاز مربوط به حرکات **Roll** و **Pitch** برای مرکز جرم شناور محاسبه و اثرات این تغییرات را با تئوری های موجود تطابق داده و تجزیه و تحلیل کنید.

سرعت کشتی را 20 knot در نظر میگیریم و شعاع ژیراسیون آن را تعیین میکنیم ، بصورتی که میدانیم که حدود شعاع ژیراسیون برای رول و پیچ به صورت زیر می تواند باشد:

$$K_{yy} = (0.24L, 0.26L)$$

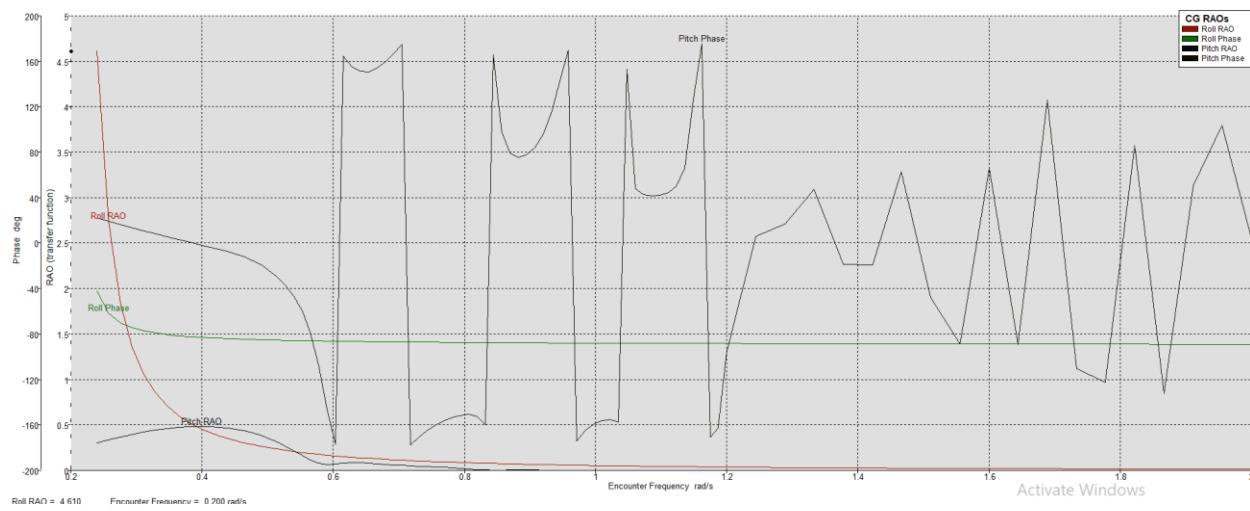
$$K_{xx} = (0.33B, 0.45B)$$

این درصد ها را در نرم افزار مکسرف موشن وارد میکنیم.

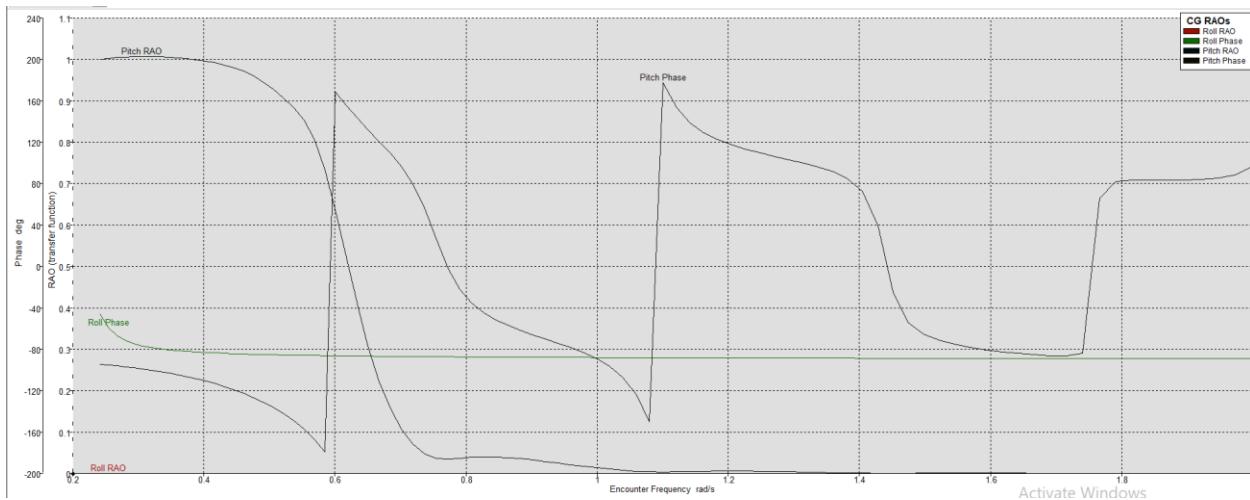


تصویر 34- مقادیر  $K_{yy}$  و  $K_{xx}$  به ترتیب 24 و 35 درصد در نظر گرفته شده اند.

خروجی آن نمودار های زیر میباشند .

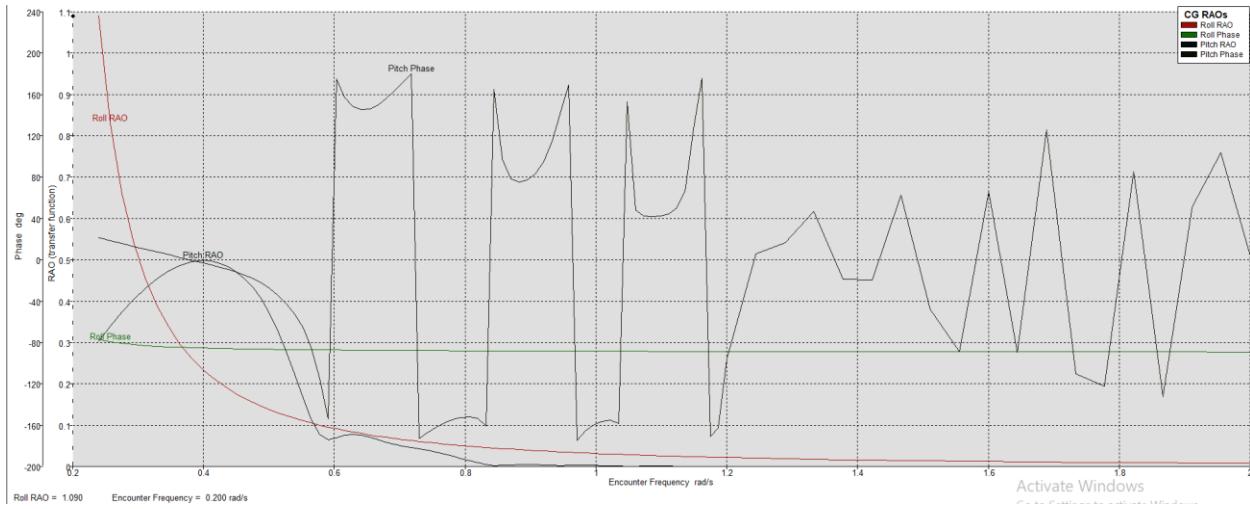


تصویر 35- نمودار های RAO و phase مربوط به حرکات Roll و Pitch شناور در زاویه 90 درجه در حالت اول

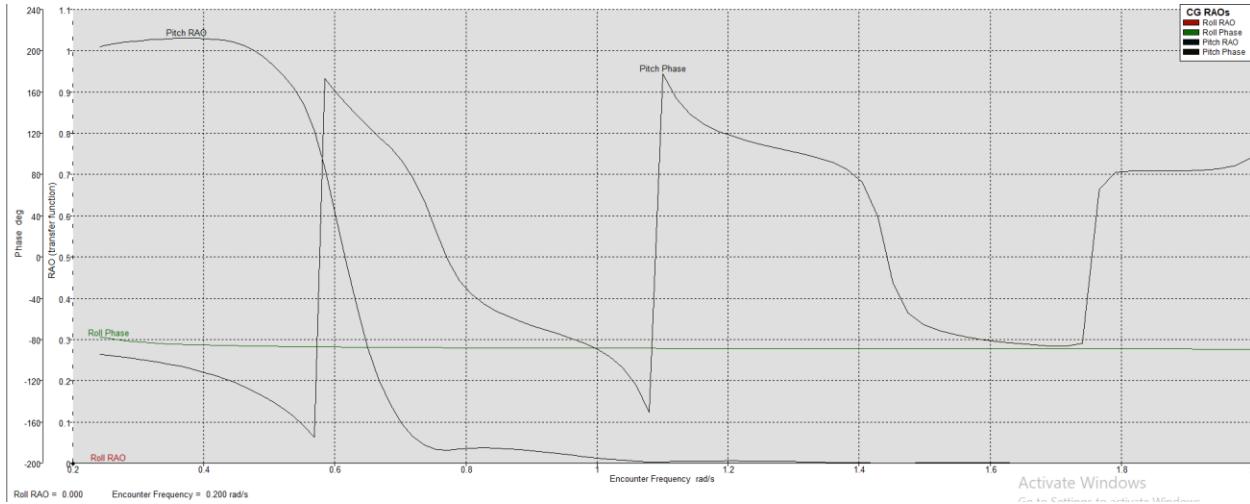


تصویر 36- نمودار های RAO و phase مربوط به حرکات Roll و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت اول

درصد هایی را در نرم افزار مکسیرف موشن وارد میکنیم، اینبار مقادیر مقادیر  $K_{yy}$  و  $k_{xx}$  به ترتیب 25 و 45 درصد در نظر گرفته شده اند.



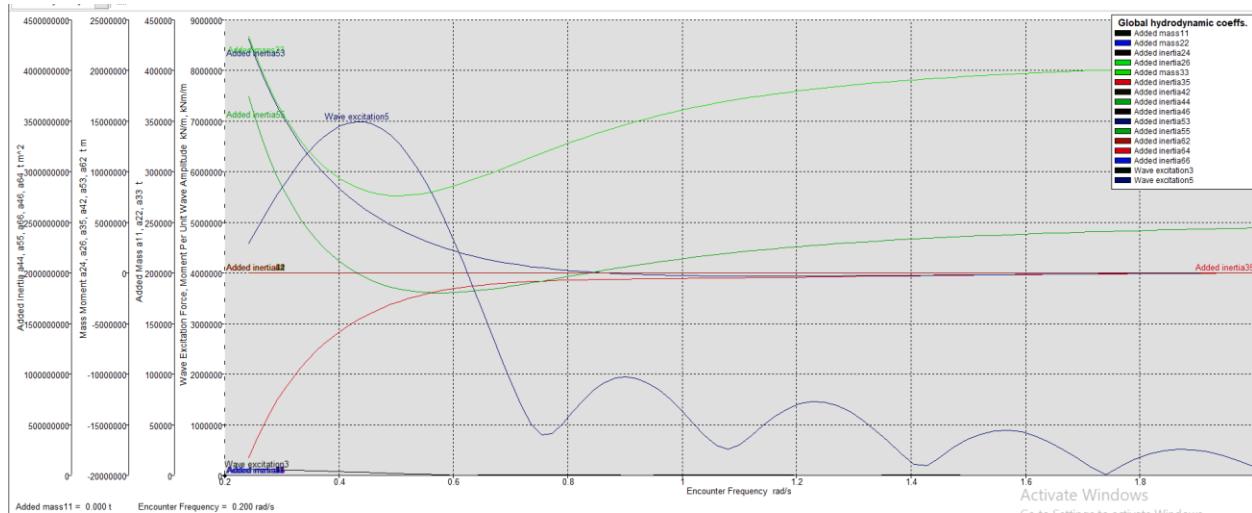
تصویر 37- نمودار های RAO و phase مربوط به حرکات Roll و Pitch شناور در زاویه 90 درجه در حالت دوم



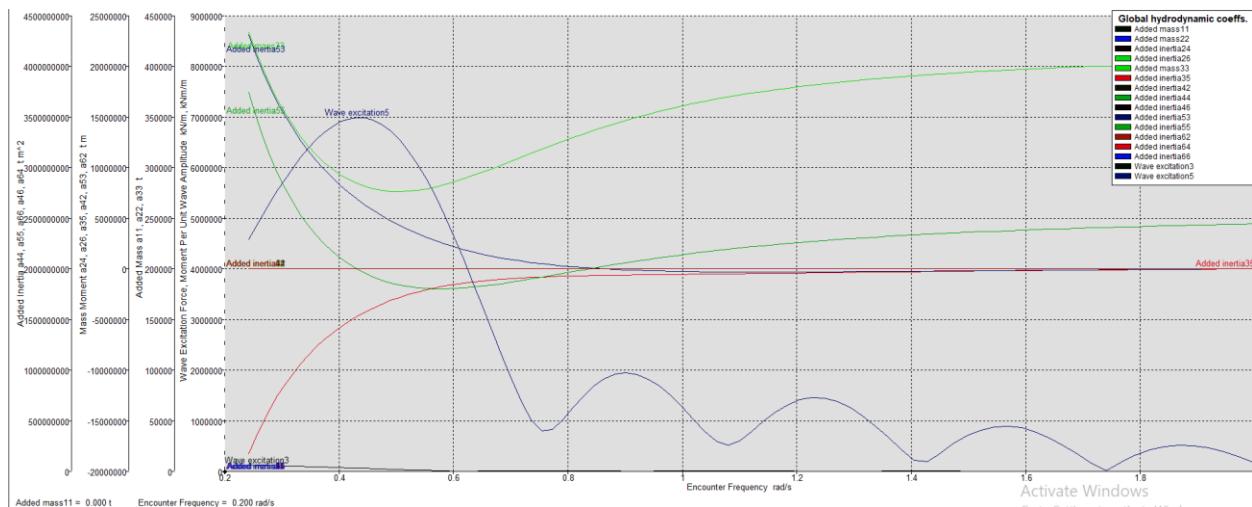
تصویر 38- نمودار های RAO و phase مربوط به حرکات Roll و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت دوم

دلیل آنکه تغییراتی وجود دارد آن است که شعاع ژیراسیون متفاوت خواهد بود و روی جرم افزوده و ممان افزوده تاثیراتی دارند که معادلات آن را متفاوت خواهد کرد. حرکت رول در زاویه headsea در هر دو حالت صفر می باشد.

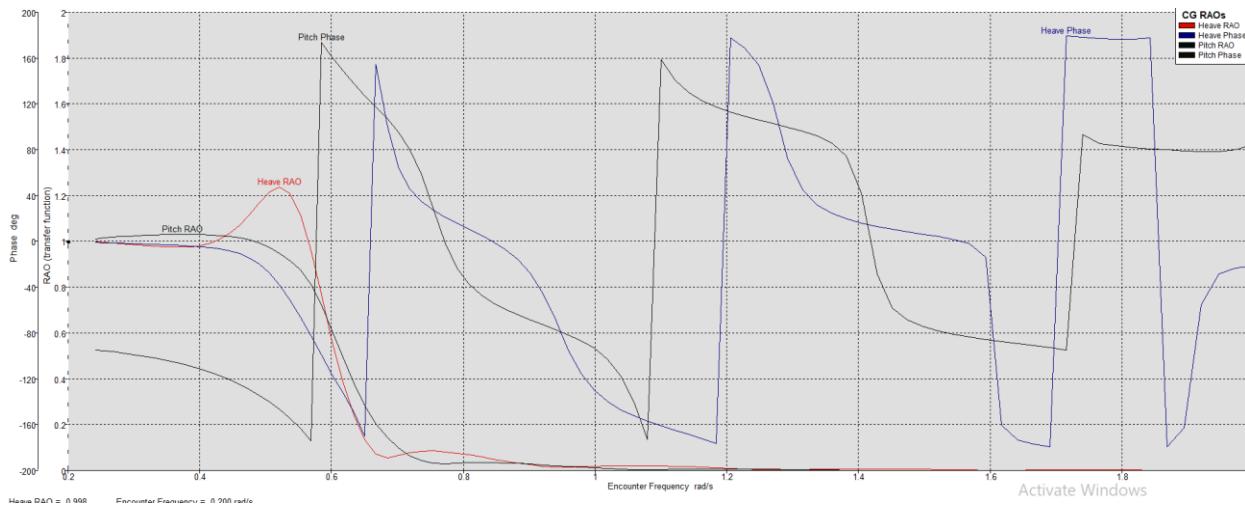
۵) برای وضعیت دریایی ۳ و ۴ در سرعت طراحی و حالت موج از روی، ضرایب هیدرودینامیکی، طیف پاسخ حرکات مربوط به حرکات Pitch، Heave و همچنین مقادیر شتاب این حرکات در سه نقطه مرکز جرم، قسمت سینه و قسمت پاشنه بر روی خط سنترالین شناور محاسبه و نتایج را با تئوریهای موجود تطابق داده و تجزیه و تحلیل کنید.



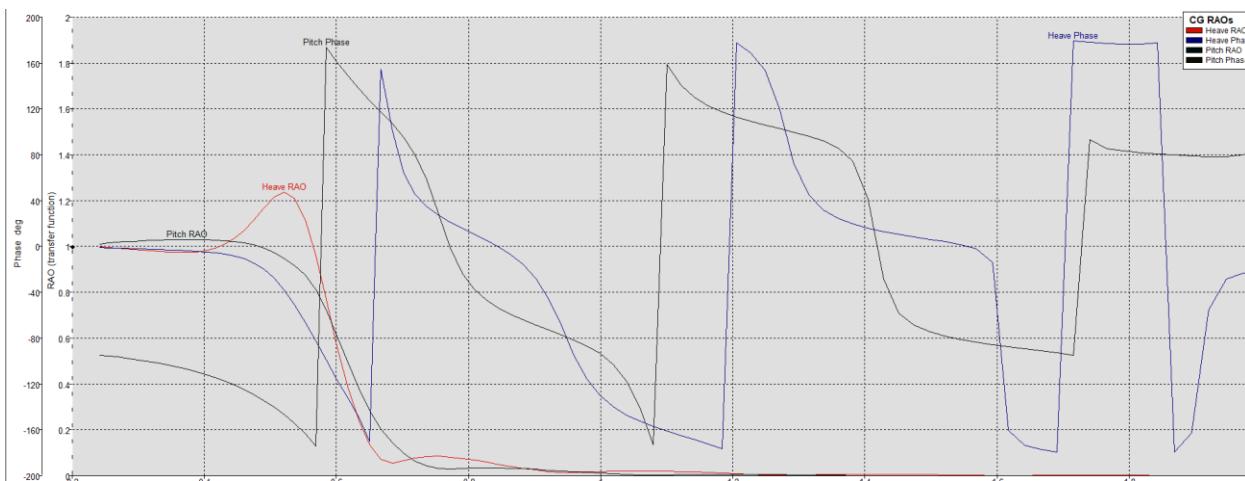
تصویر 39- نمودار ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکات Heave و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت اول



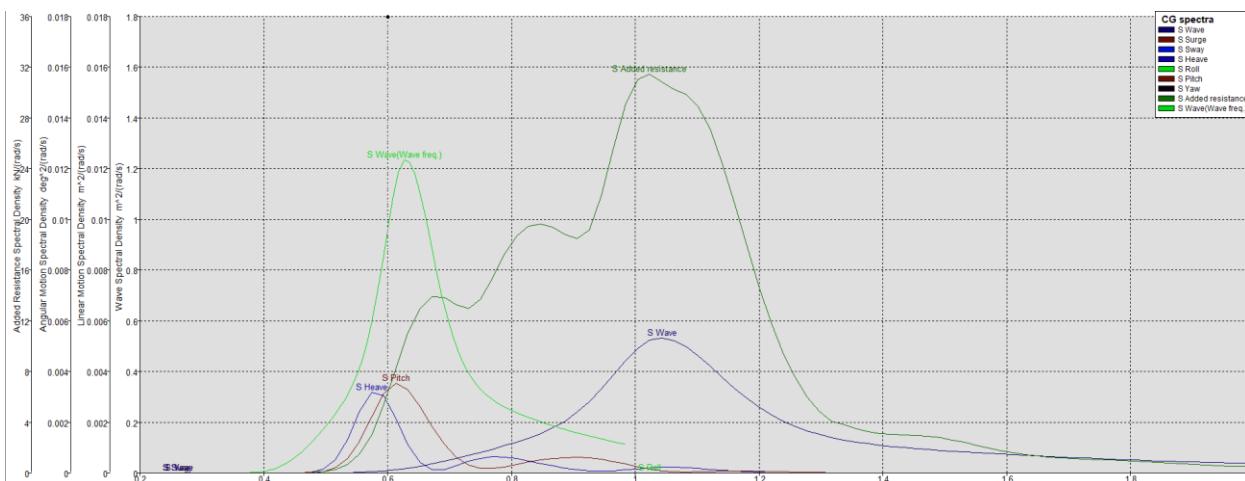
تصویر 40- نمودار ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکات Heave و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت دوم



تصویر 41- نمودار RAO مربوط به حرکات Heave و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت اول



تصویر 42- نمودار RAO مربوط به حرکات Heave و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت دوم



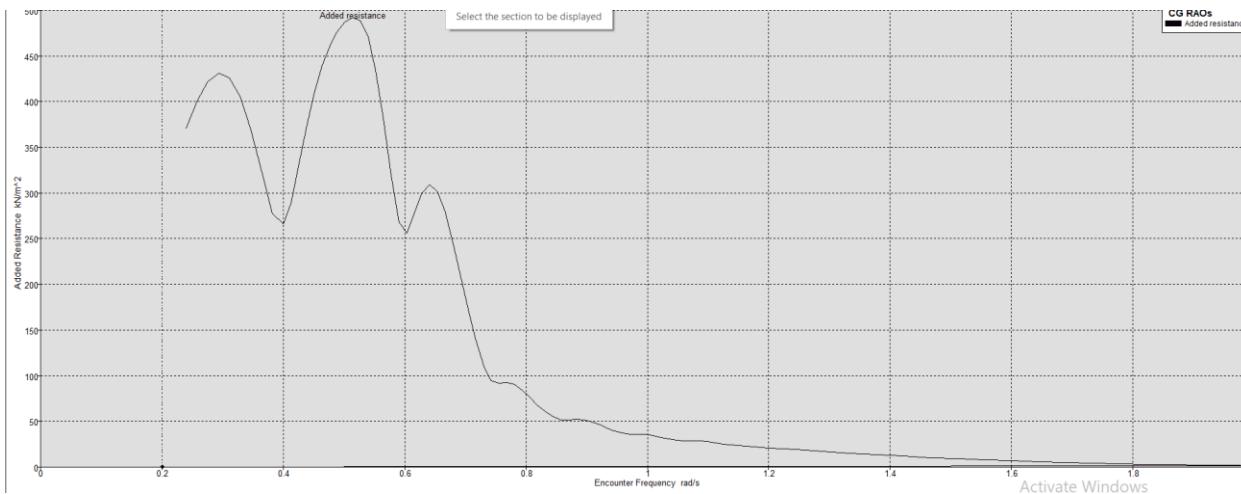
تصویر 43- نمودار طیف مربوط به حرکات Heave و Pitch شناور در زاویه 180 درجه در حالت دوم

و) برای وضعیت دریایی 3 و 4، در سرعت طراحی و در دو حالت Sea Beam و Sea Head مقدار مقاومت افزوده (Added Resistance) را محاسبه نمایید.

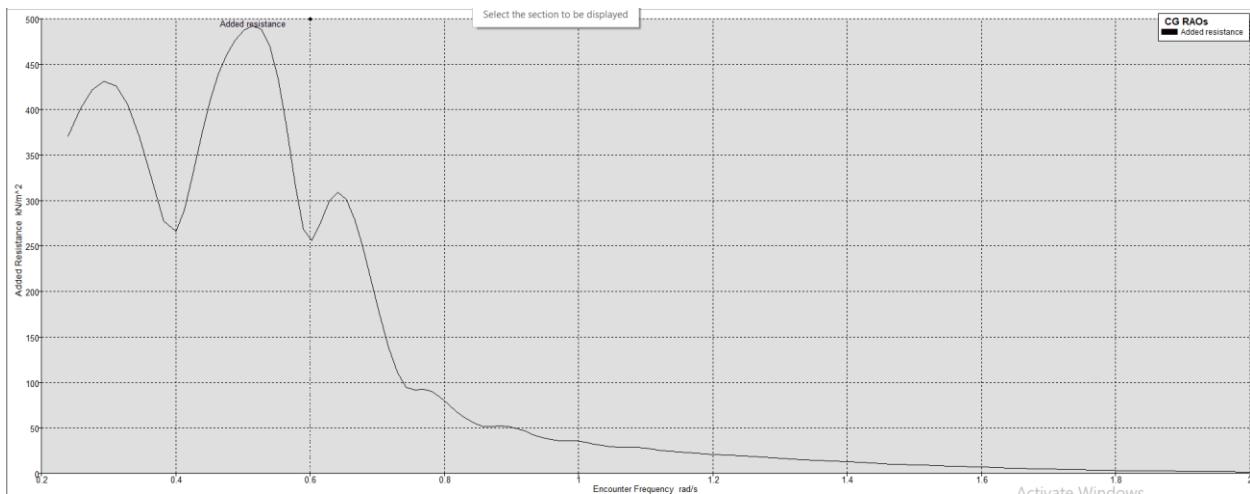
وضعیت دریایی شناور در جدول زیر آورده شده است، وضعیت 3 و 4 را در مکسرف وارد میکنیم . وضعیت Head sea و Beam sea را در مکسرف وارد میکنیم.

Beaufort number	Description	Knots	m/s	Wave Height, m	What the sea looks like
0	Calm	0-1	0.0-0.2	0.0	Sea like a mirror
1	Light Air	1-3	0.3-1.5	0.1	Ripples without crests
2	Light Breeze	4-6	1.6-3.3	0.2	Small wavelets
3	Gentle Breeze	7-10	3.4-5.4	0.3-1	Large wavelets
4	Moderate Breeze	11-16	5.5-7.9	1.0-1.5	Small waves
5	Fresh Breeze	17-21	8.0-10.7	1.5-2.5	Moderate waves
6	Strong Breeze	22-27	10.8-13.8	2.5-3.5	Larger waves
7	Near Gale	28-33	13.9-17.1	3.5-5	Sea heaps up
8	Gale	24-40	17.2-20.7	5-6.5	Moderately high waves
9	Strong Gale	41-27	20.8-24.4	6.5-8	High waves
10	Storm	48-55	24.5-28.4	8-10	Very high waves
11	Violent Storm	56-63	28.5-32.6	10-13	Exceptionally high waves
12	Hurricane	$\geq 64$	$\geq 32.7$	$\geq 14$	Phenomenal high waves

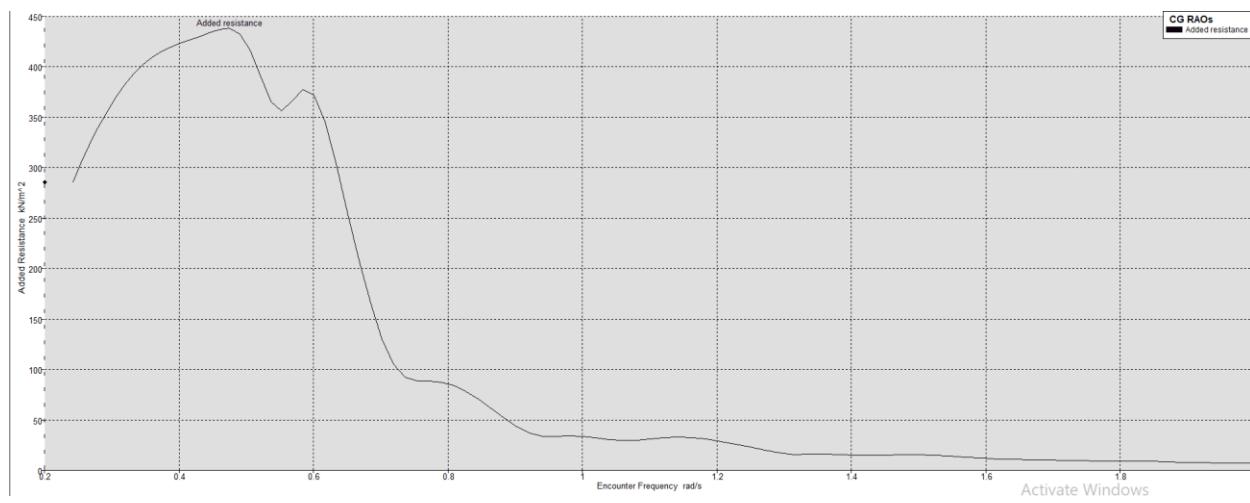
بدین صورت در نرم افزار added resistance را بدست آورده ایم.



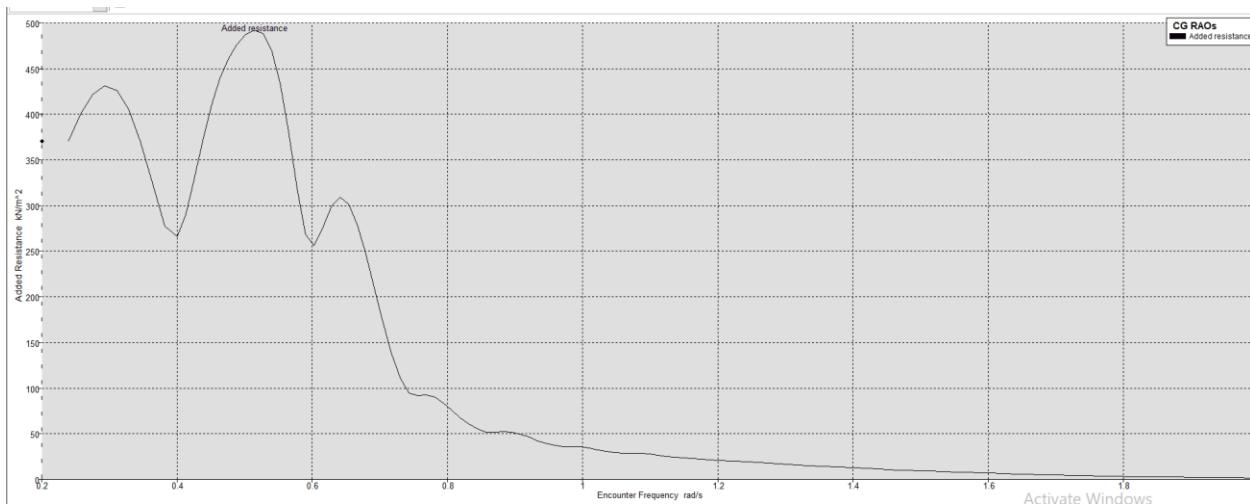
تصویر 44- نمودار added resistance در 180 درجه beaufort 3 در 180 درجه



تصویر 45- نمودار 45 added resistance در 90 درجه beaufort 3

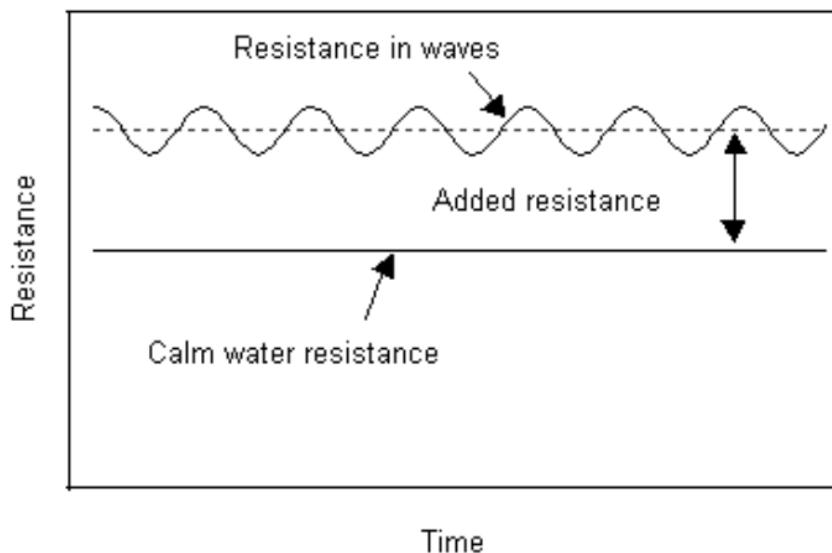


تصویر 46- نمودار 46 added resistance در 180 درجه beaufort 4



تصویر 47- نمودار 47 added resistance در 90 درجه beaufort 4

در **seaford** های بالاتر نیروی تحریک بیشتر میتواند شمرده شود ، چون دامنه بیشتری را احتمالاً شناور میتواند داشته باشد؛ از طرفی میتوان نتیجه گرفت که این نیروی تحریک سبب ایجاد مقاومت اضافی بیشتری شود؛ در مقایسه **3 beaufort** و **4 beaufort** نمودار های بالا آورده شده است. در زاویه 90 درجه تغییرات زیادی ندارد اما در **sea** افزایش یافته است .



تصویر 48- مقاومت اضافی وارد بر شناور

از آنجایی که در فصل پنجم دینامیک متحرکه های دریایی به موضوع نیرو های وارد بر شناور اشاره شده است، در ادامه به بررسی مقاومت اضافی میپردازیم. در حالت یکی از ابتدایی ترین تئوری های موجود برای مقاومت اضافی که به سال 1908 میلادی مبنای آن باز میگردد تئوری هاولاك میباشد. او این رابطه با ساده سازی به دست آورد، برای استفاده از فرمول برای یافتن مقاومت اضافی در هر فرکانس برخورد<sup>1</sup> در موجی که از رو布رو می آید بدست آورده است.

این فرمول بر اساس تئوری خطی موج استوار است. یعنی فرض شده است که دامنه موج های ایجاد شده توسط شناور کوچک است و میتوان از معادلات خطی موج های سطحی در آب عمیق استفاده کرد.

---

<sup>1</sup> frequency of encounter

برای محاسبه مقاومت موج با این فرمول، ابتدا باید شکل بدن شناور را به صورت تابعی از طول موج بیان کرد. این کار با استفاده از تبدیل فوریه انجام می‌شود و این فرمول مبتنی بر انتگرال میشل است که به صورت تقریبی و با فرض‌های خاصی محاسبه می‌شود تا مقاومت موج بر اساس شکل بدن شناور به دست آید.

بنابراین، فرمول هاولاک بر اساس درک فیزیکی موج‌های ایجاد شده توسط شناور و با استفاده از روش‌های ریاضی تقریبی برای محاسبه مقاومت موج ارائه شده است.

رابطه آن به شرح زیر می‌باشد:

$$R_{AW} = - \frac{k}{2} [F_z \sin \alpha + N \sin \beta]$$

که در آن  $k$  ثابت موج،  $F$  و  $N$  مقادیر نیرو و ممان خارجی هستند که به شناور وارد می‌شود. زوایای  $\alpha, \beta$  به ترتیب زوایای مربوط به اختلاف فاز بین نیرو و ممان با نیروی تحریک می‌باشند.

در ادامه باید با توجه به انتگرال گیری و بدست آوردن هر یک از ثوابت این رابطه بصورت زیر شرح داده شده است:

$$R_w = \frac{\rho g^2 B^2}{2\pi v^2} \left[ 1 + \frac{4\pi^2 L^2}{gB^2} \left( \frac{v^2}{gL} - 1 \right) \right] e^{-\frac{8\pi^2 h^2}{gB^2}}$$

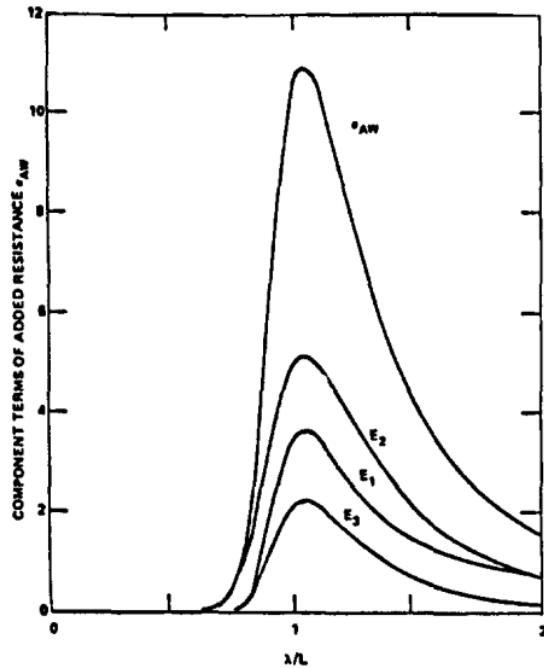
این فرمول با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی شناور و شرایط حرکت آن، مقاومت موج وارد بر شناور را محاسبه می‌کند.

**تئوری Joosen:**

عبارت هاولاک توسط بسیاری از محققان یافته است، به عنوان مثال تئوری Joosen به فرم زیر وجود دارد :

$$R_{AW} = \frac{\omega e^3}{2g} [N_z z^2 + N_\theta \theta^2]$$

جایی که فرکانس برخورد دایره ای است.



نمودار 49) مقاومت اضافی موج بر حسب تئوری Joosen ( $F=0.30$ )

همچنین می توان از چنین تخمینی حداقل مقاومت اضافه شده را یافت مقاومت بیشتری نسبت به متوسط دارند.

### Maruo تئوری

این رابطه برای یافتن نیروی موج بر روی اجسام با سرعت رو به جلو می باشد تا مقاومت اضافه را محاسبه کرد. با محاسبه انتگرال های متناهی و نیمه نامتناهی حاوی تابع kochin انجام می شود. بدین صورت که رابطه اصلی بصورت ير می باشد:

$$R_w = \frac{\rho}{4\pi} \left\{ - \int_{-\infty}^{\bar{k}_1} + \int_{\bar{k}_2}^{\bar{k}_3} + \int_{\bar{k}_4}^{\infty} \right\} \frac{\bar{\kappa} (m - K \cos \beta)}{\sqrt{\bar{\kappa}^2 - m^2}} |H(m)|^2 dm,$$

چگالی بر حسب سیال می باشد و  $k = \frac{w_0^2}{g}$  ثوابت زیر را داریم که :

$$\begin{aligned}\bar{k}_1 &= -\frac{\kappa_0}{2} (1 + 2\tau + \sqrt{1 + 4\tau}), & \bar{k}_3 &= \frac{\kappa_0}{2} (1 - 2\tau - \sqrt{1 - 4\tau}), \\ \bar{k}_2 &= -\frac{\kappa_0}{2} (1 + 2\tau - \sqrt{1 + 4\tau}), & \bar{k}_4 &= \frac{\kappa_0}{2} (1 - 2\tau + \sqrt{1 - 4\tau}).\end{aligned}$$

و براساس تابع kochin داریم که:

$$H(m) = \iint_{S_b} \left( \phi_B \frac{\partial}{\partial n} - \frac{\partial \phi_B}{\partial n} \right) e^{\bar{\kappa}z + i(xm + y\sqrt{\bar{\kappa}^2 - m^2})} ds,$$

$$R_{aw} = \frac{1}{2} \rho g B^2 \zeta_a^2 \left( \frac{\omega^2 L}{g} \right)^2 \left[ \frac{1}{\left( \frac{\omega^2 L}{g} - 1 \right)^2 + \left( \frac{2\pi h}{L} \right)^2} \right]$$

که در آن  $L$  و  $B$  به ترتیب طول و عرض و عمق آبخور شناور هستند، همچنین دامنه موج  $\zeta$  و فرکانس برخورد  $W$  می باشد.

## منابع:

- 1] MAXSURF Motions CONNECT Edition V23 MOSES Motions CONNECT Edition V12, SACS Motions CONNECT Edition V1 , 26November 2021
- 2] Dynamic Marine Vehicles , Dr seif