

## شبیه سازی آیرودینامیکی کشتی کانترینر و محاسبه تاثیر چیدمان بار بر کاهش مصرف سوخت

حامد مجیدیان<sup>۱</sup>

فرهود آذر سینا\*

[F.Azarsina@srbiau.ac.ir](mailto:F.Azarsina@srbiau.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۲۶

### چکیده

زمینه و هدف: موقعیت کشور ایران در منطقه مناسب جغرافیایی، دارا بودن مرزهای گسترده دریایی و همچنین وجود خطوط ترانزیتی گسترده کالا موجب شده است اغلب تجارت کالا به وسیله کشتی صورت می گیرد. همواره یکی از بحث های گسترده در زمینه حمل و نقل دریایی میزان سوخت مصرفی می باشد. در این پژوهش بر آنیم تا با مدلسازی چندنمونه جانمایی کانترینر در سرعت یکسان به مدلی بهینه از جانمایی کانترینر بر روی عرشه بپردازیم.

روش بررسی: در این مقاله با استفاده از نرم افزار انسیس سی اف ایکس یک شناور پست پاناما کس کانترینر به ظرفیت ۹۰۰۰ TEU با چیدمان های مختلف کانترینر روی عرشه با نسبت ۱/۴ مدل سازی و شبکه بندی شده، سپس جریان باد حول آن در چیدمان های مختلف کانترینر شبیه سازی شده است.

یافته ها: نتایج تحقیق نشان می دهد که شکل جانمایی کانترینرها بر روی عرشه بر مقاومت باد کشتی تاثیرگذار است و نتایج شبیه سازی عددی تطبیق مناسب با آزمایش های تجربی دارد. در ادامه تاثیر چیدمان کانترینر بر کاهش مصرف سوخت و آلاینده ها محاسبه شده است.

بحث و نتیجه گیری: توصیه می شود که برای کاهش نیروی درگ و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و صدور آلاینده ها زیست محیطی در بارچینی کشتی های کانترینری از خالی گذاشتن و چیدمان نامتوازن کانترینرها روی عرشه پرهیز شود. همچنین، چیدمان کانترینرها چه در عرشه جلویی و چه در عرشه عقبی به حالت خط جریان سازی شده نزدیک تر گردد.

واژه های کلیدی: کشتی کانترینر، دینامیک سیالات محاسباتی، نیروی درگ باد، آشفستگی جریان، مصرف سوخت.

۱- کارشناس ارشد سازه کشتی، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۲- استادیار، گروه معماری کشتی، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.\* (مسئول مکاتبات)

## **Aerodynamic Simulation of a Container Ship and Evaluation of Cargo Configuration Effect on Fuel Consumption**

**Hamed Majidian<sup>1</sup>**

**Farhood Azarsina\*<sup>2</sup>**

[F.Azarsina@srbiau.ac.ir](mailto:F.Azarsina@srbiau.ac.ir)

Admission Date: January 4, 2017

Date Received: October 17, 2016

### **Abstract**

**Background and Objective:** Iran has access to open seas and plenty of sea transit around it has urged presence of merchant ships in the region. Fuel consumption has always been a matter of concern for ships. In this study, it is attempted to develop computer models for several container ship cargo configurations and discuss an optimum configuration at a constant speed front wind.

**Method:** The paper presents simulation results using ANSYS CFX commercial software for a Post-Panamax 9000 TEU container ship. The ship is modelled in a 1:4 scale, then using unstructured mesh the wind field around it is solved. Drag force, drag coefficient, pressure contour and wind streamline velocity in ten different loading conditions are compared with each other. Finally, the optimized container configuration for loading on deck of the vessel is introduced.

**Findings:** Simulation results demonstrate the influence of container configuration on wind load distribution. Also the numerical results are verified versus wind tunnel test data. Finally, the influence of container configurations on fuel consumption and reduction of pollutant emissions was calculated.

**Discussion and Conclusion:** It is proposed to minimize empty spaces between the cargo containers and avoid unbalanced cargo distribution over deck in order to reduce the wind drag force and consequently reduce the fuel consumption and pollutant emissions. Also, it is suggested to make cargo distribution on the forward and aftward deck areas more streamlined.

**Keywords:** Container Ship, Computational Fluid Dynamics, Air Resistance, Flow Turbulence, Fuel Consumption.

---

1- M.Sc. in Ship Structure, Department of Naval Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Naval Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. \* (Corresponding Author)

## مقدمه

به طور کلی مقاومت باد در شرایط آرام جوی ۳ تا ۵ درصد مقاومت کل شناور می باشد (۱). اما در کشتی های کانتینربر که سطح بزرگی از روی عرشه در معرض باد می باشد ، مقاومت باد عدد قابل ملاحظه ای (۲ تا ۱۰٪) از مقاومت کل را در برمی گیرد (۲). نیروهای باد باعث افزایش مقاومت رانشی کشتی می- شوند که مقاومت طولی بیشترین بخش تاثیرگذاری بر روی کشتی را در برمی گیرد. نیروی عرضی سبب ایجاد گشتاور عرضی می شود و متعاقباً سبب رانندگی و انحراف کشتی از مسیر اصلی می شود که از دو جنبه کشتی را تحت تاثیر قرار می دهد. در ابتدا سبب می شود نوک کشتی بر روی مسیر اصلی پیش بینی شده هدایت نشود که این موضوع خود سبب ایجاد مقاومت می شود از جهت دیگر جریان رانندگی کشتی از مسیر خود می باید با فرمان های متعدد سکان انجام گیرد که سبب افزایش مقاومت رانشی کشتی می گردد. نسبت نیروهای طولی به عرضی توسط آندرسون (۱۹۷۸) (۳) و برلکوم (۱۹۸۱) (۴) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

براساس آندرسون (۱۹۷۸) مقاومت القایی که ناشی از تغییرات مکرر و افزایش زاویه سکان است نقش بسیار زیادی در نیروهای مقاومت کشتی ایفا می کند در حالی که براساس مطالعات برلکوم این تاثیرات می تواند در بادهای قوی تر حتی به اندازه بزرگی مقاومت طولی کشتی باشد. به صورت کلی در مبحث مقاومت رانشی کشتی نیروهای مقاومت طولی از اهمیت بیشتری برخوردارند که این موضوع توسط برلکوم و آگ نیز مورد توجه قرار گرفته است. براساس مطالعات برلکوم (۱۹۸۱) مقاومت موج و باد دارای اندازه مشابهی هستند. در صورتیکه براساس بیان آگ (۱۹۶۸) (۵) به ندرت نیروی مقاومت باد بیشتر از ۱۵٪ مقاومت کل کشتی را شکل میدهد.

در سال (۱۹۹۷) (۶) بلندمرن برای نخستین بار به بررسی تاثیرات چیدمان های مختلف کانتینر بر روی عرشه کشتی و نیروی باد پرداخت و به این نتیجه رسید که توزیع نامتقارن چیدمان عرضی کانتینرها باعث افزایش مقاومت باد می شود. او برای ارایه بهتر نتایج به مقایسه نیروی مقاومت باد بر روی

عرشه کشتی کانتینربر در دو حالت مختلف پرداخت حالت اول چیدمان کانتینر بر روی عرشه کامل و چیدمان نامتوازن کانتینرها بر روی عرشه کشتی نتایج آن از قرار ذیل است.

- (۱) نیروی مقاومت طولی در حالت چیدمان نامتوازن بیشتر می شود
- (۲) نیروی عرضی در حالت چیدمان نامتوازن کمتر می شود.
- (۳) گشتاور طولی کشتی حالت چیدمان نامتوازن کمتر می شود.
- (۴) گشتاور عرضی کشتی حالت چیدمان نامتوازن کمتر می شود.

آندرسون در سال (۱۹۷۸) تاثیر چیدمان کانتینرها را به صورت مجزا مورد بررسی قرار داد که نتایج ذیل حاصل آمدند (۳).

- (۱) تغییرات چیدمان کانتینرها بر روی عرشه عقبی تاثیر کمتری در نیروهای طولی می گذارد. بنابراین از این حیث اختلاف زیادی میان کشتی بدون بار و کشتی که تنها کانتینر بر روی عرشه عقبی خود حمل می کند، وجود ندارد.
- (۲) تغییر در چیدمان کانتینرهای عرشه جلویی برای تغییر نیروهای طولی از اهمیت بیشتری برخوردار است.
- (۳) چیدمان نامتوازن کانتینرها می تواند به صورت عمده ای سبب افزایش نیروی طولی شود که در صورتی این عدم توازن به صورت عمده باشند نسبت به توزیع متوازن حتی تا ۱۰۰٪-۷۰٪ می تواند باعث افزایش نیروی طولی کشتی شود برای زمانی که باد از روبرو می وزد.
- (۴) خط جریان سازی چیدمان کانتینرها بر روی عرشه جلویی تاثیر کمی بر روی تغییر نیروهای طولی می گذارد.
- (۵) تاثیر چیدمان کانتینرها روی عرشه بر گشتاور عرضی برای باد از روبرو قابل ملاحظه می باشد. چیدمانی

دو حالت برای زاویه وزش ۵۰ درجه تقریباً ۴۳٪ نیروی طولی متفاوت بود. برای گشتاور عرضی چیدمان خط جریان سازی شده برای کانتینرها بر روی عرشه جلویی کاهش چشمگیری نسبت به دیگر انواع چیدمان در عرشه جلویی برای باد از روبرو داشت و چیدمان مدل ساده سازی شده کانتینرهای عرشه عقبی که به صورت خط جریان سازی شده چیدمان شده بودند بیشترین مقدار گشتاور عرضی را زمانی که باد از روبرو می وزند تجربه نمودند.

۲. مدل بارگیری با تمام ظرفیت: میزان نیروی طولی به صورت گسترده ای برای باد از روبرو افزایش پیدا می کند که این میزان برای باد با زاویه وزش ۳۰ درجه حدود ۵۴٪ است. زمانی که باد از روبرو می وزد چیدمان کامل کانتینرها در عرشه عقبی نسبت به چیدمان نامنظم آن ها میزان کمتری گشتاور عرضی تجربه می کند.

آندرسن (۲۰۱۳) مدلسازی تجربی در تونل باد را با افزایش تعداد چیدمانه ای مختلف گسترش داد او تعداد چیدمان ها را از ۶ عدد به ۱۶ حالت گسترش داد و در این حالت به بررسی نیروهای طولی و گشتاورهای عرضی پرداخت و از حالت چیدمان کامل بعنوان حالت مرجع مقایسه ای استفاده نمود که نتایج پیشین او با جزئیات بسیار بیشتری تأیید نمود (۸).

خیرالحسن (۲۰۱۲) به بررسی حل عددی چیدمان مختلف کانتینرها روی عرشه کشتی کانتینربر و ارتباط آن با نیروهای طولی و همچنین بررسی کانتورهای سرعت و فشار در دو حالت پرداخت. مضاف بر آنکه دو حالت چیدمان را در زوایای مختلف صفر و نود درجه بررسی نمود. در نهایت به تاثیر تغییر نیروها در مقاومت باد و نتایج آن برای کاهش مقاومت کل و بهبود مصرف سوخت شناور پرداخته است (۹).

خیرالحسن شرایط محیطی حل را باتوجه به شرایط طبیعی کشتی در دریا در نظر گرفته است به عبارتی محدوده دامنه حل و شرایط مرزی طوری انتخاب شده که شرایط حل برای شناور در محیط طبیعی صدق کند. شناور مورد مطالعه خیرالحسن دارای ظرفیت حمل ۲۸۰۰ TEU می باشد و طول سراسری آن ۲۲۱٫۶۵ متر است. مضاف بر آنکه شرایط حل پایا

که کانتینرها بر روی عرشه جلویی چیده شده باشند و بر روی عرشه عقبی چیده نشده باشند مفید نیست چرا که اندازه گشتاور عرضی را بزرگ می نماید.

(۶) تاثیر مساحت جنبی کشتی ها بر روی نیروی عرضی و گشتاور طولی کشتی بسیار زیاد است.

(۷) چیدمانی که کانتینرها در عرشه جلویی به صورت کامل چیده شده باشند و بر روی عرشه عقبی خط جریان سازی شده باشند مطلوب ترین چیدمان در بین ۱۹ شکل مختلف چیدمان کانتینرها می باشد.

در سال (۲۰۰۷) اینگرید آندرسن (۷) و (۸) مطالعات خود را بر روی مدل کشتی کانتینربری پست پاناماکس با ظرفیت حمل ۹۰۰۰ TEU که در مقیاس  $\frac{1}{450}$  کوچک شده را در تونل باد برای بررسی اثرات تغییر چیدمان کانتینر بارگیری شده روی عرشه کشتی و روابط آن با نیروهای مقاومت طولی و عرضی در دو مدل اصلی چیدمان کانتینر خط جریان سازی شده و چیدمان نامتوازن کانتینرها روی عرشه کشتی انجام داد که هر کدام به سه ظرفیت مختلف دسته بندی شده بودند (شکل ۱).



شکل ۱- مدل چیدمان بارگیری کانتینر بر روی کشتی

پاناماکس کانتینربر در مطالعه آندرسن (۸)

Figure 1. Small model for cargo distribution on a container Panamax ship (8)

البته این مطالعات با چرخش مدل در درون تونل باد برای ایجاد تغییر زوایای وزش باد از ۰ تا ۵۰ درجه همراه بود که نتایج بدست آمده از قرار ذیل بود.

۱. مدل خط جریان سازی شده: کمترین میزان نیروهای طولی برای زمانی بود که کانتینرها در عرشه عقبی و جلویی به صورت خط جریان سازی شده بارگیری شده بودند که از کاهش چشمگیری نسبت به حالتی که کانتینرها تمام ظرفیت در عرشه جلویی و عقبی بارگیری شده اند، برخوردار بود و در مقایسه این

می باشد. نوع مش های قابل تولید و دریافت توسط این گروه نرم افزاری شامل شبکه هایی با المان مثلثی و چهاروجهی برای هندسه های دوبعدی و همچنین چهاروجهی، شش وجهی، هرمی یا گوه ای برای هندسه های سه بعدی می باشد که در مطالعه حال حاضر از مش سه بعدی استفاده شده است. همچنین نرم افزار به کاربر اجازه بهبود شبکه به معنای ریز یا درشت کردن شبکه در مرزها و مکان های لازم هندسه را می دهد. این بهینه سازی باعث می شود که نتایج در ناحیه هایی که داری جریان های گردابی مانند لایه های مرزی می باشند، دقیق تر شود.

#### ۱-۲- فرضیه ها

در این مطالعه بدلیل پیچیدگی و سنگین بودن محاسبات فرضیه های ساده کننده ای بشرح زیر انجام گرفته است :

۱. قسمت بالای آبخور کشتی برای بررسی اثر باد مورد تحقیق قرار گرفته است.

۲. در این پژوهش جریان سیال سه بعدی می باشد و برای تعیین اثر آشفتگی، از مدل پیشنهادی در مقالات (k- $\omega$ , SST) استفاده شده است.

۳. مدل کشتی متقارن می باشد بنابراین شرط تقارن در نظر گرفته شده و نیمی از مدل بررسی می گردد.

۴. کشتی ثابت فرض می شود و بدون هیل و تریم در نظر گرفته شده است.

۵. مدلسازی مقیاسی از شناور که به ابعاد واقعی نزدیکی دارد جهت صرفه جویی در حجم بسیار بالای محاسبات.

۶. فیزیک جریان باد ماهیت گذرا دارد که با توجه به محدوده نیروی های مورد بررسی، به صورت پایا در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۲- روش تحلیل

بزرگ بودن ابعاد فضای حل مساله خصوصاً در مسائلی مانند شبیه سازی شرایط تونل باد که مرزهای جانبی تاثیر زیادی روی شرایط حل مساله می گذارند از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از طرفی بیش از حد بزرگ گرفتن فضای حل مساله، تعداد سلول های محاسباتی و در نتیجه زمان حل را به شدت

در نظر گرفته شده و تعداد کل شبکه در حدود ۳ میلیون مش لحاظ شده است و شرایط آشفتگی نیز k- $\epsilon$  در نظر گرفته شده است. در مطالعه خیرالحسن برای نخستین بار بود که از دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه میزان نیروهای طولی کشتی کانتینربر استفاده شده بود و علیرغم نتایج بدست آمده مطالعه فوق از فقدان مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی رنج میبرد. به عبارتی اعتبارسنجی مطالعه عددی تنها محدود به فرمول های عددی بوده و مبنای مقایسه عملی وجود ندارد.

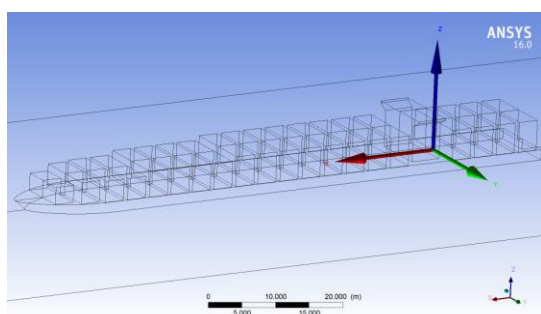
بررسی عملکرد آیرودینامیکی یک شناور کانتینربری پاناماکس با چیدمان های مختلف بارگیری کانتینر بر روی عرشه به روش دینامیک سیالات عددی، مقایسه آن با نتایج آزمایشهای تجربی و درک رفتار نیروی باد تحت این تغییرات چیدمان، مهمترین هدف این تحقیق می باشد. همچنین بررسی نرم افزاری این هدف در روشن شدن نقاط مبهم مدلسازی و حل مساله مانند نوع مدل اغتشاش جریان برای بررسی بهتر نیروی باد نیز از اهداف فرعی این تحقیق بشمار می آید. بررسی کانتورهای سرعت و فشار در نقاط بحرانی نیز (پرفشار) که ناشی از جانمایی شناور می باشند نیز مورد تحقیق قرار خواهد گرفت.

#### ۲-۲ دینامیک سیالات محاسباتی

در این مطالعه از دینامیک سیالات محاسباتی برای حل عددی معادلات پایستاری جرم، مومنتم و انرژی حول شناور استفاده شده است. در این روش با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان های کوچک تر و اعمال شرایط مرزی برای گره های مرزی با اعمال تقریب هایی یک دستگاه معادلات خطی بدست می آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت و فشار در ناحیه مورد نظر بدست می آید. به همین منظور از نرم افزار انسیس سی اف ایکس استفاده شده است که یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای تحلیل جریان سیال شناخته شده است. روش عددی حل در این نرم افزار و این مطالعه روش حجم محدود می باشد. از خصوصیات انحصاری این نرم افزار استفاده از یک محیط برای تمام مراحل حل مساله، شامل تولید هندسه و مش، تعریفی فیزیک مدل، حل مساله و پس پردازش

کانتینرهای استفاده شده ۴۰ فوت می باشد (۱۰). همان طور که در (شکل ۲) نشان داده شده مرکز مختصات دکارتی راستگرد استفاده شده به صورت ثابت در محل تقاطع خط مرکزی شناور و عرشه و LPP/6 در نظر گرفته شده است. راستای محورها مطابق با ITTC 1993 در نظر گرفته شده است. همچنین نیروی درگ در راستای محور  $x$  در نظر گرفته شده است.

همچنین لازم به ذکر است که برای مش بندی فضای حل مسئله باتوجه به پیچیدگی هندسه شناور از مش بدون ساختار استفاده شده است که دقت نتایج تحلیل را افزایش میدهد. تراکم مش بندی در قسمت های مختلف با توجه به فضای حل تنظیم گردیده است (شکل ۳ را ببینید). بدین منظور بر روی سطح شناور که از اهمیت بالایی در حل معادلات برخوردار است، سائز المان ها به  $0.1$  متر رسیده است مضاف بر آن که تراکم مش بندی در لایه های مرزی چندین برابر شده (۵ برابر) و میزان مش در نقاط احتمالی مورد فشار بسیار افزایش یافته و برای کاهش حجم محاسبات هرچقدر از بدنه شناور به سمت دیواره های دامنه نزدیک می شویم، حجم مش کاهش یافته به  $0.5$  متر رسیده است (شکل ۴ را ببینید). میزان مجموع تعداد سلول های مش در فضای حل بیشتر از ۷ میلیون المان در بیشتر از ۲ میلیون گره می باشد که از لحاظ کمیت و کیفیت مش بندی پاسخ های حل را قابل اعتنا تر می نماید.



شکل ۲- نمونه مدل سازی شده شناور در نرم افزار سی اف ایکس و محورهای مختصات

Figure. 2. Computer model of the container ship in ANSYS CFX and the coordinate system

افزایش می دهد بنابراین بدست آوردن فضای بهینه حل نیازمند تجربه و سعی و خطا می باشد. در تحقیق حال حاضر فضای بهینه حل باتوجه به مدل آزمایشگاهی در (جدول ۱) مشخص شده است. از جهتی برای جلوگیری از بوجود آمدن خطاهای محاسباتی نرم افزاری این ابعاد بطور کلی به نسبت ۱ به ۴ کوچک گردیده اند تا فضای نسبی مناسب برای حل مساله حاصل گردد.

### جدول ۱- مشخصات فضای حل عددی

Table 1. Computational domain features

مشخصات فضای حل در مدل آزمایشگاهی (۸)			
دامنه	مدل آزمایشگاهی	شناور	
طول	۲۶۰ سانتی متر	طول	۷۵ سانتی متر
عرض	۱۰۰ سانتی متر	عرض	۱۰ سانتی متر
ارتفاع	۷۰ سانتی متر	ارتفاع	۱۱ سانتی متر
مشخصات فضای حل در شبیه سازی عددی مطالعه حاضر			
دامنه	مقیاس شده	شناور	
طول	۴۴۰ متر	طول	۸۵ متر
عرض	۴۰ متر	عرض	۱۱/۵ متر
ارتفاع	۵۰ متر	ارتفاع	۷/۸ متر

همچنین برای کاهش حجم محاسبات و با توجه به عدم تاثیر بیش از حد بزرگ تر شدن فضای حل در پاسخ های نهایی ارتفاع و عرض دامنه مدل عددی کوچک تر اختیار گردیده است لذا باتوجه به این امر و صرفه جویی در سخت افزار و زمان محاسباتی، ابعاد دامنه فضای حل طبق (جدول ۱) اختیار گردیده است. از جهتی دیگر از آنجاکه در آزمون مدل آزمایشگاهی محدودیت هایی برای شکل گیری لایه های مرزی بر روی مدل نسبت به جایگیری مدل در تونل باد برقرار است و این محدودیت ها در نرم افزار حاکم نیست، بعد طولی دامنه به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است.

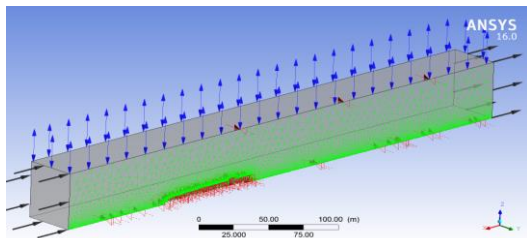
### ۳-۲- مدل سازی شناور کانتینر پست پاناماکس و سیستم مختصات

برای بررسی نیروی باد بر روی شناور کانتینر با توجه به چیدمان بارهای روی عرشه قسمت های بدنه کشتی بالای آبخور، روسازه، عرشه عقبی و جلویی و کانتینرهای بارگیری شده روی عرشه در مدل سازی در نظر گرفته شده است (سائز

از شرط مرزی دیواره در مرزهایی که سیال توسط یک جامد محصور می گردد، استفاده شده است. در این تحقیق بدلیل آنکه بررسی دو فازی مدنظر نبوده، سطح دریا همانند شرایط تونل باد جامد در نظر گرفته می شود با این تفاوت که در شرایط واقعی در هنگام وزش باد سطح دریا هم دارای سرعت می شود، لذا سطح دریا دارای تنش برشی با سرعت باد در نظر گرفته شده است. البته با توجه به آنکه محل برخورد سیال با سطح در نزدیکی شناور از اهمیت بیشتری برخوردار است تراکم شبکه در آن منطقه رشد بیشتری دارد. از طرفی دیواره دور جامد بدون تنش در نظر گرفته شده است چرا که از مرکز جریان فاصله زیادی دارد و حل معادلات در آن تقریباً بی تاثیر است. در نظر گرفتن فاکتور  $y^+$  در دیواره ها با کاهش حجم محاسبات شکل جریان را تقویت نموده است. برای دیواره جانبی فضای حل از این شرط مرزی استفاده شده است چرا که می توان صفحه تقارن را به صورت یک دیواره بدون تنش برشی نیز فرض نمود. لازم به ذکر است فضای حل مساله به اندازه ای بزرگ در نظر گرفته شده است تا تاثیرات شرایط مرزی جانبی روی شناور را به حداقل ممکن برساند.

#### ۲-۵- همگرایی

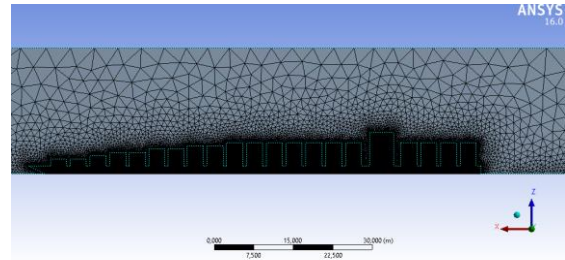
برای رسیدن به محدوده مناسب همگرایی، با توجه به امکانات سخت افزاری و قابلیت نرم افزار تعداد حل حداقل ۱۰ مرتبه و حداکثر ۵۰ مرتبه در نظر گرفته شده است با عطف به اینکه زمانی حل معادلات متوقف می شود که اختلاف باقی مانده های عددی به  $0/0001$  برسد که این میزان ارایه شده به نرم افزار، محدوده همگرایی حل معادلات را لحاظ می کند (شکل ۶ را ببینید).



شکل ۵- تصویر برقراری شرایط مرزی در حوزه دامنه

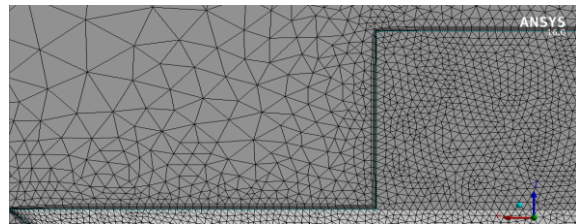
#### حل نرم افزار

Figure 5. Boundary conditions



شکل ۳- نحوه توزیع شبکه بندی شناور و دامنه حل

Figure. 3. Meshing and mesh regions



شکل ۴- افزایش تراکم شبکه بندی در سطح شناور و

#### کانترینرها

Figure 4. Mesh refinement over the ship surface

#### ۲-۴- شرایط مرزی

هدف از تعریف شرایط مرزی در دینامیک سیالات عددی، مقید ساختن فرم گسسته معادلات برای حل آن در یک چار چوب خاص و نیز تعریف ویژگی جریان در مرزهای دامنه محاسباتی می باشد. به همین منظور شرایط مرزی مسئله بدین صورت در نظر گرفته شده است که پروفیل سرعت به عنوان شرط مرزی ورودی می باشد (شکل ۵). برای نزدیک تر نمودن شرایط به شرایط طبیعی، سرعت  $12/85$  متر بر ثانیه که برابر  $25$  گره دریایی (معادل  $Force\ 6$  بیفورت می باشد)، در نظر گرفته شده است. البته برای مدل شبیه سازی شده تونل باد  $45$  متر بر ثانیه معادل با رینولدز  $2,200,000$  در نظر گرفته شده است که نتایج برای مقایسه بی بعد گردیده اند. برای قسمت خروجی دامنه شرط مرزی خروجی فشار استاتیکی در نظر گرفته شده است که از این شرط برای تعیین میانگین فشار استاتیک و سایر متغیرهای اسکالر جریان در مرز خروجی استفاده شده است. استفاده از این شرط مرزی بجای شرط مرزی جریان خروجی، اغلب موجب بهتر شدن نرخ همگرایی در زمانی که جریان برگشتی در طول مراحل تکرار اتفاق می افتد، می گردد. به علت تقارن شکل شناور و کاهش حجم محاسبات از شرط مرزی تقارن برای شناور و کل دامنه حل نسبت به صفحه  $xz$  استفاده شده است.

حجم حمل کشتی های کانتینربر به ابعاد متفاوت حمل، کشتی های با ابعاد بزرگ بیشتر میان دوندن رفت و آمد دارند.

- کانتینرها باید طوری روی عرشه جلویی چیده شوند که حداقل دوبرابر طول کشتی از پل فرماندهی محدوده دیدبانی ایجاد نمایند.

برای زاویه حمله صفر درجه که به منزله باد روبرو از کشتی یا مقاومت هوا درمقابل حرکت کشتی می باشد کانتورهای جریان هوا و سرعت جریان عبوری از روی مدل ها با چیدمان های متفاوت بررسی شده است. مسئله ای که دراین قسمت از ارزش مطالعاتی بسیاری برخوردار است نحوه جدایش جریان و شکل-گیری گردابه ها حول شناور کانتینربرد چیدمان های مختلف دراین مطالعه به صورت انحصاری مورد بررسی قرار گرفته است.

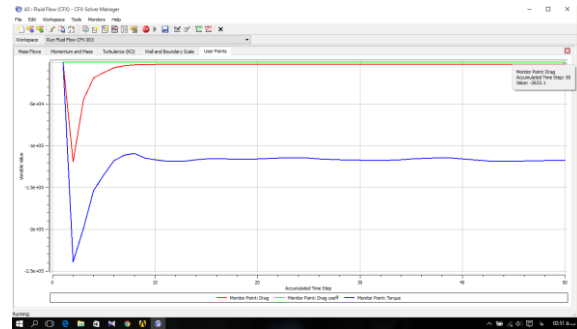
#### ۴- نتایج تحلیل آیرودینامیک شناور کانتینربر،

##### کانتورهای فشار استاتیکی و خطوط جریان سرعت

در ادامه، بدلیل محدودیت صفحات این مقاله، به صورت موردی حالات ۱، ۴ و ۷ بارگذاری بر اساس شماره بندی جدول ۲ که در انتهای مقاله ارایه شده تشریح می گردند.

##### ۴-۱- بارگیری کامل کانتینرها

دراین حالت عرشه با حداکثر ظرفیت ممکن بارگیری شده است. در شکل (۷) مشاهده می شود که کانتورهای فشار در قسمت جلوی شناور در برخورد اولیه با کانتینرها بیشترین مقدار را تجربه می نماید. به خصوص این میزان در گوشه های بیرونی آخرین ردیف کانتینر حداکثری است. از آنجاکه مقطع عرضی به صورت مستقیم با باد برخورد می نماید، بیشترین فشار دراین مناطق تجربه می شود که انتظار میرود سرعت جریان در این قسمت ها حداقلی باشد. اما این بدان معنی نیست که از نیروی باد کاسته شده و مجدداً شاهد چنین افزایش فشاری در طول شناور نباشیم. کمترین فشار بر بالای کانتینرها اتفاق می افتد که شاهد افزایش سرعت باد دراین مناطق هستیم (شکل ۸ را ببینید). مشاهده می شود که در قسمت پاشنه کشتی سرعت جریان کاهش یافته و گردابه بزرگی شکل گرفته است. علاوه براین موضوع شکل همگن کانتینرها از شکل گیری گردابه



شکل ۶- همگرایی درگ و ضریب درگ

Figure 6. Convergence of drag coefficient

#### ۶-۲- بی بعد سازی نتایج حل

برای استقلال نتایج از سایز کشتی و سرعت باد نتایج بدست آمده بی بعد گردیده اند. جواب ها به وسیله فرمول زیر که از ثابت طولی استفاده می نماید نرمال شده اند که در آن  $\rho$  چگالی هوا  $U$  سرعت باد و  $L_{pp}$  طول بین دو عمود می باشد. همچنین شکل بی بعدسازی کمک می نماید تا نتایج برای شناوری باسایز و سرعت جریان متفاوت قابل استفاده باشد.

$$\hat{X} = \frac{X}{1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L_{pp}^2} \quad (1)$$

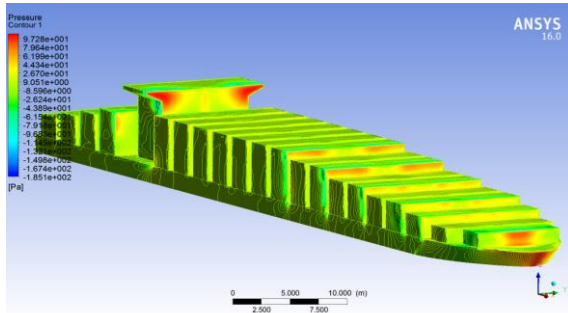
#### ۳- انواع چیدمان های مورد مطالعه

تعداد ۱۰ چیدمان مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند که جزئیات چیدمان ها و ظرفیت بارگیری آن ها به تفصیل در بخش ضمیمه آورده شده است. به صورت کلی حالات مورد بررسی در چند گروه قرار میگیرند. گروه اول شامل مدل های چیدمان منظم می باشد. گروه دوم مدل های خط جریان سازی شده را در بر می گیرد و نهایتاً در گروه سوم مدل های چیدمان نامنظم قرار گرفته اند. البته به صورت کلی عواملی می تواند موجب تاثیر در نوع بارگیری کانتینرها روی عرشه درهنگام بارگیری شوند از قبیل (۱۲):

- کانتینرهای مختص به کالاهای خطرناک باید جداسازی شوند.
- کانتینرهای حامل مواد فاسد شدنی باید به منبع تغذیه اتصال پیدا نمایند.
- کانتینرها براساس نوبت رسیدن به بندر تخلیه، بارگیری شوند. البته امروزه با توجه به تقسیم بندی



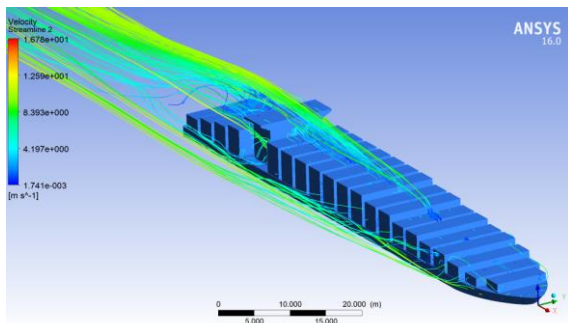
و کاهش درگ بسیار موثر است. از طرفی افزایش ارتفاع ردیف کانترینرها در عرشه عقبی، شکل گیری گردابه های بزرگ را حداقلی می نماید. کاهش سرعت در دنباله جریان نیز حداقلی است. این حالت مطلوب ترین چیدمان آیرودینامیکی می باشد.



شکل ۹- کانتورهای فشار در حالت خط جریان سازی

چیدمان در عرشه جلویی و عقبی

Figure 9. Pressure contours for a streamlined cargo at the fore and aft deck



شکل ۱۰- تصویر خطوط جریان از روی شناور

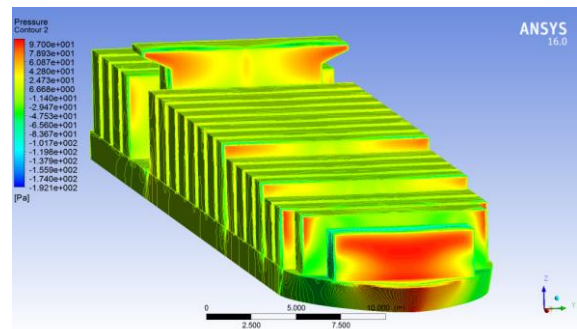
Figure 10. Flow Streamlines for the cargo case of

Figure 9

### ۴-۳- چیدمان نامنظم با حداکثر ارتفاع هفت کانترینر

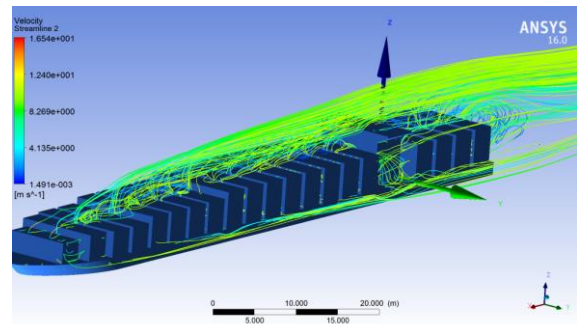
در این مدل چیدمان، تغییر متعدد و نامنظم ارتفاع کانترینرها در ردیف های مختلف در طول کشتی سبب افزایش سطح مقطع تحت تاثیر باد در طول کشتی می گردد که متعاقباً باعث افزایش نواحی پرفشار در جلوی کانترینرها و به خصوص گوشه های ردیف بالایی که بیشتر در معرض جریان باد حول شناور قرار دارند می گردد (شکل ۱۱). افزایش تعداد گردابه ها در نواحی تغییر ارتفاع اتفاق می افتد (شکل ۱۲). مضافاً روی کانترینرها در ردیف های مرتفع تر نواحی پرفشار را تجربه می کنند که کاهش سرعت را در پی دارد. از آن جایی که شکل چیدمان کانترینرها ناهمگن است سبب کاهش و افزایش مداوم

جریان در طول چیدمان روی عرشه جلوگیری می نماید که این موضوع برای کاهش درگ مطلوب است.



شکل ۷- کانتورهای فشار در حالت چیدمان کامل

Figure 7. Pressure contours in a full load state



شکل ۸- تصویر خطوط جریان از روی شناور

Figure 8. Flow streamlines around the vessel

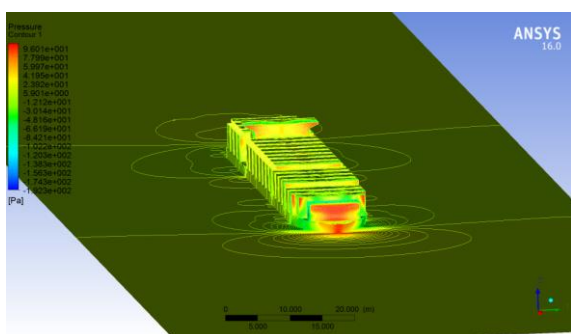
### ۴-۲- خط جریان سازی شده ی کامل در کل عرشه

در این حالت با توجه به افزایش تدریجی ارتفاع کانترینرها می بینیم که افزایش فشار برخورد باد با کانترینرها در طول عرشه توزیع شده است و این مقدار نسبت به دیگر حالات حداقلی می باشد (شکل ۹). در مقابل کاهش فشار بر روی کانترینرها نیز در طول عرشه توزیع شده است که نشان می دهد سرعت باد بر روی کانترینرها به تدریج افزایش یافته است (شکل ۱۰). کاهش تدریجی ارتفاع کانترینرها در عرشه عقبی نیز از تشکیل گردابه ها جلوگیری نموده است که این حالت باعث بهینه تر شدن شکل آیرودینامیک شناور می شود. اغتشاش جریان و تشکیل گردابه ها در این حالت حداقلی می باشد. به خاطر کاهش تدریجی ارتفاع کانترینرها به سمت جلوی شناور اولین کاهش سرعت جریان در ردیف های میانی کانترینرهای روی عرشه جلویی اتفاق می افتد. این موضوع برای کاهش اغتشاش جریان

جریان می گردد که در نمودارهای حل عددی این قسمت با افزایش یکباره قابل ملاحظه درگ مشخص است (شکل ۱۴).

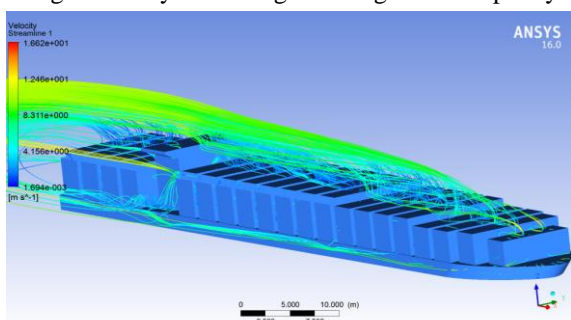
**۴-۵- جمع بندی نتایج چیدمان ها**

نتایج حل عددی بدست آمده می تواند بیانگر آن باشد که کدام مدل چیدمان میتواند مدل بهینه باشد و در کاهش مقاومت نهایی کشتی تاثیر مفیدتری به جای گذارد. از جهت دیگر نتایج بدست آمده نوعی رفتار در نتایج تغییر چیدمان کانتینرها را پیش بینی می نماید. برای مثال خالی گذاشتن ردیف ها چه تاثیری در مقاومت باد کشتی دارد که در نهایت می توان براساس آن توصیه هایی برای بارچینی عملی بهینه بدست آورد. در بخش بعد نتایج با آزمایش تونل باد مقایسه گردیده است تا دقت حل عددی بیشتر مشخص گردد.



شکل ۱۳- چیدمان هرمی ظرفیت بارگیری ۹۸٫۲٪

Figure 13. Pyramid cargo loading 98.2% capacity



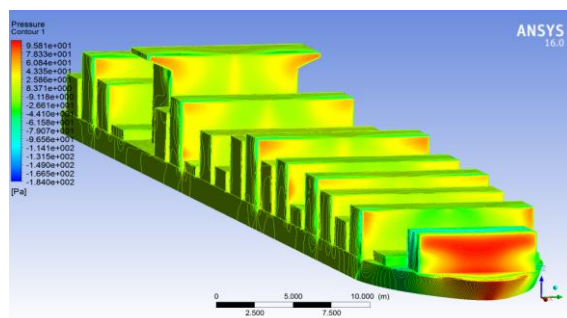
شکل ۱۴- تصویر خطوط جریان از روی شناور

Figure 14. Flow Streamlines for the cargo case of Figure 13

**۵- نتایج نیروی درگ ایرودینامیک**

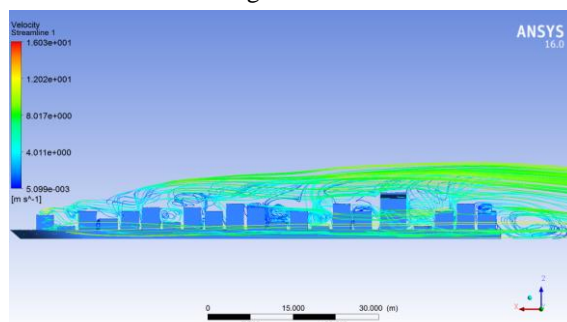
برای حل عددی از سیستم کامپیوتری با پردازش گر ۴ هسته ای core i7 با ظرفیت حافظه ۸ گیگا بایت استفاده شده است.

سرعت باد در بین ردیف ها و تشکیل گردابه ها می گردد که در جهت افزایش نیروی درگ موثر است. این حالات برای تمامی چیدمان های نامنظم صادق است و توزیع مناطق پروکم فشار از الگوئی مشابه پیروی می کند.



شکل ۱۱- چیدمان نامنظم با حدکثر ارتفاع ۷ کانتینر

Figure 11. Irregular cargo configuration with a maximum height of seven containers



شکل ۱۲- تصویر خطوط جریان از روی شناور

Figure 12. Flow Streamlines for the cargo case of Figure 11

**۴-۴- چیدمان هرمی با کسر یک کانتینر کمتر در هر طرف از ردیف بیرونی**

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود کاهش یک کانتینر از ردیف بیرونی کانتینرها تاثیر قابل ملاحظه ای در تغییر کانتورهای فشار ندارد اما از آنجاکه سطح مقطع در معرض باد در طول شناور در ردیف بیرونی که جزء مناطق با فشار محسوب می شود، کاهش نسبی یافته است در کاهش درگ تاثیرگذار بوده است. بیشترین فشار در منطقه جلوی کشتی در محل دماغه کشتی و پیرامون آن قابل مشاهده است. بزرگی سطح مقطع جلوی کشتی باعث آشفتگی شدیدی در

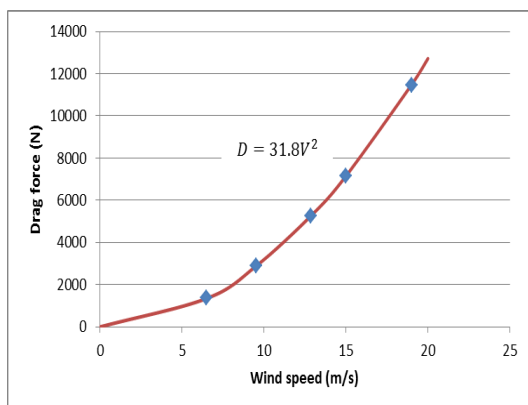
## ۲-۵- تغييرات نيروي درگ با سرعت باد

در جدول ۳ با ورودی متغیر سرعت باد در حالت چیدمان بارگیری کامل، مقادیر نیروی درگ پس از بی بعد سازی و مقادیر ضرایب درگ به عنوان خروجی حل مشخص شده اند. سرعتهای متفاوت با توجه به مقیاس بیفورت مشخص شده اند به همین منظور محدوده فورس های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ بیفورت در حل عددی به عنوان ورودی استفاده شده اند. مقدار چگالی هوا ۱/۱۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار طول بین دو عمود ۸۰ متر در نظر گرفته شده است. نتایج با استفاده از رابطه (۱) بی بعد گردیده اند و در نمودار شکل (۱۷) نمایش داده شده اند.

## جدول ۳- نتایج حل عددی برای سرعت های مختلف باد

Table 2. Numerical result for drag coefficient at different wind speeds

ضریب درگ	مقدار نیروی درگ پیش از بی بعد سازی (نیوتن)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	فورس بیفورت
۰/۶۴۲	۱۳۵۶/۹	۶/۵	۴
۰/۶۳۹	۲۸۸۳/۸	۹/۵	۵
۰/۶۳۸	۵۲۶۶/۲	۱۲/۸۵	۶
۰/۶۳۵	۷۱۴۷/۴	۱۵	۷
۰/۶۳۵	۱۱۴۶۹/۸	۱۹	۸



شکل ۱۷- نمودار نیروی درگ براساس سرعت های مختلف

Figure 17. Drag force versus wind speed

مدت زمان هر مرتبه عملکرد سیستم در مرحله شبکه بندی ۴۵ دقیقه و برای پردازش ۱۲۰ دقیقه بوده است.

## ۱-۵- صحت سنجی نتایج

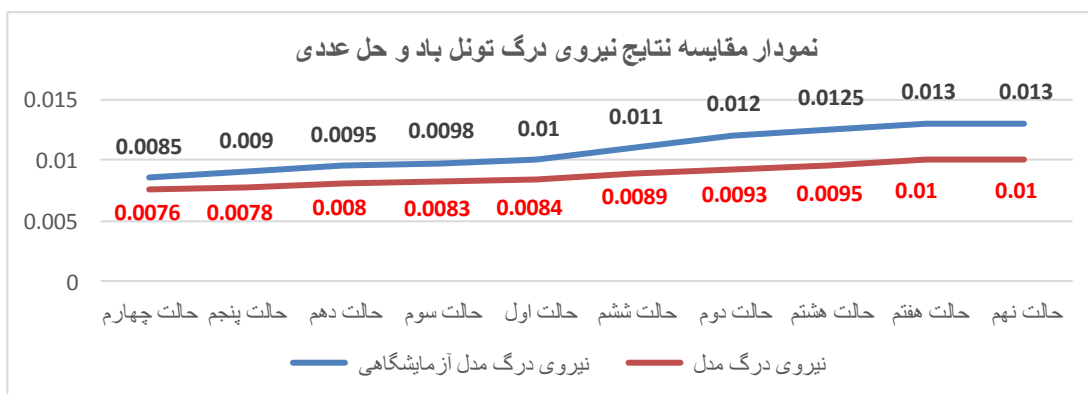
شناور مورد بررسی این تحقیق همان شناور است که در آزمایش تونل باد مورد استفاده قرار گرفته است. به همین منظور پس از حل عددی نتایج بی بعد شده اند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده اند. در این شبیه سازی از اصلاحیه ضریب بلوک تونل صرف نظر شده است (۱۱). نتایج بدست آمده در حل عددی تنها برای حالت وزش باد از روبرو برای شناور كانتینربر مورد بررسی قرار گرفته است تا نسبت پاسخ های بدست آمده از نرم افزار و تحلیل آزمایشگاهی را در یک موقعیت منحصر بفرد مشخص نماید. در حالت بارگیری کامل مشاهده می شود که مقدار درگ بدست آمده از حل عددی نرم افزار برابر با ۵۲۶۶/۲ نیوتن است که پس از بی بعد سازی برابر با ۰/۰۸۴ می گردد. در حالی که مقدار درگ بدست آمده از آزمایش تونل باد پس از بی بعد سازی برابر با ۰/۰۱ می باشد که نشانگر قابل اتکا بودن نسبی نتایج حل عددی می باشد. از جهت دیگر پس از حل حالات مختلف چیدمان مقدار درگ های بدست آمده پس از بی بعد سازی با نتایج آزمون تونل باد تقریباً با همین نسبت برقرار است و از جهت مقایسه حالات چیدمان هم خوانی و مطابقت مناسبی دارد که در نمودار شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

برای ایجاد دقت بیشتر در صحت سنجی نتایج حل عددی، مقادیر ضرایب درگ بدست آمده با محدوده نرمال ضریب درگ کشتی های كانتینربر که می باید در محدوده ۰/۵۵ تا ۰/۸ باشد مقایسه گردیده است (۲). این مقادیر برای نصف مدل بدست آمده است به همین خاطر دوبرابر گردیده است و در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. این مقایسه نتایج را از درجه اهمیت کاملاً تضمین می کند زیرا از منبعی دیگر برای مقایسه نتایج حل عددی استفاده می شود و صحت نتایج اعتبار ویژه ای می یابد. به صورت کلی مقایسه نتایج حل عددی با آزمون تونل باد در سرعت های مختلف کمتر از ۲۰٪ اختلاف دارد که نشانگر قابل اتکا بودن نسبی نتایج حل عددی می باشد.

۶- تحلیل تاثیر چیدمان بهینه در کاهش مصرف سوخت و آلاینده های محیطی

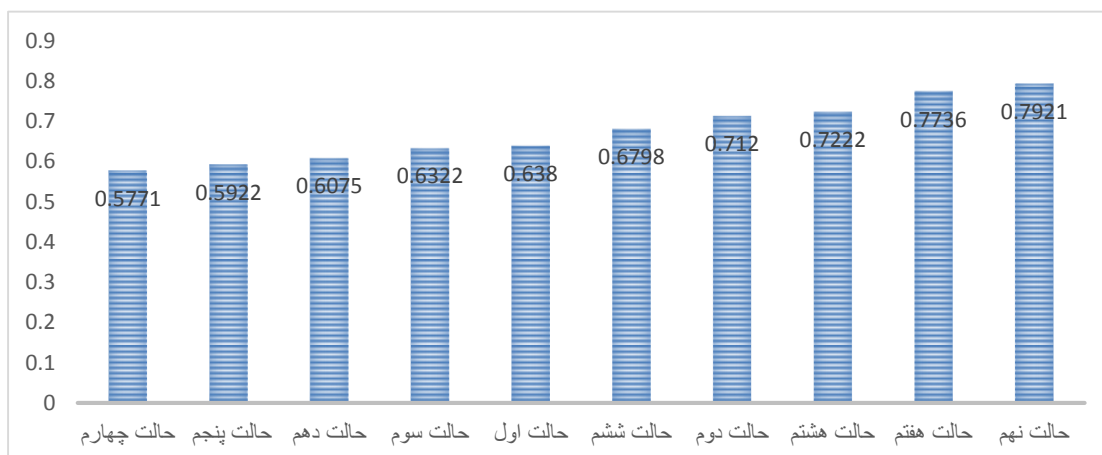
همان طور که مشاهده شد با تغییر شکل چیدمان کانتینرهای روی عرشه میزان مقاومت باد و در نتیجه میزان مقاومت کل تغییر می کند. اختلاف نیروی درگ چیدمان نامنظم نسبت به چیدمان هرمی به عنوان یک مدل از چیدمان های بهینه ۲۰٪ می باشد که برابر ۱۳۷۶٫۸ نیوتن می باشد. برای آنکه بتوان

تاثیر این کاهش مقاومت در توان کشتی را بدست آورد در ابتدا باید مقاومت هیدرودینامیکی را بدست آورد که برای این منظور با استفاده از مقادیر پیش فرض با توجه به ابعاد آرایه شده در جدول ۱ و با روش مقاومت هالتروپ و استفاده از نرم افزار MAXSURF™ (۱۳)، مقدار مقاومت هیدرودینامیکی شناور فوق در سرعت ۲۵ مایل دریایی برابر ۷۸۱۴۳٫۸۳۰ نیوتن بدست آمد.



شکل ۱۵- نمودار ضرایب درگ حاصل از حل عددی در مقایسه با داده های آزمایش تونل باد مرجع (۸)

Figure 15. Numerical result for air resistance coefficient vs wind tunnel test data



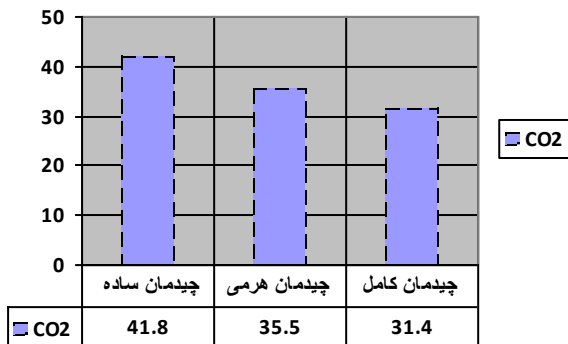
شکل ۱۶- نمودار ضرایب درگ حاصل از حل عددی

Figure 16. Numerical result for drag coefficient

که ضریب ۰/۵۱۴ برای تبدیل سرعت کشتی از گره دریایی به متر بر ثانیه استفاده شده است. کاهش این مقدار برای حالت چیدمان هرمی برابر است با  
 $1376.8 \times 25 \times 0.5114 = 17.602 \text{ Kw}$

باتوجه به مقدار مقاومت هیدرودینامیکی بدست آمده مقدار توان موثر  $P_E$  از رابطه زیر برابر است با (۱)  
 $R \times V = (78143.830 + 103.64) \times 25 \times 0.5144 = 1006.262 \text{ Kw}$  (۲)

در نمودار شکل ۱۸ نسبت حالات چیدمان در مسافت ذکر شده به میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> بررسی شده است که مشخصاً تاثیر بهینه سازی چیدمان کانتینرهای روی عرشه در جلوگیری از انتشار گاز CO<sub>2</sub> را نشان میدهد.



شکل ۱۸- نمودار ترتیبی کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن نسبت به حالت چیدمان نامنظم

Figure 18. Reduced Carbon Dioxide emissions for different loading scenarios

### نتیجه گیری

مدل یک شناور کانتینربر پست پاناما کس در نرم افزار سی اف ایکس برای مقایسه نیرو های طولی با نتایج آزمایشگاهی مدلسازی و به عنوان متغیری از تغییرات چیدمان کانتینرهای روی عرشه شبیه سازی گردید. به طور کلی نتایج تغییرات چیدمان کانتینر بر روی شناور پست پاناما کس در جهت بهینه سازی چیدمان تحت وزش باد از روبرو را می توان در موارد زیر جمع بندی نمود.

هرگونه تغییر در چیدمان کانتینرها بر روی عرشه کشتی بر نیروی درگ تاثیر مستقیم دارد و بیش از آنکه نیروی درگ وابسته به شکل مقطع عرضی شناور باشد وابسته به سطح طولی از شناور است که باد به آن برخورد دارد.

با مقایسه اختلاف نیروی درگ حالت ساده سازی شده کامل با بارگیری کامل عرشه ۹/۵٪ با حالت های عرشه خالی ۱۸،۲٪ و حالات نامنظم که بالای ۲۴٪ می باشند میتوان نتیجه گرفت که هر کدام از ردیف های خالی باعث آشفته گی جریان و افزایش نیروی درگ می شوند که حتی الامکان می باید از خالی

که تقریباً ۱/۸ درصد توان کل را در برمی گیرد. برای یک مسیر کانتینری معمولی بین بندرعباس و بندر چنای هند ۲۳۵۱ مایل دریایی (۱۴) مقدار سوخت مورد نیاز از قرار ذیل خواهد بود (۹):

$$\text{Fuel required for 1000 miles} = S \times P_B \times D / V \quad (3)$$

در رابطه (۳) داریم:

S = مصرف سوخت

D = فاصله به مایل دریایی

V = سرعت کشتی به مایل دریایی

P<sub>B</sub> = توان موتور

$$\text{Fuel Consumption} = 230 \text{ kg/Mwh}$$

$$= (230 \times 2351 \times 1006.262) / 25 = 217.646 \text{ Metric tones.}$$

حال میزان کاهش مصرف سوخت در حالت چیدمان هرمی نسبت به حالت چیدمان نامنظم برابر خواهد بود با:

$$230 \times 17.602 \times 2351 / 25 = 3.807 \text{ Metric tones.}$$

که برای حالت چیدمان هرمی مقدار کاهش مصرف سوخت در طول مسیر ذکر شده برابر ۱/۸ درصد در مصرف سوخت خواهد بود و در نتیجه میزان کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن به محیط برابر خواهد بود با

$$8.873 \text{ Mt} = \text{kg } 0.136 / 317 \times 3.807 \times 1 \quad (4)$$

مقدار انتشار ۸/۸۷۳ تن برای شناور ابعاد شده و نهایتاً ۳۵/۵ تن برای شناور با ابعاد واقعی در کل مسیر می باشد. همان طور که مشخص است کاهش مقاومت باد بطور موثری در کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گرم کننده جو تاثیر دارد. باتوجه به آنکه دوره تعمیرات اساسی موتورهای اصلی اینگونه شناورها ۲۰۰۰۰ ساعت می باشد می توان گفت با بهینه سازی چیدمان کانتینرهای روی عرشه می توان از انتشار حجم بسیار بالایی از گاز CO<sub>2</sub> به اتمسفر جلوگیری نمود.

مساوی در ارتفاع، بارگیری شوند تا آنکه به صورت نامنظم بارگیری شوند. این موضوع باعث کاهش چشمگیر درگ خواهد شد.

نهایتاً بهتر است تا جای ممکن شناورها در شکل کلی بشکل همگن بارگیری شوند تا مقاومت باد کاهش یابد.

توصیه می شود که برای کاهش نیروی درگ و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و صدور آلاینده ها زیست محیطی در بارچینی کشتی های کانتینری تا جای ممکن از خالی گذاشتن و چیدمان نامتوازن کانتینرها روی عرشه جلوگیری شود. همچنین برای کاهش نیروی درگ در دریانوردی، تا جای ممکن چیدمان کانتینرها چه در عرشه جلویی و چه در عرشه عقبی به حالت خط جریان سازی شده نزدیک تر گردد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از آقای علیرضا آقاجانی در ارتباط با آموزش نرم افزار انسیس سی اف ایکس و همچنین از کمک های خانم فاطمه السادات میرفصیح در نگارش متن این تحقیق مراتب سپاسگزاری خود را اعلام می کنند.

#### Reference

1. Moonesun, M. Principles of Naval Architecture, Kanoon Pajouhesh Publishing, Esfahan, 2009 (In Persian).
2. MINSAAS, K., AND STEEN, S. 2008 Ship resistance, Proceedings, Lecture notes, Naval Hydrodynamics, Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway, March 2008.
3. ANDERSSON, G.O. 1978. "Investigation of the drive losses by wind and waves at a rapid screwing container ship." Federal Ministry for Research and Technology, Ocean Engineering.
4. BERLEKOM, W. B. van. "Wind Forces on Modern Ship Forms -Effects

گذاشتن هر کدام از آن ها در هنگام بارگیری و دریانوردی جلوگیری نمود. نتیجتاً چیدمان نامنظم کانتینرها در طول کشتی میزان درگ را افزایش میدهد.

از مقایسه اختلاف نیروی درگ در حالت ساده سازی شده کامل و با حالت بارگیری کامل در عرشه عقب و ساده سازی شده در عرشه جلو ۲,۶٪ و همچنین مقایسه اختلاف نیروی درگ در چیدمان نامنظم با بارگیری کامل در عرشه عقب و چیدمان نامنظم با حداکثر ارتفاع ۵ کانتینر ۵٪، مشخص میشود که تغییر چیدمان کانتینرها بر روی عرشه عقبی سبب افزایش نیروی درگ گردیده است. با توجه به نتایج شکل چیدمان کانتینرها بر روی عرشه جلویی از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار است اما این موضوع به معنی بی اهمیت بودن شکل چیدمان کانتینرها بر روی عرشه عقبی نیست.

چیدمان ساده سازی شده عرشه عقب و جلو (حالت چهارم)، از لحاظ نیروی درگ بهینه ترین حالت است.

از بین ده حالت بررسی شده اختلاف نیروی درگ در حالت ساده سازی شده کامل نسبت به بارگیری کامل کل عرشه که به عنوان حالت مرجع در نظر گرفته شد، ۱۰٪ است. همچنین اختلاف نیروی درگ چیدمان ساده سازی شده کامل به عنوان بهینه ترین حالت با حالت بارگیری کامل در عرشه عقب و ساده سازی شده در عرشه جلو ۲,۶٪ می باشد که کمترین اختلاف را از میان کل مدل های چیدمان با حالت بهینه دارد. همچنین این اختلاف با حالت چیدمان هر می ۵٪ می باشد که به نظر میرسد به صورت کلی این سه چیدمان مطلوبترین حالت های چیدمانی برای کاهش درگ باشند. از طرفی اختلاف نیروی درگ چیدمان ساده سازی شده کامل با حالت نامنظم با حداکثر ارتفاع ۵ کانتینری ۲۴٪ و با حالت نامنظم با حداکثر ارتفاع ۷ کانتینر ۱۹٪ می باشد که نشان میدهد این حالتها نامطلوب ترین نوع چیدمان در جهت کاهش نیروی درگ می باشد.

اختلاف حالت چیدمان حالت ساده سازی شده کامل با یک دریانی ۱۴,۶٪ و با حالت های چیدمان نامنظم حدود ۲۴٪ است که این موضوع نشان میدهد برای بارگیری شناور کانتینر حتی امکان باید کانتینرها در ردیف ها با تعداد

- Power Optimization of a Container Ship.
10. "Container sizes". Shipsbusiness.com. Retrieved 1 February 2013.
  11. Numerical Simulation of the Blockage Effect in Wind-Tunnels. Marek Maciejewski. Wojciech Osmolski. Poland.
  12. Safety of Life at Sea Convention (2012). SOLAS. IMO. London Maritime Arbiters Association.
  13. MAXSURF Resistance: Wake and Power Prediction. <http://www.maxsurf.net/resistance.htm> 1. Last visited in October 2016.
  14. Www.sea-see.com. last visited in October 2016.
  5. AAGE, C "Wind power in Ships." Department of Ship and Marine Technology, Technical University of Denmark, 1968.
  6. BLENDERMANN, W. Measurement of wind load on two container vessels in the real state of charge in the wind tunnel. Institute of Naval University of Hamburg. 1997
  7. Ingrid Marie Vincent Andersen, Wind Force on Container Ship DTU Publication (2012).
  8. Ingrid Marie Vincent Andersen, Wind-Tunnel Investigation of Wind Loads on a Post-Panamax Container Ship as a Function of the Container Configuration on Deck.
  9. Khairul Hassan, Maurice F. White & Cosmin Ciortan (2012) Effect of Container Stack Arrangement on the on Performance." Swedish Maritime Research Centre, 1981.