



موسسه رده بندی ایران

واحد تحقیق و توسعه

# سوخت‌های جایگزین دریایی تحقیق

نگارش

نام و نام خانوادگی کامل نویسنده

ماه و سال

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۲	۱ سوخت LNG
۳	۱-۱ کلیات
۴	۲-۱ اثرات زیست محیطی و ایمنی
۴	۱-۲-۱ تأثیرات مثبت
۴	۲-۲-۱ تأثیرات منفی
۴	۳-۱ تکنولوژی تولید
۴	۱-۳-۱ مرحله اول، پیش تصفیه سازی
۵	۲-۳-۱ مرحله حذف هیدروکربن های سنگین
۶	۳-۳-۱ مرحله مایع سازی
۶	۴-۱ تکنولوژی استفاده در کشتی
۷	۱-۴-۱ الزامات قانونی
۷	۵-۱ بررسی اقتصادی LNG
۷	۱-۵-۱ قیمت
۸	۲-۵-۱ هزینه های اولیه
۸	۳-۵-۱ هزینه های ثانویه (عملیاتی)
۹	۴-۵-۱ میزان تولید، زیرساخت ها و میزان دسترسی
۹	۶-۱ وضعیت ایران
۹	۱-۶-۱ تاریخچه تولید LNG در ایران
۱۰	۲-۶-۱ پیش بینی تقریبی از آینده
۱۱	۷-۱ نتیجه گیری
۱۲	۲ سوخت LPG
۱۳	۱-۲ مقدمه و اهمیت LPG در حمل و نقل دریایی
۱۵	۲-۲ اثرات زیست محیطی
۱۵	۳-۲ تکنولوژی های مرتبط با LPG
۱۵	۱-۳-۲ تکنولوژی تولید
۱۵	۲-۳-۲ تکنولوژی استفاده در کشتی
۱۵	۳-۳-۲ ایمنی و الزامات فنی
۱۵	۱-۳-۳-۲ سنگینی نسبت به هوا
۱۶	۲-۳-۳-۲ مخلوط قابل اشتعال با هوا
۱۶	۳-۳-۳-۲ تأثیرات استنشاق در غلظت های بالا
۱۶	۴-۳-۳-۲ سوختگی های ناشی از مایع

۱۶	۵-۳-۳-۲ احتراق مخلوط بخار/هوا در اثر نشت
۱۶	۶-۳-۳-۲ خطرات مخازن خالی
۱۶	۴-۳-۲ سیستم‌های ذخیره‌سازی و مدیریت LPG در کشتی‌ها
۱۷	۵-۳-۲ ایمنی و الزامات فنی مرتبط با حمل
۱۷	۱-۵-۳-۲ مرحله قبل از سوخت‌گیری
۱۸	۶-۳-۲ مرحله سوخت‌گیری
۱۹	۷-۳-۲ پس از سوخت‌گیری
۱۹	۴-۲ الزامات قانونی
۱۹	۱-۴-۲ کد IGC
۱۹	۲-۴-۲ کد IGF
۲۰	۳-۴-۲ استاندارد MSC.1/Circ.1666
۲۰	۴-۴-۲ استاندارد MSC.1/Circ.1679
۲۰	۵-۲ اقتصاد و بازار LPG
۲۰	۱-۵-۲ چرخه عمر
۲۰	۲-۵-۲ تجارت جهانی
۲۱	۳-۵-۲ قیمت سوخت
۲۲	۴-۵-۲ تأمین و نگهداری
۲۲	۶-۲ نتیجه‌گیری
۲۴	۳ مقررات و استانداردها
۲۵	۴ فصل چهارم
۲۶	۵ پیشینه تحقیق
۲۸	کتاب‌نامه
۲۹	پیوست
۳۰	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی
۳۱	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

شکل	فهرست تصاویر	صفحه
۱-۱	انواع سوخت	۳
۲-۱	تکنولوژی تولید	۵
۳-۱	تکنولوژی استفاده در کشتی	۶
۴-۱	جمع بندی	۱۱
۱-۲	زنجیره تأمین سوخت	۲۰
۲-۲	درخواست LPG	۲۱
۳-۲	قیمت سوخت در خلیج فارس	۲۲

صفحه	جدول	فهرست جداول
۱۵	۱-۲ مشخصات سوخت LPG	.....

## فهرست نمادها

مفهوم

نماد

فضای اقلیدسی با بعد  $n$

$\mathbb{R}^n$





# فصل اول

## سوخت LNG

## ۱-۱ کلیات

گاز طبیعی مایع یا ال ان جی<sup>۱</sup> به گاز طبیعی ای گفته می شود که موقتاً برای ذخیره سازی یا ترابری در حجم بالا، به حالت مایع تبدیل شده است.

ال ان جی، بیشتر شامل متان<sup>۲</sup> و مقادیر اندکی اتان، پروپان، بوتان و برخی از آلکان های سنگین دیگر می باشد. البته در مواردی خاص، فرایند پالایش ال ان جی، می تواند به نحوی طراحی شود، که محصول پایانی تولید شده شامل ۱۰۰ درصد متان باشد. LNG به عنوان پاک ترین سوخت فسیلی شناخته شده و اقبال به استفاده از این سوخت رو به افزایش است طوری که طبق آمار شناورهای سفارش داده شده برای ساخت در سال ۲۰۱۹، حدود ۱۷٪ از این شناورها (بر حسب تناژ) از سوخت LNG بهره مند خواهند شد. ال ان جی حجمی معادل یک شش صدم حجم گاز طبیعی در حالت گازی را دارا بوده و محلولی بی بو، بی رنگ، غیر سمی و غیر خورنده است. این سوخت دارای چگالی کمتری در مقایسه با سوخت های رایج بوده و به همین دلیل برای ذخیره سازی نیاز به مخازن بزرگتری دارد.

Fuel Type	Energy MJ/kg	Sulfur content
IFO 380 <sup>6</sup>	40.6	3.5%
LSHFO 380 <sup>7</sup>	40.6	1% or 1.5%
MDO	42.7	0.2 %
MGO	42.7	0.1% - 0.05%
LNG	49.2-49.5	0%

شکل ۱-۱: انواع سوخت

<sup>1</sup> Liquefied Natural Gas

<sup>2</sup> (CH<sub>4</sub>)

## ۲-۱ اثرات زیست محیطی و ایمنی

### ۱-۲-۱ تأثیرات مثبت

۱. کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO<sub>2</sub>) به دلیل نسبت بالای هیدروژن به کربن در مقایسه با سایر سوخت‌ها

۲. کاهش ۱۰۰ درصدی انتشار اکسیدهای گوگرد (SO<sub>x</sub>) در مقایسه با سوخت‌های فعلی

۳. کاهش بالای ۹۰ درصدی انتشار اکسیدهای نیتروژن (NO<sub>x</sub>) در مقایسه با سوخت‌های فعلی

۴. کاهش ۱۰۰ درصدی انتشار ذرات معلق (PM) در مقایسه با سوخت‌های فعلی

### ۲-۲-۱ تأثیرات منفی

۱. تأثیرات زیست محیطی هنگام استخراج، فراوری، حمل، ذخیره سازی و مصرف نهایی LNG

۲. احتمال نشت متان<sup>۳</sup> در موتور شناور به ویژه در فرایندهای احتراق ناقص که بعضاً اثرات گلخانه‌ای شدیدتری نسبت به دی اکسید کربن خواهد داشت.

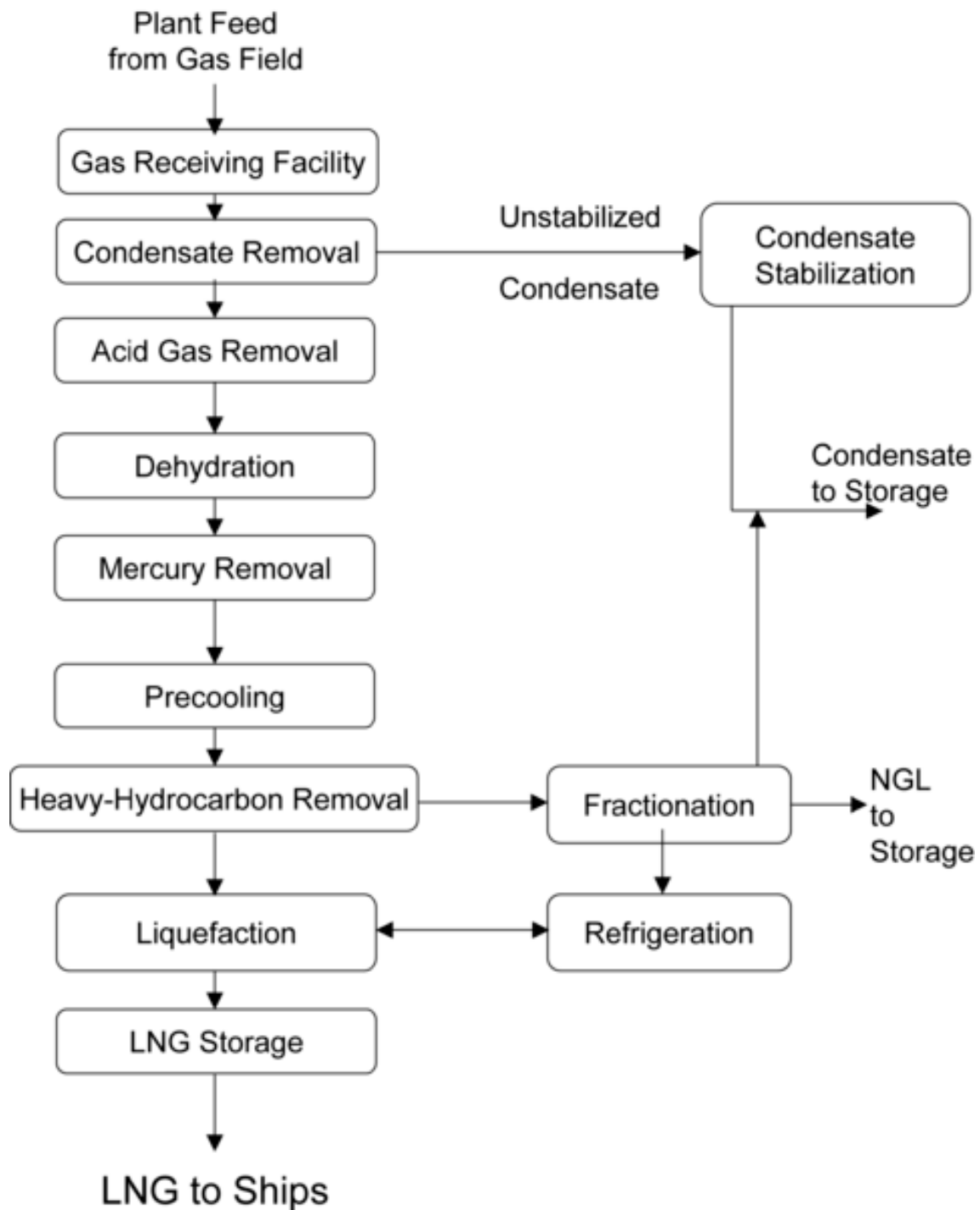
۳. احتمال نشت سوخت مایع در آب دریا و تبخیر منجر به آلودگی هوا

## ۳-۱ تکنولوژی تولید

### ۱-۳-۱ مرحله اول، پیش تصفیه سازی

ابتدا خوراک گاز طبیعی در واحد زدایش گازهای اسیدی از میان فیلترها عبور نموده و گازهای اسیدی مانند CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S با استفاده از یک محلول آمین اختصاصی در ستون جذب جدا می‌شوند. سپس واحد آب زدایی گاز طبیعی را تا مقدار مجاز کمتر از ۱۰ ppm از آب خشک نموده و جریان در ادامه مسیر خود وارد واحد جیوه زدایی می‌شود. زیرا برای ورود خوراک به واحد مایع سازی باید کمترین میزان جیوه نیز از این ترکیب حذف گردد.

<sup>3</sup>Methane Slip



شکل ۱-۲: تکنولوژی تولید

### ۱-۳-۲ مرحله حذف هیدروکربن های سنگین

پس از یک مرحله خنک سازی ابتدایی با آمونیاک به عنوان مبرد (تا دمای ۸- درجه سانتیگراد)، حذف هیدروکربن های سنگین مانند پنتان و بنزن از خوراک گازی صورت می گیرد. مقدار مجاز این مواد برای

جلوگیری از یخ زدگی خوراک در واحد پایین دستی کمتر از ۱ ppm است.

### ۳-۳-۱ مرحله مایع سازی

در این مرحله گاز ورودی توسط سیستم‌های تبرید تحت فشار از دمای ۸- درجه سانتی به ۱۶۲- سانتی گراد خنک گردیده و تبدیل به مایع می شود. در انتها گاز طبیعی مایع شده به مخازن نگهداری ارسال می شود. در بازارهای مصرف، LNG دوباره به حالت گاز در می آید.

### ۴-۱ تکنولوژی استفاده در کشتی

Converter	ICE 4-stroke Lean Burn Spark Ignition / Dual Fuel Low Pressure (4S LBSI/LPDF)	ICE 2-stroke Dual Fuel Low Pressure (2S LPDF)	ICE 2-stroke Dual Fuel High Pressure (2S HPDF)	FC
Components	Engine Storage tanks Process system	Engine Storage tanks Process system	Engine Storage tanks Process system NOx reduction system (EGR/SCR)	Fuel cell Storage tanks Process system Electric propulsion system Reformer Battery
Key challenges	Methane slip for some of the ICE's Cryogenic materials needed Fuel storage tank 2-3 times larger than for petroleum-based fuels			

شکل ۳-۱: تکنولوژی استفاده در کشتی

به طور کلی دو گزینه برای استفاده از LNG به عنوان سوخت در کشتی وجود دارد:

۱. استفاده در موتورهای احتراق داخلی (ICE)

۲. استفاده در پیل‌های سوختی (Fuel Cell)

به طور کلی سه نوع موتور برای استفاده از LNG به عنوان سوخت مورد استفاده هستند که هر سه دوگانه سوز بوده و علاوه بر LNG از سوخت‌های رایج مانند مازوت هم بهره می‌برند:

۱. موتور دو زمانه فشار پایین

۲. موتور دو زمانه فشار بالا (با احتمال انتشار NOx)

۳. موتور چهارزمانه فشار پایین

در ادامه به پیل‌های سوختی پرداخته خواهد شد.

## ۱-۴-۱ الزامات قانونی

علاوه بر قوانین و الزامات محیط زیستی سازمان IMO برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO<sub>2</sub>)، اکسیدهای گوگرد (SO<sub>x</sub>) و اکسید نیتروژن (NO<sub>x</sub>) که می‌تواند میزان گرایش به استفاده از سوخت‌های جایگزین مانند LNG را افزایش دهد، الزامات ایمنی کشتی‌های استفاده کننده از سوخت‌های گازی یا سوخت‌های دارای نقطه اشتعال پایین<sup>۴</sup> به طور مشخص به LNG پرداخته و نکات ایمنی برای طراحی و ساخت شناورهای مصرف کننده LNG مطرح نموده است. این الزامات شامل سه موضوع اصلی است که عبارتند از:

۱. پیشگیری از نشت سوخت

۲. پیشگیری از انفجار یا فضای سمی

۳. مقابله و کاهش اثرات انفجار

الزامات جنبه‌های دیگر مصرف LNG به عنوان سوخت دریایی مانند فرایند سوخت رسانی<sup>۵</sup> هم تا این لحظه به قوانین و مقررات داخلی کشورها واگذار گردیده است. علاوه بر IMO، اتحادیه اروپا هم الزامات محدودکننده‌ای در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌های هوا وضع نموده است<sup>۶</sup>.

## ۵-۱ بررسی اقتصادی LNG

### ۱-۵-۱ قیمت

در اکثر نقاط جهان قیمت گاز طبیعی پایین تر از قیمت نفت خام و سوخت‌های سنگین مانند مازوت است. قیمت LNG هم ارتباط مستقیمی با قیمت گاز طبیعی دارد که البته هزینه‌های مایع سازی، حمل و نقل و توزیع، ذخیره سازی و سود ذینفعان هم به آن اضافه می‌شود. در اواسط دهه گذشته میلادی (حدود سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) با اکتشاف و بهره‌برداری از منابع جدید گاز طبیعی در آمریکا و کاهش قیمت جهانی نفت خام، شاهد کاهش چشمگیر قیمت گاز طبیعی در اکثر نقاط جهان بودیم که طبیعتاً کاهش قابل توجه قیمت LNG را هم به همراه داشت. از سال ۲۰۱۶ به بعد قیمت LNG با شیب ملایمی

<sup>4</sup>(IGF Code)

<sup>5</sup>(Bunkering)

<sup>6</sup>(FuelEU Maritime)

در حال رشد بوده و پیش بینی می‌شود این روند افزایشی آرام همچنان ادامه دار باشد، هرچند درگیری نظامی روسیه و اوکراین در سال ۲۰۲۲، با ایجاد شوک اقتصادی، باعث افزایش ناگهانی قیمت گاز شد اما با گذشت چند ماه شرایط به یک ثبات نسبی رسید. در حال حاضر میزان رشد قیمت LNG در مقایسه با گازوئیل (MGO) و سوخت‌های سنگین کم سولفور کمتر بوده این روند LNG را به عنوان یک سوخت با قیمت رقابتی در بازار و یک گزینه مقرون به صرفه در آینده نزدیک مطرح می‌نماید. به ویژه که قوانین زیست محیطی سختگیرانه بعدی هم در راه خواهند بود. هم اکنون (تابستان ۲۰۲۴) قیمت LNG به ثبات نسبی رسیده و اغلب از گازوئیل پایین تر ولی همچنان از سوخت‌هایی مثل مازوت گران تر است اما با توجه به محدودیت‌های زیست محیطی مثل محدودیت سولفور نیم درصد، احتمالاً تولید و عرضه مازوت در آینده به صرفه نخواهد بود.

### ۱-۵-۲ هزینه‌های اولیه

هزینه‌های اولیه راه‌اندازی سیستم‌های LNG بر روی کشتی شامل هزینه موتور، هزینه مخازن و ذخیره سازی، هزینه سیستم‌های آماده سازی و انتقال سوخت و هزینه ارتقا سیستم‌های قبلی می‌شود. در حال حاضر هزینه‌های اولیه سیستم‌های LNG (به خصوص به دلیل حجم مخازن بزرگتر و نیاز به عایق بندی به سبب نقطه جوش پایین تر) در مقایسه با سوخت‌های رایج مانند مازوت و گازوئیل بالاتر است اما با توجه افزایش توجهات به سمت LNG و همچنین افزایش سرمایه‌گذاری و توسعه فناوری‌های مرتبط، انتظار می‌رود در سال‌های آینده شاهد کاهش نسبی این هزینه‌ها باشیم. در حال حاضر تخمین زده می‌شود که با استفاده از سوخت LNG در کشتی‌ها، متوسط هزینه‌های اولیه در حدود ۲۰ درصد افزایش پیدا کند.

### ۱-۵-۳ هزینه‌های ثانویه (عملیاتی)

در صورتی که قیمت LNG در سطح جهانی جهش ناگهانی نداشته باشد، می‌توان هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های LNG را در مقایسه با سیستم‌های سوخت‌های فعلی، برابر و یا حتی کمتر دانست. چرا که سیستم‌های LNG اغلب نیاز به سیستم‌های کاهش انتشار و اسکرابر ندارند و بازدهی و مصرف سوخت موتورهای مصرف کننده LNG (دوگانه سوز) تفاوتی با موتورهای قبلی ندارد. همچنین به دلیل پاک تر بودن سوخت LNG می‌توان انتظار داشت، هزینه‌های تعمیر و نگهداری موتورها هم در مقایسه با

سوخت‌های سنگین کمتر باشد. در ضمن در برخی بنادر به عنوان مشوق تخفیف‌هایی برای شناورهای دارای سوخت LNG در نظر می‌گیرند.

## ۴-۵-۱ میزان تولید، زیرساخت‌ها و میزان دسترسی

در ابتدای سال ۲۰۲۴، ظرفیت سالانه تولید LNG، در حدود ۱.۴۸۳ میلیون تن، تخمین زده می‌شود و با توجه به سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته در نقاط مختلف جهان، انتظار می‌رود این عدد تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۷۰۰ میلیون تن در سال برسد. همچنین تا پایان سال ۲۰۲۳، ۴۹ ترمینال فعال عرضه کننده سوخت LNG دریایی (ساحلی یا فراساحلی) در سراسر جهان در حال خدمت رسانی هستند که مجموع ظرفیت سالانه عرضه سوخت آنها حدود ۲۰۰ میلیون تن می‌باشد و حداقل ۱۷ ترمینال جدید هم در حال ساخت بوده و به زودی به این ظرفیت اضافه خواهند شد. اولین بنادری که شروع به عرضه سوخت LNG به شناورها نمودند آمستردام و روتردام هلند، فلوریدا آمریکا و بنادری در دریای شمال و دریای بالتیک بودند. اما کم کم سایر نقاط جهان مانند بنادر مدیترانه غربی، خلیج مکزیک، سنگاپور، استرالیا، چین، ژاپن، کره جنوبی و حتی بنادر کشورهای خاورمیانه مثل امارات هم سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از مراکز تامین LNG را آغاز نمودند. در حال حاضر سوخت LNG سهم کمتر از ۵ درصدی از بازار سوخت‌های دریایی دارد که احتمالاً این عدد در سالهای آینده افزایش قابل توجهی خواهد داشت. با توجه به افزایش روز افزون تولید جهانی LNG و روش‌های مختلف توزیع سوخت در سراسر جهان (حمل دریایی، زمینی و حتی ریلی) می‌توان این گونه فرض کرد که در آینده نزدیک از بابت میزان دسترسی به این سوخت چالش جدی نخواهیم داشت.

## ۶-۱ وضعیت ایران

### ۱-۶-۱ تاریخچه تولید LNG در ایران

ایران با دارا بودن دومین ذخایر بزرگ گاز طبیعی جهان، پتانسیل قابل توجهی برای تبدیل شدن به یک بازیگر کلیدی در بازار LNG جهانی را دارد. با این حال، ایران تاکنون در تولید LNG موفقیت چندانی کسب نکرده است.

۱. دهه ۱۹۷۰: اولین مطالعات برای احداث واحدهای LNG در ایران انجام شد.



۲. دهه ۱۹۹۰: به دلیل تحریم‌ها و عدم ثبات سیاسی، پیشرفت‌ها متوقف شد.

۳. دهه ۲۰۰۰: چندین پروژه LNG با مشارکت شرکت‌های خارجی آغاز شد، اما هیچکدام به بهره‌برداری نرسیدند.

۴. دهه ۲۰۱۰: ایران به دنبال توسعه مجدد پروژه‌های LNG با تمرکز بر فناوری‌های کوچک مقیاس است.

ایران در حال ساخت یک کارخانه تولید LNG با ظرفیت ۵.۱ میلیون تن در سال در عسلویه است. این کارخانه توسط یک شرکت ایرانی با هدف افزایش مصارف داخلی و همچنین صادرات احداث گردیده است. فاز اول این کارخانه شامل نیروگاه ۱۱۰۰ مگاواتی، مخازن ذخیره‌سازی LNG و LPG، و اسکله‌های دریایی است. ایران برای تولید LNG به فناوری پیشرفته‌ای نیاز دارد که ممکن است به دلیل تحریم‌ها در دسترس نباشد. ساخت واحدهای LNG نیاز به سرمایه‌گذاری عظیمی دارد. تحریم‌های بانکی و اقتصادی ایران تامین مالی پروژه‌های LNG را با مشکل مواجه می‌کند. ایران با رقابت شدیدی در بازار LNG از دیگر کشورها مانند قطر، استرالیا و ایالات متحده مواجه است. با افزایش تولید LNG در کشور، امکان عرضه آن به عنوان سوخت دریایی در بنادر ایران فراهم خواهد شد.

$$\frac{\partial s}{\partial d}$$

## ۱-۶-۲ پیش‌بینی تقریبی از آینده

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که گاز طبیعی مایع (LNG) تا سال ۲۰۳۰ به عنوان یک سوخت به صرفه در صنعت حمل و نقل دریایی باقی خواهد ماند. در حال حاضر، LNG حدود ۴.۶ درصد از سوخت‌های مورد نیاز صنعت کشتیرانی را تأمین میکند و انتظار میرود که این میزان تا سال ۲۰۳۰ به ۷.۱۰ درصد افزایش یابد. همچنین، با توجه به قوانین سختگیرانه سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از LNG به عنوان یک سوخت پاک و پایدار تشویق خواهد شد. در آینده، با توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و سوخت‌رسانی LNG، تعداد کشتیهایی که از این سوخت استفاده میکنند به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. پیش‌بینی میشود که بیش از ۱۰۰۰ فروند کشتی با سوخت LNG تا سال ۲۰۲۷ در آبهای بین‌المللی فعالیت کنند.

## ۷-۱ نتیجه‌گیری



شکل ۷-۱: جمع بندی

## فصل دوم

## سوخت LPG

## ۱-۲ مقدمه و اهمیت LPG در حمل و نقل دریایی

تا دسامبر ۲۰۲۳، تعداد ۱۶۴۴ کشتی حامل LPG (LPGC) وجود داشت که از میان آن‌ها، ۲۰۴ کشتی، بر اساس مدل موتور اصلی نصب‌شده، قابلیت تبدیل به سوخت LPG را داشتند. این تغییر امکان بهره‌برداری از محموله کشتی‌ها و زیرساخت‌های موجود را فراهم کرده و هزینه‌های عملیاتی آن‌ها را به حداقل می‌رساند. به عنوان یک سوخت LPG منحصر به فرد هست، زمانی که از کربن‌زدایی در کشتی صحبت می‌کنیم نقش مهم و در حال رشدی LPG بازی می‌کند. LPG عمدتاً از پروپان و بوتان تشکیل شده که تفاوت‌های جزئی شیمیایی آن‌ها باعث کاربردهای خاص می‌شود. LPG می‌تواند تحت فشار متوسط در دمای معمول مایع شود، که حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آن را آسان‌تر از سایر سوخت‌های گازی می‌کند. سوخت LPG به صورت مایع حمل و نگهداری می‌شود، اما به صورت گاز مصرف می‌شود، در حالیکه می‌تواند حمل و نقل دریایی تمیزتر به نسبت بسیاری از جایگزین‌های موجود در حال حاضر ارائه دهد.

سفارشات کشتی‌های با سوخت LPG رکورد شکن شده است، به طور مثال کشتی‌های VLGC 117 سفارش داده شده یا در حال ساخت با LPG حرکت می‌کنند. و پیش‌بینی می‌شود که ۸۶ درصد از این نوع کشتی‌های جدیدی که در سال‌های آینده وارد بازار می‌شوند، قابلیت کار با LPG را داشته باشند. اگرچه LPG در حال حاضر یک سوخت محبوب برای حامل‌های گاز بزرگ است، این بخش تنها ۸ درصد از آلاینده‌های حمل و نقل را به خود اختصاص می‌دهد و ۹۲ درصد آلاینده‌ها را بقیه کشتی‌ها به جا می‌گذارند. تبدیل این کشتی‌ها یک فرصت عالی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی است. جهان ما به طور فزاینده‌ای به سمت کربن کم‌تر حرکت می‌کند و همه بخش‌های اقتصاد باید به مسئله انتشار گازهای گلخانه‌ای بپردازند.

در بخش کشتیرانی، دلایل استفاده از این سوخت به شرح زیر هست:

۱. توسعه LPG به عنوان سوخت دریایی به گسترش فناوری‌های کاهش کربن وابسته است، و پیش‌بینی می‌شود، rLPG<sup>۱</sup> تا سال ۲۰۵۰ تا ۵۰ درصد تقاضای جهانی را پوشش دهد.

۲. LPG با استانداردهای زیست‌محیطی فعلی از جمله محدودیت گوگرد سازمان بین‌المللی دریانوردی IMO مطابقت دارد.

۳. LPG دارای شبکه حمل‌ونقل گسترده‌ای است که شامل بیش از ۱۶۰۰ کشتی حامل LPG و بیش از ۱۰۰۰ تأسیسات ذخیره‌سازی است.

۴. می‌تواند عملکرد زیست‌محیطی بخش کشتیرانی را به سرعت بهبود بخشد.

۵. انتشار گازهای مضر آن کم و هزینه آن، مقرون‌به‌صرفه است که به بهبود محیط‌زیست کمک می‌کند.

۶. LPG انعطاف‌پذیر است و زنجیره‌های تأمین آن در سراسر جهان موجود است، که باعث می‌شود زیرساخت‌های سوخت‌رسانی راحت‌تر از بسیاری از سوخت‌های جایگزین دیگر پیاده‌سازی شود.

۷. برای سیستم‌های پیش‌ران مبتنی بر LPG هیچ محدودیت یا مانع فناورانه‌ای وجود ندارد.

LPG به فناوری جدید یا پیشرفته نیاز ندارد و آماده بهره‌برداری است.

۸. چه برای بزرگ‌ترین کشتی‌های جهان و چه برای کوچک‌ترین موتورهای قایق، LPG امروز یک سوخت کم‌کربن و کم‌انتشار ارائه می‌دهد، و با معرفی LPG تجدیدپذیر، کربن‌زدایی کم‌هزینه در آینده امکان‌پذیر می‌شود.

<sup>۱</sup> Refrigerated Liquefied Petroleum Gas

جدول ۲-۱: مشخصات سوخت LPG

مشخصه	توضیحات
دمای جوش	۴۲- درجه (پروپان خالص) و ۰/۵- درجه (بوتان خالص)
فشار بخار	۱/۸ بار (بوتان خالص) تا ۷/۳ بار (پروپان خالص) در دمای ۱۵ درجه
چگالی	۱/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب (پروپان خالص) تا ۲/۵۴ کیلوگرم بر متر مکعب (بوتان خالص) در دمای ۱۵ درجه
حداقل انرژی احتراق	$0.25 \text{ MJ}$
چگالی انرژی حجمی	$26.5 \text{ MJ/L}$
نسبت اندازه مخزن	۱/۵

## ۲-۲ اثرات زیست محیطی

## ۳-۲ تکنولوژی‌های مرتبط با LPG

### ۱-۳-۲ تکنولوژی تولید

### ۲-۳-۲ تکنولوژی استفاده در کشتی

### ۳-۳-۲ ایمنی و الزامات فنی

ذخیره‌سازی، استفاده و حمل‌ونقل LPG خطرات بالقوه‌ای را به همراه دارد که باید در تمامی سناریوهای صنعتی کاهش یابد. در زمینه سوخت دریایی، برای مقابله با این خطرات، اجرای تدابیری در طراحی و ساخت کشتی، تنظیمات ماشین‌آلات و فناوری‌ها، فناوری‌های سوخت‌رسانی، رویه‌های داخلی کشتی و آموزش خدمه ضروری است.

#### ۱-۳-۳-۲ سنگینی نسبت به هوا

LPG به صورت گازی تقریباً دو برابر سنگین‌تر از هوا است. این ویژگی باعث می‌شود که در سطوح پایین‌تر جمع شود و خطراتی را در مکان‌های بسته یا گودال‌ها ایجاد کند. تهویه مناسب در سطوح پایین و فضاهای بسته الزامی است. همچنین استفاده از آشکارسازهای گاز در نزدیکی زمین برای شناسایی نشت گاز الزامی هست.

**۲-۳-۳-۲ مخلوط قابل اشتعال با هوا**

LPG در غلظت ۲ تا ۱۰ درصد با هوا مخلوط قابل اشتعالی تشکیل می‌دهد. در صورت ذخیره یا استفاده نادرست، خطر آتش‌سوزی و انفجار وجود دارد. دوری از منابع گرما، جرقه و شعله باز. استفاده از تجهیزات ضد انفجار در محل ذخیره یا استفاده.

**۳-۳-۳-۲ تأثیرات استنشاق در غلظت‌های بالا**

در غلظت‌های بسیار بالا، LPG می‌تواند اثرات بی‌هوشی و خفگی داشته باشد زیرا اکسیژن موجود در هوا را رقیق می‌کند. اطمینان از وجود تهویه کافی در فضاهای بسته. استفاده از ماسک‌های تنفسی مناسب در شرایط اضطراری.

**۴-۳-۳-۲ سوختگی‌های ناشی از مایع**

مایع به دلیل تبخیر سریع باعث سوختگی شدید سرد می‌شود. همچنین، تبخیر می‌تواند تجهیزات را به حدی سرد کند که خطر سوختگی را افزایش دهد. استفاده از دستکش و لباس‌های محافظ در هنگام کار با LPG مایع. عایق کاری مناسب تجهیزات برای جلوگیری از تماس مستقیم.

**۵-۳-۳-۲ احتراق مخلوط بخار/هوا در اثر نشت**

مخلوط بخار LPG و هوا می‌تواند در فاصله‌ای دورتر از نقطه نشت آتش بگیرد و شعله به منبع نشت بازگردد. بررسی منظم و رفع نشتی تجهیزات ذخیره و انتقال LPG. نصب شیرهای خودکار قطع گاز برای جلوگیری از گسترش شعله.

**۶-۳-۳-۲ خطرات مخازن خالی**

مخزن خالی LPG ممکن است همچنان حاوی بخار LPG تخلیه و تهویه کامل مخازن قبل از انجام هرگونه تعمیرات. برچسب‌گذاری مخازن برای هشدار به افراد از خطرات احتمالی.

**۴-۳-۲ سیستم‌های ذخیره‌سازی و مدیریت LPG در کشتی‌ها**

سوخت‌رسانی LPG به کشتی‌ها به‌عنوان یک سوخت دریایی مزایا و خطراتی دارد. LPG در حالت مایع خود قابل اشتعال یا انفجار نیست، نشت آن می‌تواند باعث ایجاد بخارهایی شود که به راحتی با باد پراکنده

و در صورت برخورد با منبع حرارتی ممکن است آتش بگیرند. همچنین، نشت LPG روی آب می‌تواند منجر به استخر آتش<sup>۲</sup> شود که بسیار داغ‌تر و سریع‌تر از آتش‌های ناشی از نفت یا بنزین می‌سوزد و قابل خاموش شدن نیست. در عملیات سوخت‌رسانی، نشت LPG می‌تواند خطرات زیادی از جمله آتش‌سوزی یا انفجار در مناطق بندری ایجاد کند. به همین دلیل، تدابیر ایمنی ویژه‌ای مانند استفاده از لوله‌های دو جداره و آشکارسازهای هیدروکربنی برای جلوگیری از نشت و آسیب به کشتی‌ها ضروری است. با این حال، سوخت‌رسانی LPG هنوز چارچوب نظارتی رسمی و دستورالعمل‌های مشخصی ندارد و توسعه این دستورالعمل‌ها می‌تواند به بهبود ایمنی، کارایی و آگاهی محیط‌زیستی کمک کند، مشابه آنچه برای دیگر سوخت‌ها مانند LNG انجام شده است.

## ۲-۳-۵ ایمنی و الزامات فنی مرتبط با حمل

برای بهبود ایمنی و کارایی در سوخت‌گیری LPG، لازم است استانداردها و مشخصات فنی تجهیزات مانند شیلنگ‌ها، نازل‌ها و شیرآلات تدوین شود و معیارهای عملکرد و الزامات ایمنی آن‌ها تعریف گردد. روال‌هایی برای تست و صدور گواهی تجهیزات سوخت‌گیری ایجاد شده و همراه با مستندات و مواد آموزشی جامع، در اختیار ذینفعان از جمله اپراتورها و خدمه قرار گیرد. پروژه‌های آزمایشی و نمایش‌های عملی به منظور اعتبارسنجی چارچوب‌ها و شناسایی شکاف‌ها یا مشکلات احتمالی اجرا شده و از نتایج آن برای اصلاح رویه‌ها و ارتقای ایمنی استفاده شود.

این فرآیندها تضمین می‌کند که تمامی تجهیزات و عملیات مرتبط با سوخت‌گیری LPG مطابق با استانداردهای بین‌المللی بوده و صدور گواهی‌ها به ایمنی جهانی کمک کند. فرآیند سوخت‌گیری در سه مرحله انجام می‌شود.

### ۲-۳-۵-۱ مرحله قبل از سوخت‌گیری

مرحله پیش از سوخت‌گیری<sup>۳</sup> از سفارش سوخت آغاز شده و با شروع فرآیند سوخت‌گیری خاتمه می‌یابد. در این مرحله آمادگی، انجام تمام اقدامات لازم برای اطمینان از انتقال ایمن سوخت بسیار مهم است. این اقدامات شامل موارد زیر می‌شوند:

- اطمینان از اینکه تمامی یافته‌های ارزیابی ریسک به درستی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

<sup>۲</sup>pool fire

<sup>۳</sup>Before bunkering



- ارزیابی سازگاری بین کشتی دریافت‌کننده سوخت و تأسیسات .
- تهیه و توافق بر روی برنامه واکنش اضطراری.
- ارائه دستورالعمل‌های ایمنی و آموزش کارکنان .
- هماهنگی با نهادهای مسئول برای دریافت مجوزهای لازم.
- ارزیابی فرآیندهای مرتبط دیگر، مانند عملیات هم‌زمان <sup>۴</sup>.
- تعیین جزئیات عملیاتی مانند نرخ انتقال، محدودیت‌های بارگیری، خاموشی اضطراری <sup>۵</sup>، سیستم ایمنی اضطراری <sup>۶</sup> و غیره.
- تکمیل تمامی چک‌لیست‌های مورد نیاز پیش از سوخت‌گیری.

## ۲-۳-۶ مرحله سوخت‌گیری

فرآیند سوخت‌رسانی <sup>۷</sup> با اتصال کشتی دریافت‌کننده به تأسیسات سوخت‌رسانی آغاز می‌شود و با انتقال واقعی سوخت ادامه می‌یابد، و با اقدامات لازم برای بستن ایمن شیر از تأسیسات سوخت‌رسانی خاتمه می‌یابد. در طول مرحله سوخت‌گیری، بخش‌های حیاتی سیستم باید به طور مداوم کنترل شوند، از جمله:

- سطح مخازن؛
- فشار مخازن؛
- دمای مخازن؛
- نرخ انتقال پمپ؛
- نرخ جریان پمپ؛
- عملیات سیستم‌های ESD و ERS؛

---

<sup>4</sup>SIMOPS

<sup>5</sup>ESD

<sup>6</sup>ERS

<sup>7</sup>During bunkering

- تنظیم خطوط پهلویی و شیلنگ‌ها؛
- نظارت و حفظ سایر جنبه‌های ایمنی، مانند مناطق ایمنی.

## ۷-۳-۲ پس از سوخت‌گیری

- پس از اتمام سوخت‌گیری<sup>۸</sup>، باید به نکات زیر توجه شود:
- انجام موفقیت‌آمیز فرآیندهای سیستمی، مانند تبخیر خطوط و خنثی‌سازی گازها در خطوط و شیلنگ‌ها، بدون انتشار گاز به جو.
  - قطع ایمن ارتباط بین کشتی دریافت‌کننده و تأسیسات سوخت‌رسانی.
  - جداسازی ایمن کشتی دریافت‌کننده یا کشتی سوخت‌رسان از کشتی دریافت‌کننده و اطلاع‌رسانی به مقامات بندری.

## ۴-۲ الزامات قانونی

برای کاهش ریسک‌های مرتبط با کشتی، خدمه و محیط زیست، کدهای ایمنی بین‌المللی پیش‌نیازهای لازم برای تجهیزات، ماشین‌آلات و سیستم‌های کشتی را تعیین می‌کنند. این الزامات شامل استانداردهای عملکردی، ارزیابی ریسک، مقررات و نیازمندی‌های عملیاتی است که همراه با آموزش مناسب خدمه، ایمنی عملیات کشتی را تضمین می‌کنند.

### ۱-۴-۲ کد IGC

این کد مرتبط با ساخت و تجهیز کشتی‌هایی که گاز مایع شده را به صورت فله حمل می‌کنند و استفاده از این گازها به‌عنوان سوخت هست.

### ۲-۴-۲ کد IGF

این کد مخصوص کشتی‌های غیرحامل گاز که از گاز یا سوخت‌های با نقطه اشتعال پایین، مانند LPG، به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند.

<sup>8</sup>After bunkering

## ۳-۴-۲ استاندارد MSC.1/Circ.1666

استاندارد ایمنی برای کشتی‌هایی که از ال پی جی به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند. ...

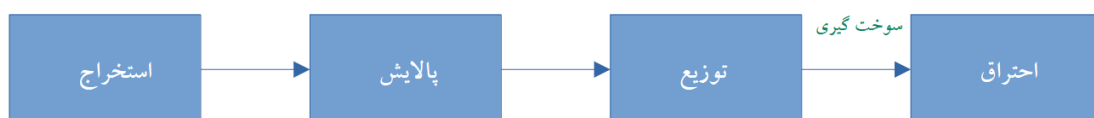
## ۴-۴-۲ استاندارد MSC.1/Circ.1679

...راهنمایی‌های موقت برای استفاده از محموله ال پی جی به‌عنوان سوخت.

## ۵-۲ اقتصاد و بازار LPG

### ۱-۵-۲ چرخه عمر

دستورالعمل‌های چرخه عمر گازهای گلخانه‌ای<sup>۹</sup> سازمان بین‌المللی دریانوردی برای سوخت‌های دریایی، شامل LPG، ابتدا در نشست MEPC 80 (MEPC.376(80)) تصویب شدند و تمامی مراحل زنجیره تأمین این سوخت را پوشش می‌دهند. در نشست MEPC 81، نسخه 2024 این دستورالعمل‌ها (MEPC.391(81)) با اصلاح عوامل توزیع پیش‌فرض، به‌روزرسانی الگوی عوامل توزیع از چاه به مخزن<sup>۱۰</sup> شکل ۱-۲ و اضافه‌شدن الگوی جدید برای عوامل توزیع از مخزن به مصرف<sup>۱۱</sup> بازنگری شد. [۱]



شکل ۱-۲: زنجیره تأمین سوخت

### ۲-۵-۲ تجارت جهانی

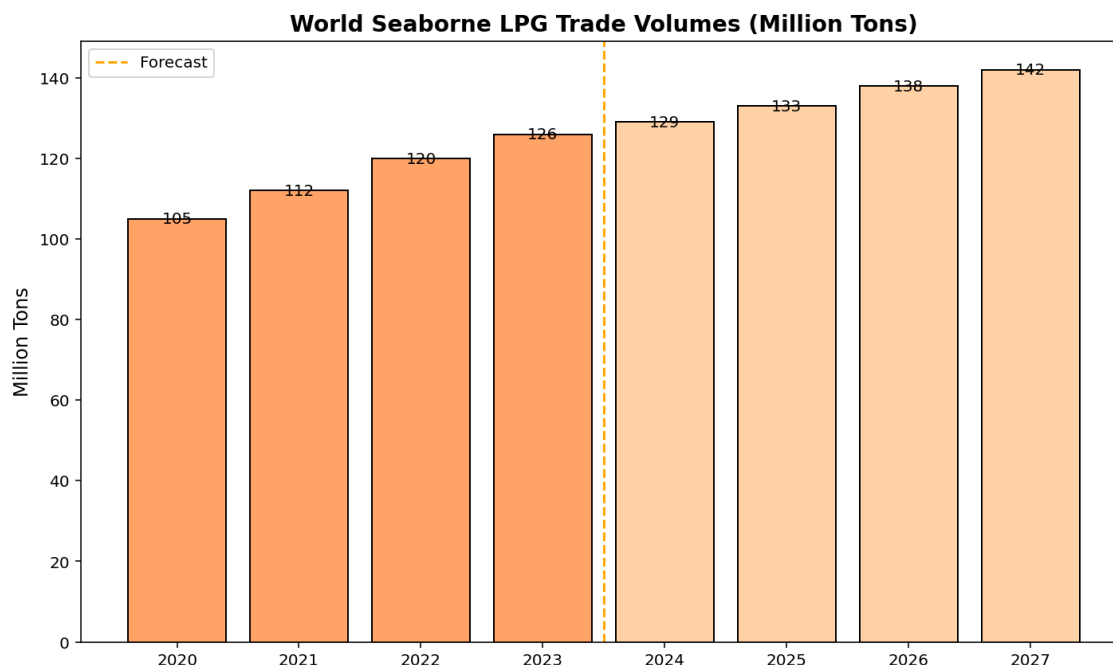
تقاضای جهانی LPG در شکل ۲-۲ و تجارت دریایی مرتبط با آن در حال افزایش است. در سال ۲۰۲۲، تقاضای جهانی LPG با رشد ۳.۵٪ به رکورد ۳۴۲ میلیون تن رسید. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که حجم

<sup>۹</sup>LCA

<sup>۱۰</sup>Well-to-Tank

<sup>۱۱</sup>Tank-to-Wake

تجارت دریایی LPG در سال ۲۰۲۳ حدود ۶ میلیون تن افزایش یافته و نسبت به ۲۰۲۲ رشد ۵٪ داشته است. همچنین، برای سال ۲۰۲۴، رشد ۲.۳٪ پیش‌بینی شده و انتظار می‌رود حجم تجارت تا سال ۲۰۲۷ به حدود ۱۴۲ میلیون تن برسد.



شکل ۲-۲: درخواست LPG

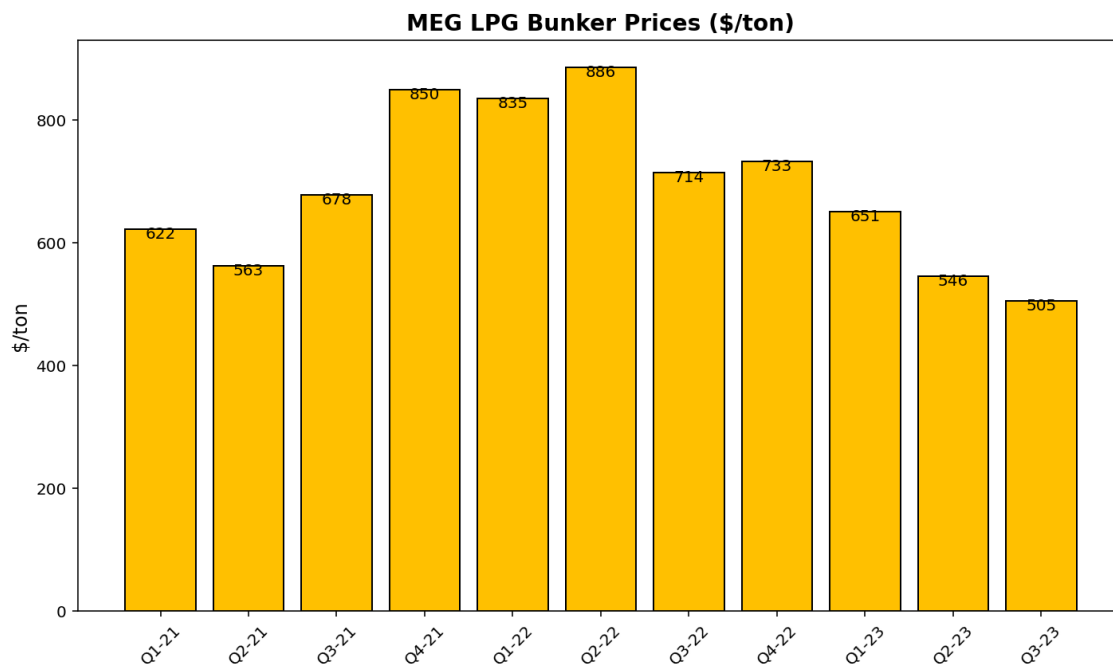
## ۳-۵-۲ قیمت سوخت

استفاده از LPG (گاز مایع) به عنوان سوخت، به دلیل قیمت جذاب آن در برخی مناطق مانند ایالات متحده و خلیج فارس، گزینه‌ای اقتصادی برای مالکان و اپراتورها محسوب می‌شود. از نظر هزینه‌های سرمایه‌ای<sup>۱۲</sup>، LPG مزایای قابل توجهی نسبت به سایر گزینه‌های سوخت دوگانه<sup>۱۳</sup> مانند LNG دارد؛ به‌طوری که ساخت یک کشتی کانتینری ۱۰ هزار TEU با سوخت LPG حدود ۱۰۰ میلیون دلار هزینه دارد، یعنی ۲۰٪ ارزان‌تر از کشتی مشابه با سوخت LNG که حدود ۱۲۵ میلیون دلار هزینه می‌برد. همچنین، هزینه تبدیل موتورهای دیزلی به موتورهای دوگانه LPG (بین ۵.۹ تا ۲۷ میلیون دلار) در مقایسه با تبدیل به LNG (بین ۱۲ تا ۳۳ میلیون دلار) مقرون‌به‌صرفه‌تر است. این عوامل باعث می‌شود.

<sup>۱۲</sup>(CAPEX)

<sup>۱۳</sup>Dual-Fuel

LPG به عنوان گزینه‌ای جذاب برای صنعت کشتیرانی مطرح شود. (شکل ۲-۳)



Source: GlobalPetrolPrices.com, MSI LPG trade data

شکل ۲-۳: قیمت سوخت در خلیج فارس

۴-۵-۲ تأمین و نگهداری

۶-۲ نتیجه گیری

• مزایای زیست محیطی LPG:

- □ □ □ به عنوان یک سوخت فسیلی مزیت‌های قابل توجهی در کاهش آلودگی هوا نسبت به سوخت‌های نفتی سنتی (مانند مازوت) دارد.
- استفاده از □ □ □ موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، به‌ویژه اگر با فناوری‌های مکملی مانند کربن‌گیری در کشتی همراه شود.

این سوخت می‌تواند با مقررات سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) درباره کاهش اکسیدهای گوگرد مطابقت داشته باشد و همچنین در بلندمدت با اهداف کربن‌زدایی این سازمان همخوانی داشته باشد.

#### • پتانسیل IMO برای آینده:

استفاده از IMO در بلندمدت به تولید سوخت‌های تجدیدپذیر وابسته است، که انتظار می‌رود با سرعت بالایی افزایش یابد.

با رشد تجارت دریایی و افزایش تقاضا برای IMO، ناوگان جهانی کشتی‌های حمل IMO رشد خواهد کرد و این فرصت برای استفاده از IMO به‌عنوان سوخت افزایش می‌یابد.

زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و استفاده از IMO طی چند دهه به‌خوبی توسعه یافته است.

#### • چالش‌های موجود:

تکنولوژی‌های موتوری برای IMO محدود است. به‌عنوان مثال، هنوز موتور دریایی چهارزمانه‌ای که بتواند از IMO استفاده کند، وجود ندارد، بنابراین موتورهای کمکی کشتی‌ها نیاز به سوخت‌های دیگری برای کربن‌زدایی دارند.

قوانین و چارچوب‌های مقرراتی برای استفاده از IMO به‌عنوان سوخت، خصوصاً در حوزه سوخت‌رسانی (Bunkering)، هنوز کامل نیست و فقط راهنماهای اولیه در سطح IMO تدوین شده است.

#### • عامل تعیین‌کننده:

آینده IMO به‌عنوان یک سوخت مهم در صنعت دریانوردی به سرعت کربن‌زدایی تولید IMO و پیشرفت فناوری‌های مرتبط مانند کربن‌گیری وابسته است.

همچنین IMO ممکن است به‌عنوان یک سوخت انتقالی تا زمان توسعه کامل سوخت‌های بدون کربن یا نزدیک به صفر کربن عمل کند.

## فصل سوم

### مقررات و استانداردها

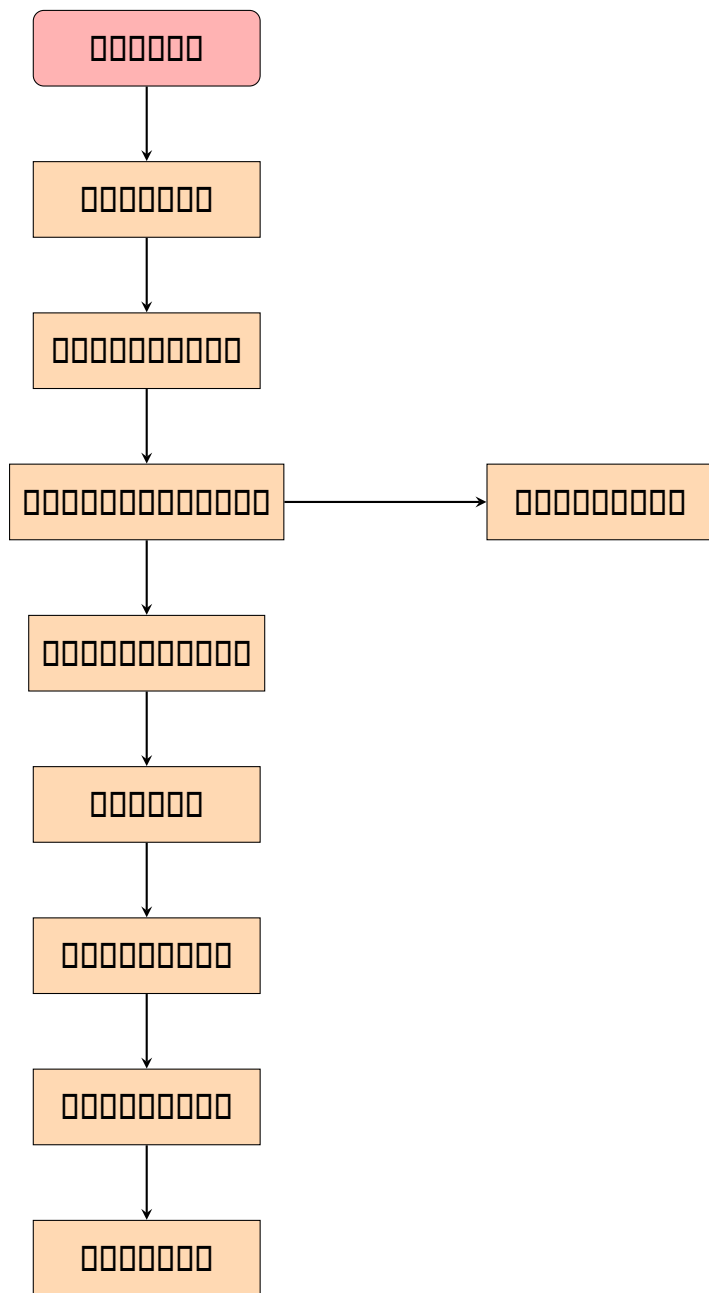
فصل چهارم

فصل چهارم



## فصل پنجم

### پیشینه تحقیق



## کتاب نامه

- [1] Das, Biplab and Biswas, Pankaj. Review of Plate Forming by Line Heating. 34(2):155–167, 2018.

## پیوست

موضوعات مرتبط با متن گزارش پایان نامه که در یکی از گروه‌های زیر قرار می‌گیرد، در بخش پیوست‌ها آورده شوند:

۱. اثبات‌های ریاضی یا عملیات ریاضی طولانی.

۲. داده و اطلاعات نمونه (های) مورد مطالعه (Case Study) چنانچه طولانی باشد.

۳. نتایج کارهای دیگران چنانچه نیاز به تفصیل باشد.

۴. مجموعه تعاریف متغیرها و پارامترها، چنانچه طولانی بوده و در متن به انجام نرسیده باشد.

## کد میپل

```
with(DifferentialGeometry):  
with(Tensor):  
DGsetup([x, y, z], M)  
frame name: M  
a := evalDG(D_x)  
D_x  
b := evalDG(-2 y z D_x+2 x D_y/z^3-D_z/z^2)
```

# واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی

آ

اسکالر ..... Scalar

# واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

A

خودریختی Automorphism .....

B