



## انتخاب آلومینیوم‌های مناسب در سازه‌های دریایی

مجید الیاسی<sup>۱</sup>، علی ابوکاظم‌پور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید؛ elyasi@nit.ac.ir  
<sup>۲</sup>دانشجو، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید؛ trioa@gmail.com

### چکیده

آلومینیوم به عنوان یک فلز پرکاربرد سال‌هاست که در صنایع دریایی دنیا کاربرد دارد. این خانواده از فلزات به دلیل آنکه دارای اکسید پیوسته هستند طول عمر بیشتری نسبت به فلزات مشابهی دارند که دارای اکسید گسسته می‌باشند. در این پژوهش پارامترهای موثر بر انتخاب آلومینیوم‌های دریایی بررسی می‌گردد. به منظور بررسی، ابتدا خواص کلی انواع آلیاژهای آلومینیوم بررسی شده و سپس بر اساس شرایط کاری در دریا، آلیاژهای مناسب در این شرایط کاری پیشنهاد شده است. پارامترهایی مانند فرآیند ساخت، تیراژ تولید، شرایط کاری، عمق کاری، دمای کاری، شرایط فیزیکی و شیمیایی آب دریا، عمر مورد انتظار و میزان خوردگی، به عنوان شاخصه‌های انتخاب ماده در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که آلیاژهای 5383-H321 و 6082-T6 بهترین شرایط کاربرد را در سازه‌های دریایی دارند.

**کلمات کلیدی:** مواد دریایی، آلیاژهای آلومینیوم، شرایط کاری، صنایع دریایی

### مقدمه

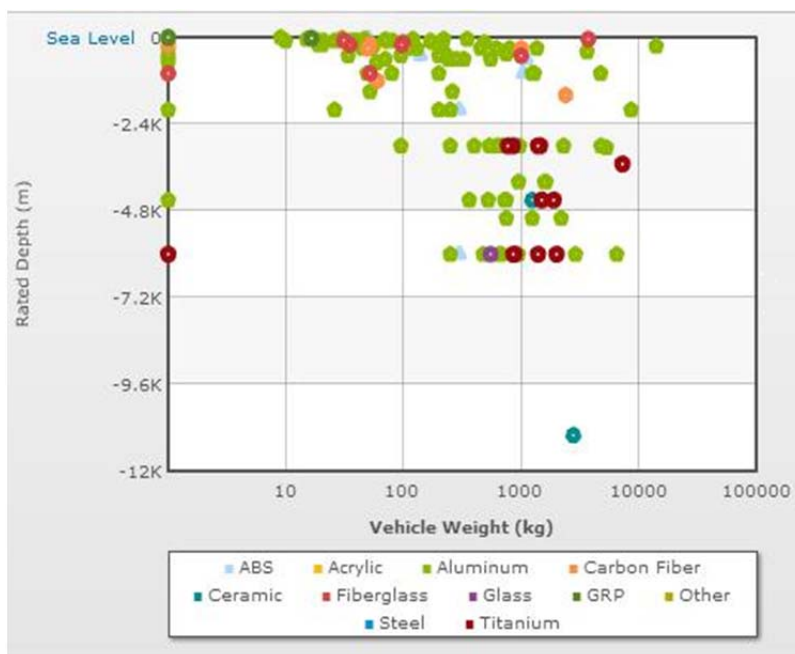
آلومینیوم بیشتر از صد سال است که در بدنه کشتی‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بیشتر سازه‌های دریایی که آلومینیوم در آن‌ها به عنوان ماده اصلی استفاده شده‌اند ده‌ها سال است که بدون هیچ مشکل جدی در دریا استفاده می‌شوند. مشکل جدی استفاده از آلومینیوم‌ها که صنایع دریایی با آن مواجه شده است انتخاب اشتباه آلیاژهای آلومینیوم بوده که منجر به خوردگی شدید در سازه‌ها در طول استفاده چند ساله از آن‌ها شده است [۱].

در دهه گذشته به کاربرد آلومینیوم در سازه دریایی بسیار توجه شده است. مدارک موجود حاکی از آن است که اتحادیه بین‌المللی سازه دریایی توجه ویژه‌ای به استفاده از این فلز و آلیاژهای آن داشته و پژوهش‌های بسیار زیادی در زمینه خستگی سازه‌های آلومینیومی، بهینه‌سازی استفاده از آلیاژهای آلومینیوم در سازه‌های دریایی، استفاده از آلومینیوم در بدنه کشتی‌های تجاری، استفاده از ترکیب آلومینیوم و سرامیک در سازه‌های دریایی، تست‌های مجالگی در سازه‌های آلومینیومی تحت فشار در دریا، طراحی آلومینیوم‌های دریایی و روش‌های تولید آن‌ها و کاربرد روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اتصالات آلومینیومی سازه‌های دریایی انجام شده است [۲].

عرشه کشتی‌های آمریکایی بیشتر از ۷۰ سال است که از آلومینیوم ساخته می‌شود. بیشترین عیبی که از کاربرد این فلز در عرشه کشتی گزارش شده است عیب خستگی بوده است. یکی دیگر از عیوب رایج در کشتی‌ها و سازه‌های دریایی در زمان سوانح دریایی و آتش‌سوزی بوده و این مساله نیز باعث شده است که از حدود ۴۰ سال پیش استفاده از آلیاژهای آلومینیوم رواج بسیار زیادی در صنایع دریایی داشته باشد [۳].

### جایگاه آلومینیوم در سازه‌های دریایی

استفاده از فلزات در بدنه سازه‌های دریایی سابقه‌ای طولانی دارد. فولاد، آلومینیوم، مس-نیکل و تیتانیوم از جمله فلزاتی هستند که کاربردهای متعددی در صنایع دریایی داشته‌اند. با وجود اختراع مواد جدید مانند کامپوزیت‌ها، کماکان فلزات از مواد اصلی مورد استفاده در این صنایع هستند. آلومینیوم از جمله فلزاتی است که به دلیل خواص ویژه‌ای که دارد، به سرعت در صنایع دریایی رواج پیدا کرد. به عنوان مثال یکی از ادواتی در کشورهای پیشرفته به شدت مورد استقبال قرار گرفته، ربات بدون سرنشین خودکار است. همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده حدود ۹۰ درصد از روبات‌های بدون سرنشین خودکار از بدنه‌های آلومینیومی تشکیل شده‌اند [۴].



شکل ۱: جنس‌های استفاده شده در بدنه ربات‌های بدون سرنشین خودکار [۴]

خواص مکانیکی آلیاژهایی آلومینیم که در صنایع دریایی استفاده می‌شوند در حد قابل قبولی است. همچنین نسبت استحکام به وزن آن‌ها نیز از اکثر فولادهایی با کاربرد مشابه بیشتر است. بعلاوه، آلومینیم در حدود ۱۰۰ برابر آهسته‌تر از فولاد کربنی دچار خوردگی می‌شود [۵]. آلومینیم‌های کار شده از نظر نوع ترکیب شیمیایی و عناصر تشکیل‌دهنده، در گروه‌های 1xxx، 2xxx، 3xxx، 4xxx، 5xxx، 6xxx و 7xxx تقسیم بندی می‌شوند که در جدول (۱) مشاهده می‌شود. بدیهی است که خواص مختلف هر یک از گروه‌ها در کاربردهای صنعتی با گروه دیگر متفاوت است. نکته قابل توجه این است که در یک گروه خاص، ترکیب و درصد عناصر آلیاژی باعث می‌گردد که آلیاژهای موجود در یک گروه نیز با یکدیگر تفاوت‌هایی داشته باشند.

در انتخاب آلومینیم به عنوان یک فلز که بتواند در کاربردهای دریایی استفاده گردد باید به خواص و ویژگی‌های گروه‌های مختلف آن توجه کرد. پارامترهایی که در سازه‌های دریایی بیشترین اهمیت را دارد شامل مقاومت به خوردگی، نسبت استحکام به وزن، قابلیت شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری است. با ملاحظه مقادیر کیفی که در جدول (۱) برای گروه‌های مختلف از آلیاژهای آلومینیم بیان شده است دیده می‌شود که گروه‌های 1xxx، 3xxx و 4xxx به دلیل استحکام نسبی متوسط و گروه‌های 2xxx و 7xxx به دلیل مقاومت به خوردگی پایین بطور معمول در صنایع دریایی کاربرد ندارند. همچنین با توجه به این نکته که آلیاژ مورد نظر باید استحکام و مقاومت به خوردگی را توأمان دارا باشد؛ آلیاژهای سری 5xxx و 6xxx جهت انتخاب در کاربردهای دریایی نسبت به گروه‌های دیگر آلومینیم مناسب‌تر خواهند بود.

جدول ۱- مقایسه کیفی خواص گروه‌های مختلف آلومینیم کار شده [۶]

شماره سری	عصر آلیاژی اصلی	مقاومت نسبی به خوردگی	استحکام نسبی	قابلیت عملیات حرارتی
1xxx	-	عالی	متوسط	ندارد
2xxx	مس	متوسط	عالی	دارد
3xxx	منگنز	خوب	متوسط	ندارد
4xxx	سیلیسیم	-	-	ندارد
5xxx	منیزیم	خوب	خوب	ندارد
6xxx	منیزیم و سیلیسیم	خوب	خوب	دارد
7xxx	روی	متوسط	عالی	دارد

## نتایج و بحث

برای انتخاب آلومینیم‌های مناسب در سازه‌های دریایی، با توجه به مطالب بیان شده و حذف آلومینیم‌های کم کاربرد در صنایع دریایی، در جدول (۲) مشخصات آلیاژهای متداول آلومینیم‌های دریایی از گروه‌های 5xxx و 6xxx به همراه برخی از خواص مکانیکی آنها بیان شده است. بر اساس استاندارد ASTM B928 که ملاک آن تست‌های ASTM G67 و ASTM G66 است، در صورت امکان دو نوع پروسه عملیات حرارتی H321 و H116 برای آلیاژهای سری 5xxx آلومینیم به منظور استفاده در صنایع دریایی استفاده می‌گردد.

آلیاژهای ۵۰۵۹ (Alustar) و ۵۳۸۳ (Sealium) گریدهایی از آلیاژ آلومینیم هستند که به طور ویژه برای استفاده در صنایع دریایی توسعه داده شده‌اند. برای مثال آلیاژ ۵۳۸۳ با اندکی تغییر در ترکیب شیمیایی آلیاژ ۵۰۸۳ به منظور دستیابی به مقاومت خوردگی بالاتر گسترش داده شده است [۴].

برای تعیین و انتخاب بهینه هر یک از آلیاژهای جدول (۲) در کاربردهای دریایی، نیاز به بررسی پارامترهای دیگری می‌باشد که در فرآیند انتخاب مواد تاثیر خواهند گذاشت. در ادامه، با بررسی هر یک از این پارامترها، انتخاب آلیاژ آلومینیم مناسب از جدول (۲) محدودتر شده تا آلیاژهای بهینه انتخاب گردند.

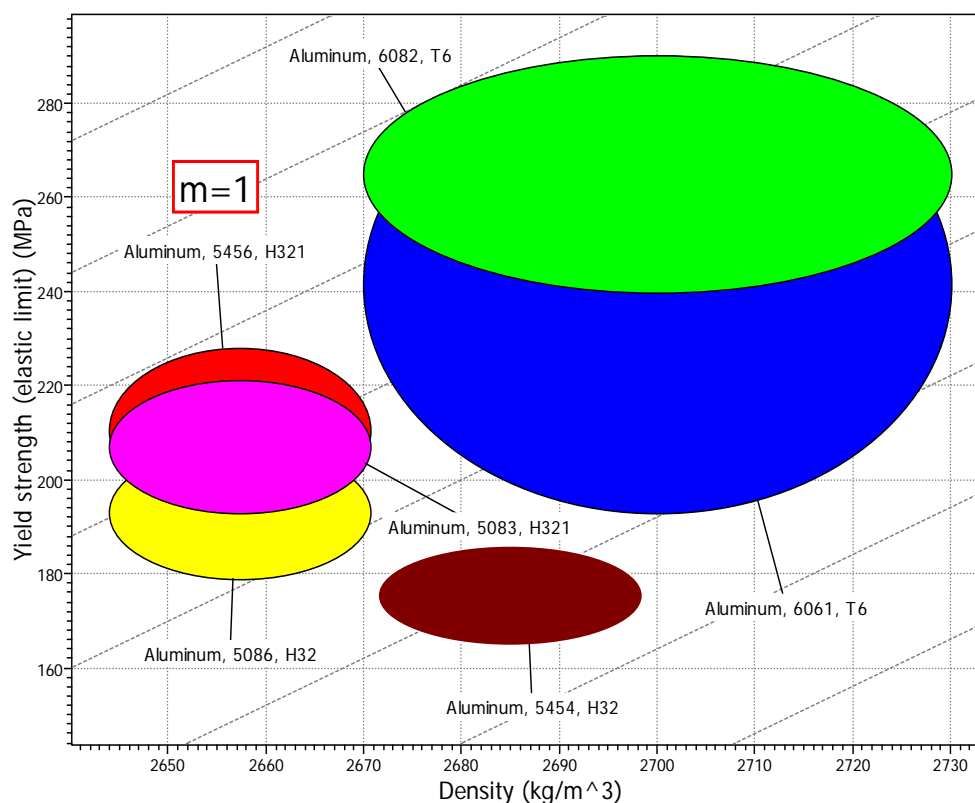
جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم مناسب محصولات دریایی

نوع آلیاژ	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول	مدول یانگ (Gpa)
5059-H116/H321	۳۷۰	۲۷۰	۱۰	۷۰-۷۳/۶
5083-H116/H321	۲۸۳-۳۱۷	۱۹۳-۲۲۱	۱۲-۱۳/۹	۷۰-۷۳/۶
5086-H32	۲۷۶-۳۰۵	۱۷۹-۲۰۷	۶-۱۲	۷۰-۷۳/۶
5383-H116/H321	۳۰۵	۲۱۵	۱۰	۷۰-۷۳/۶
5454-H32	۲۴۸-۲۷۴	۱۶۵-۱۸۶	۵-۱۲	۷۰-۷۳/۶
5456-H116/H321	۲۸۳-۳۱۷	۱۹۳-۲۲۸	۱۲-۱۳/۹	۷۰-۷۳/۶
6061-T6	۲۴۱-۳۲۰	۱۹۳-۲۹۰	۱۲-۱۷	۶۸-۷۴
6082-T6	۲۸۰-۳۴۰	۲۴۰-۲۹۰	۵-۱۱	۷۰-۷۴

## نسبت استحکام به وزن

سبک بودن یک وسیله نقلیه مترادف با چندین مزیت است که مهم‌ترین آن‌ها کاهش مصرف سوخت است. طبعاً به دلیل مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و مشکلات سوخت‌رسانی در دریا، این ویژگی‌ها بسیار مهم هستند. بنابراین در این سازه‌ها هر مقدار که ماده مورد استفاده در بدنه نسبت استحکام به وزن بالاتری داشته باشد، وزن و در نتیجه مصرف سوخت کاهش می‌یابد. از دیگر مواردی که در انتخاب جنس بدنه یک سازه دریایی (مانند شناور سطحی) باید به آن توجه کرد این است که معمولاً یک وسیله نقلیه دریایی به مدت طولانی در آب است و به طور معمول، تجهیزات نسبتاً زیادی با آن حمل می‌گردد. بنابراین وجود فضای داخلی بیشتر همواره مطلوب خواهد بود. همانطور که پیشتر نیز بیان شد، افزایش نسبت استحکام به وزن بدنه موجب کاهش مصرف سوخت و نهایتاً نیاز به حمل حجم کمتری از سوخت خواهد شد که باعث افزایش فضای داخلی و امکان حمل تجهیزات بیشتر خواهد شد.

شکل (۲) نسبت استحکام به وزن برخی از آلیاژهای آلومینیم را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود آلیاژ T6-۶۰۸۲ بالاترین و آلیاژ H۳۲-۵۴۵۴ پایین‌ترین نسبت استحکام به وزن را در بین آلیاژهای منتخب آلومینیم دارند.



شکل ۲: نسبت استحکام به وزن برخی از آلیاژهای آلومینیم مورد نظر

### مقاومت در برابر خوردگی

یکی از بارزترین خصوصیات هر سازه دریایی مقاومت جنس بدنه آن نسبت به خوردگی است. بویژه در آب دریا اهمیت این موضوع بیشتر خواهد شد. برای نمونه نرخ خوردگی فولاد ساده کربنی در آب شیرین  $0.01-0.05 \text{ mm/yr}$  و در آب دریا  $0.1-0.2 \text{ mm/yr}$  است [۵]. اما مشکل اصلی در بحث خوردگی این فلز، خوردگی الکتروشیمیایی است که سازنده را ملزم به پوشش‌دهی سطحی بمنظور استفاده در آب شور می‌کند و این کار، موجب افزایش هزینه در ساخت می‌شود.

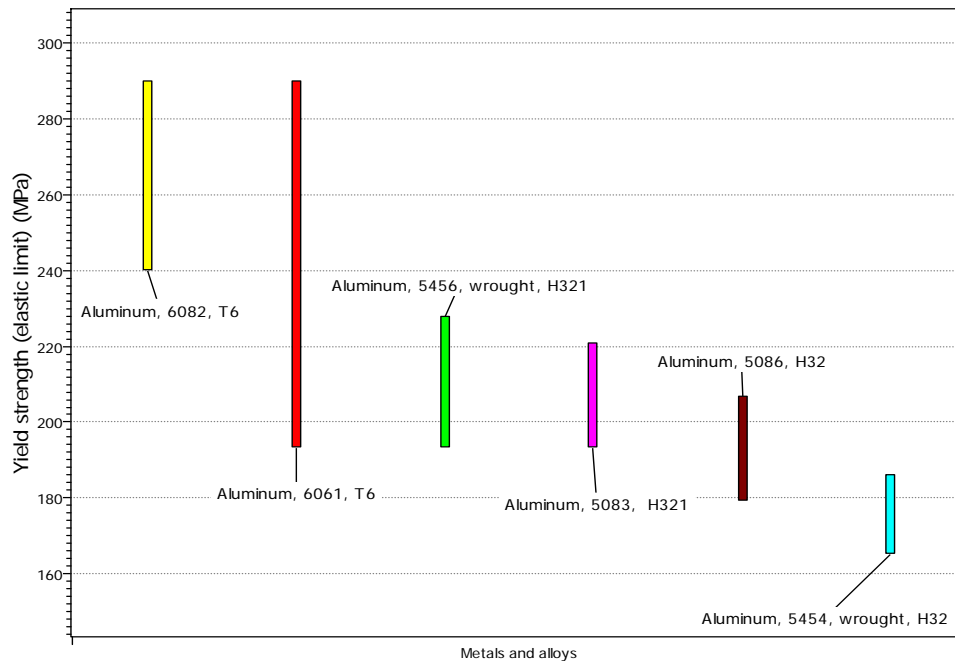
از مهم‌ترین پدیده‌های مخرب ناشی از خوردگی می‌توان به «ترک ناشی از خوردگی تنشی» اشاره کرد. در این پدیده ماده نرم به دلیل خوردگی و وارد آمدن تنش کششی به طور هم زمان، دچار شکست ترد می‌شود. بحث تنش‌های کششی اغلب مربوط به فرآیند ساخت، نحوه عملیات حرارتی، شرایط بارگذاری و ... است اما در مورد خوردگی می‌توان با انتخاب مناسب جنس با توجه به شرایط محیطی، وقوع این پدیده را به تعویق انداخت. در جدول (۳) اثر محیط خورنده بر برخی از فلزات نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود محلول نمک طعام در آب و بخار آب سرعت خوردگی آلیاژهای آلومینیم را افزایش می‌دهند.

جدول ۳- اثر محیط خورنده بر برخی از فلزات

نوع فلز	محیط
آلیاژهای آلومینیم	محلول نمک طعام در آب، بخار آب
انواع فولاد	هیدروکسید سدیم، نمک طعام و محلول‌های نیتراتی، اسیدهای مختلط، محلول گازی هیدروژن سولفید
فولاد زنگ نزن	محلول‌های اسیدی نمک طعام در دمای بالا، کلرید منیزیم، هیدروژن سولفید

## مقاومت به کمناش (استحکام)

این فاکتور عملاً راجع به تصمیم‌گیری برای انتخاب جنس بدنه سازه‌هایی است که کاربرد اصلی آن‌ها در اعماق آب است و ساختاری پوسته‌ای دارند. به عنوان مثال «روبات‌های بدون سرنشین خودکار» از جمله این سازه‌ها هستند. با دانستن این مطلب که ضخامت بدنه آن‌ها وابسته به استحکام بدنه است بنابراین باید با ایجاد توازن بین دو پارامتر استحکام و نسبت استحکام به وزن، می‌توان جنس مناسب را از میان آلیاژهای آلومینیم برگزید. با توجه به شکل (۳)، این ارزش‌گذاری برای آلیاژهای مختلف در جدول (۴) ارایه شده است.



شکل ۳: مقایسه استحکام تسلیم برخی از آلیاژهای آلومینیم منتخب [۶]

## فرآیند تولید

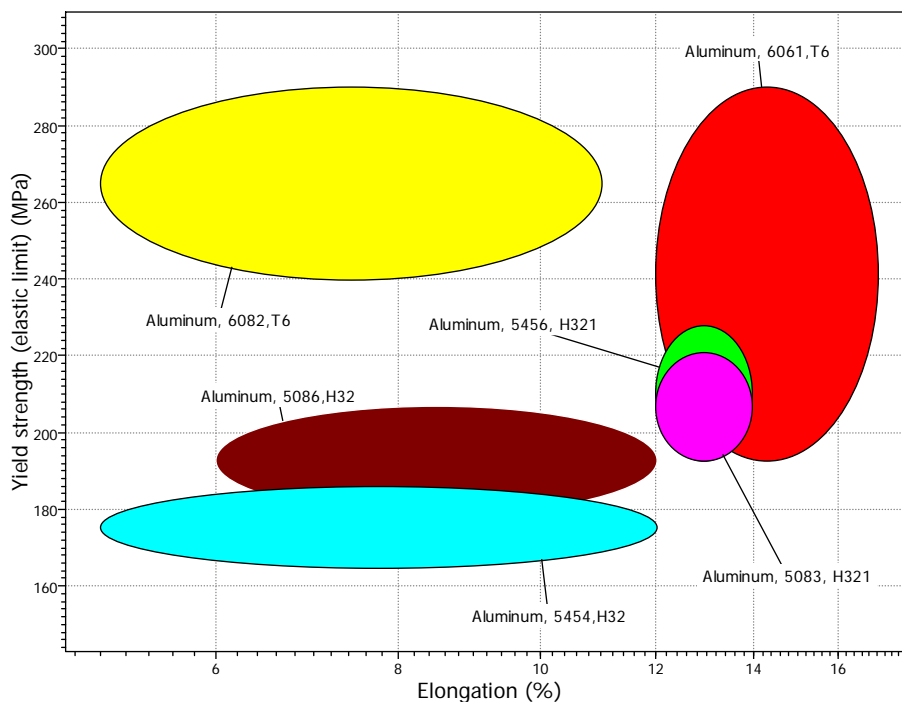
در مورد ترک ناشی از خوردگی کششی نیز نقش فرآیند ساخت بسیار پررنگ است. یکی از محتمل‌ترین نواحی برای ایجاد ترک ناشی از خوردگی کششی، موضع جوش است. قابل ذکر است که تنش پسماند در ناحیه جوش از نوع کششی است. تنش کششی از مهم‌ترین عوامل اشاعه ترک در مواد است. بنابراین چند راه برای کاهش تنش پسماند حاصل از جوشکاری و در نتیجه کاهش میزان ترک ناشی خوردگی وجود دارد. اولین راه حل استفاده از انواع جوش‌هایی است که حرارت و بالطبع تنش پسماند کمتری در قطعه ایجاد می‌کنند. یکی از انواع این جوش‌ها، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. راه دیگر برای کاهش تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری، ایجاد تنش‌های فشاری در قطعه با استفاده از ساچمه زنی و ... است. علاوه بر ترک ناشی از خوردگی کششی، مشکل عمده در جوشکاری آلومینیم به روش سنتی بحث کاهش استحکام موضع جوش است؛ بویژه در آلیاژهای سری ۵۰۰۰ که قابلیت جوشکاری بسیار کمی دارند. این مشکل با توسعه روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در برخی موارد مرتفع شده است. در جدول (۴) استحکام تسلیم برخی از آلیاژهای آلومینیم قبل و بعد از جوشکاری نشان داده شده است.

یکی از روش‌های محتمل در بحث تولید سازه‌های دریایی با بدنه فلزی، استفاده از روش‌های شکل‌دهی فلزات است. در صورت استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، دو پارامتر تنش تسلیم و درصد ازدیاد طول بسیار تأثیر گذار هستند. با افزایش درصد ازدیاد طول، میزان شکل‌پذیری (formability) قطعه افزایش می‌یابد که مطلوب است اما با افزایش تنش تسلیم میزان نیروی مورد نیاز شکل‌دهی افزایش می‌یابد که (صرفاً با توجه به فاکتور فرآیند تولید) عاملی نامطلوب تلقی می‌گردد. در شکل (۴) نسبت استحکام تسلیم به درصد ازدیاد طول آلیاژهای آلومینیم دریایی را نشان می‌دهد.

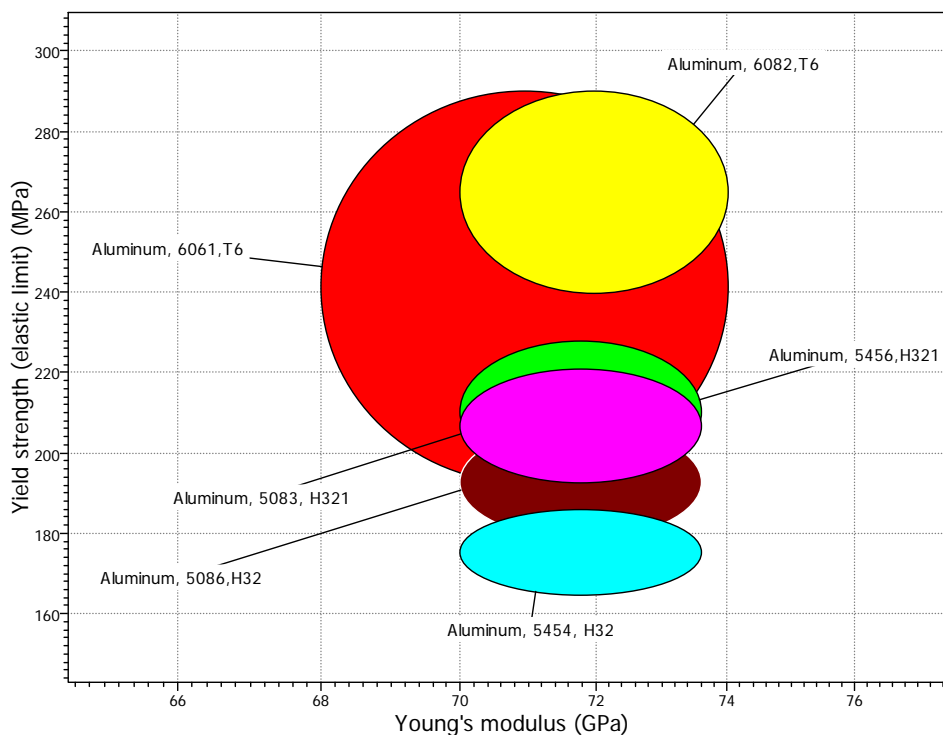
همچنین می‌توان نسبت استحکام تسلیم به مدول یانگ را معیاری مناسب برای ارزیابی میزان برگشت فنری حین فرآیند شکل‌دهی در نظر گرفت. بر اساس شکل (۵) نسبت استحکام تسلیم به مدول یانگ آلیاژهای فولاد و آلومینیم منتخب تقریباً در یک رده است اما همین شاخص برای تیتانیوم بسیار بزرگتر است که حاکی از برگشت فنری بیشتر در حین ساخت و در نتیجه شکل‌دهی مشکل‌تر این ماده است.

جدول ۴- مقایسه استحکام تسلیم آلیاژهایی از آلومینیم قبل و بعد از جوشکاری [۴]

نوع آلیاژ	Al 5059	Al 5083	Al 5383	Al 6082
استحکام تسلیم قبل از جوشکاری (MPa)	۲۷۰	۲۱۵	۲۲۰	۲۶۰
استحکام تسلیم بعد از جوشکاری (MPa)	۱۲۵	۱۲۵	۱۴۵	۱۱۵



شکل ۴: نسبت استحکام تسلیم به درصد ازدیاد طول آلیاژهای منتخب [۶]



شکل ۵: نسبت استحکام تسلیم به مدول یانگ [۶]

## هزینه و قابلیت دسترسی

پارامتر هزینه نیز یکی از فاکتورهای اساسی در انتخاب جنس است. به ویژه زمانی که تیراژ تولید مطرح باشد هزینه ماده اولیه می‌تواند بر هزینه قطعات در تیراژ بالا اثر گذار باشد. در کشور ما به دلیل شناور بودن قیمت‌های ماده خام هزینه مواد اولیه تغییر خواهد کرد. بعلاوه، برخی از آلیاژها ممکن است که از نظر علمی برای جنس بدنه کپسول مناسب باشند اما به دلیل آنکه در داخل کشور تولید نمی‌شوند یا واردات این مواد به کشور هزینه بردار است استفاده آنها در حالت عملی امکان پذیر نباشد. بنابراین، موضوع هزینه و قابلیت دسترسی مواد در ساخت سازه‌های دریایی در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است.

## ارزش گذاری پارامترها و انتخاب آلیاژهای بهینه

تیتانیوم در میان فلزات، دارای بالاترین نسبت استحکام به وزن است. بعلاوه این فلز قابلیت شکل‌دهی بسیار پایینی در دمای محیط دارد. به منظور مقایسه، به دلیل آنکه تیتانیوم بیشترین نسبت استحکام به وزن را در میان فلزات دارد ضریب وزنی این فلز عدد ۱۰ انتخاب شده است و با توجه به جداول و شکل‌های بخش‌های قبلی، هر یک از پارامترهای بیان شده برای آلیاژهای آلومینیومها با فلز تیتانیوم مقایسه شده و ضرایب به دست آمده آنها در جدول (۵) ارائه شده است. با ملاحظه ضرایب وزنی در این جدول دیده می‌شود که آلیاژ 5454-H32 به دلیل نسبت استحکام به وزن و مقاومت به کمناش برای سازه‌های دریایی که بارگذاری می‌شوند مناسب نمی‌باشد.

همچنین در شاخصه شکل‌پذیری از آلیاژهای گروه 5xxx تنها آلیاژهای 5383-H116/H321 شکل پذیرتر از دیگر آلیاژهای هم گروه خود هستند. بعلاوه آلیاژهای گروه 6xxx شکل پذیرتر از آلیاژهای گروه 5xxx هستند و در میان آلیاژهای گروه 6xxx، آلیاژ 6082-T6 شکل پذیرتر است. در اتصال دهی آنها با جوش‌پذیری گاز محافظ نیز آلیاژهای 5383-H116/H321 و 6082-T6 شرایط بهتری دارند. البته در میان آلیاژهای 5383-H116 و 5383-H321 و آلیاژ 5383-H321 به دلیل نوع عملیات حرارتی آن، شکل پذیری و جوش‌پذیری بهتری دارد. با توجه به مطالب بیان شده، نتیجه می‌گردد که در کاربردهای دریایی آلیاژهای 5383-H321 و 6082-T6 بهترین شرایط کاربرد را دارند. البته لازم به ذکر است آلیاژ 5383-H321 به دلیل آنکه عملیات حرارتی نمی‌گردد شکل پذیری بسیار کمتری نسبت به آلیاژ 6082-T6 دارد. بنابراین اگر در کاربردهای دریایی از شکل‌دهی ورقه‌ای با درصد شکل پذیری کم استفاده می‌گردد پیشنهاد می‌گردد از آلیاژ 5383-H321 استفاده شود و اگر از شکل‌دهی حجمی با درصد شکل پذیری زیاد استفاده می‌گردد توصیه می‌شود که از آلیاژ 6082-T6 استفاده شود.

جدول ۵- ارزش گذاری آلیاژهای آلومینیوم بر اساس پارامترهای مهم در کاربردهای دریایی

نوع آلیاژ پارامتر	5059- H116/H321	5083- H116/H321	5086- H32	5383- H116/H321	5454- H32	5456- H116/H321	6061-T6	6082-T6
نسبت استحکام به وزن	۶	۶	۶	۶	۴	۶	۷	۷
مقاومت در برابر خوردگی	۸	۸	۸	۸	۸	۶	۶	۸
مقاومت به کمناش	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۴	۴
شکل پذیری	۴	۴	۴	۵	۴	۴	۶	۷
جوش‌پذیری (قوسی)	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
جوش‌پذیری (گاز محافظ)	۴	۴	۴	۷	۴	۴	۸	۷

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انتخاب آلومینیوم‌های مناسب در سازه‌های دریایی و اثر پارامترهای مهم بر آن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- آلیاژهای آلومینیوم گروه 1xxx، 3xxx و 4xxx به دلیل استحکام نسبی متوسط در سازه‌های دریایی استفاده نمی‌شوند.
- ۲- آلیاژهای آلومینیوم گروه 2xxx و 7xxx به دلیل مقاومت به خوردگی پایین کاربرد ویژه‌ای در صنایع دریایی ندارند.
- ۳- آلیاژهای آلومینیوم گروه 5xxx استحکام و مقاومت به خوردگی خوبی در سازه‌های دریایی دارند اما درصد شکل پذیری آنها پایین بوده و قابلیت عملیات حرارتی نیز ندارند.

۴- آلیاژهای آلومینیم گروه ۵XXX استحکام و مقاومت به خوردگی خوبی در سازه‌های دریایی دارند. قابلیت شکل پذیری آنها از گروه 5XXX بیشتر بوده و قابلیت عملیات حرارتی نیز دارند.

۵- در کاربردهای دریایی اگر از شکل‌دهی ورقه‌ای با درصد شکل پذیری کم استفاده گردد پیشنهاد شد که از آلیاژ 5383-H321 استفاده شود.

۶- همچنین اگر در کاربردهای دریایی از شکل‌دهی حجمی با درصد شکل پذیری زیاد استفاده شود توصیه گردید که از آلیاژ 6082-T6 استفاده شود.

#### مراجع

- [1] Romhanji, E., "Problems and prospect of Al-Mg alloys application in marine constructions," Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 1978.
- [2] Wong, S.I., "On Lightweight Design of Submarine Pressure Hulls," MSc Thesis, 2012.
- [3] Cormack, E. C., "The effect of sensitization on the stress corrosion cracking of Aluminum alloy 5456," MSc Thesis, 2002.
- [4] Cordray, B., "Corrosion rate quantification of aluminum 5052 (Al), stainless steel 316L (SS) and high strength steel HY-80 (HY-80)," 10th International of Design of Ship and Other Floating Structure, 2005.
- [5] Kutz, M., "Handbook of Materials Selection," 2002.
- [6] Ashby, M.F., "Material selection in mechanical design," 2nd edition, 1999.