

صنعت پایدار

سال اول، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱



- طراحی و بررسی امکان ساخت مکانیزم خزش ربات متحرک درون لوله با محرک پنوماتیک
مریم علیزاده، محمد گهری، مجید رجایی
- اثر تغلیظ لحیم‌های بدون سرب توسط افزودن عنصر نیکل در تشکیل ترکیبات میانی موجود با سطح مس نقره اندود شده
صفورا عشاقی، سیدمحمد رضا لقمانیان
- بررسی اثر نیروی کازمیر بر رفتار میکروتیر با استفاده از روش هموتوبی بهینه شده
علی تاجمیری، محمد رضا مقومی
- بررسی نقش شتاب حرکتی و گرانش زمین در تئوری معادلات حرکتی موشک‌های چند مرحله‌ای ماهواره‌بر
محمد رضا مقومی، آبتین شمیلی، محمود محمدخانی، نسا زمانی بختیاروند
- مدلسازی دینامیکی ربات بالارونده سندبلاست
محمد گهری، محدثه رمضی، نیما همتا
- ارزیابی تاثیر پارامترهای جوشکاری TIG بر تشکیل ترک در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴
سیده راضیه انوری، محمد رضا نصرافهانی، سعید احمدی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- موضوعات نشریه در زمینه پژوهش در رشته‌های فنی - مهندسی است.
- مقاله‌های ارسالی نباید قبلاً در هیچ نشریه‌ای به چاپ رسیده و یا همزمان برای نشریه دیگری فرستاده شده باشند.
- مقاله‌ها باید به زبان فارسی و با رعایت اصول و آیین نگارش این زبان باشند.
- تأیید نهایی مقاله‌ها برای چاپ در نشریه، پس از نظرات داوران با هیئت تحریریه نشریه است.
- مسئولیت مطالب مطرح شده در مقاله به عهده نویسنده یا نویسندگان است.
- نشریه در پذیرش، رد یا ویرایش محتوای مقاله‌ها آزاد است. مقاله‌های دریافتی بازگردانده نخواهند شد.
- مقاله‌ها باید حاصل کار پژوهشی (Research Paper) نویسنده و یا نویسندگان باشند.
- مقاله باید دارای بخش‌های عنوان، نویسندگان، چکیده، کلمات کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، تشکر و قدردانی و فهرست منابع باشد.
- صفحه اول مقاله باید شامل نام و نام خانوادگی نویسنده (نویسندگان)، عنوان (رتبه علمی)، آدرس، تلفن، پست الکترونیکی نویسنده (نویسندگان)، عنوان مقاله، چکیده فارسی و واژه‌های کلیدی باشد.
- عنوان نوشتار باید کوتاه، گویا و بیان‌کننده محتویات نوشتار باشد.
- واژه‌های کلیدی مربوط به متن و عنوان مقاله بلافاصله بعد از چکیده و بین ۴ تا ۶ کلمه نوشته شود.
- مقاله‌ها باید دارای چکیده فارسی و انگلیسی باشند. چکیده مقاله باید شامل بیان مسأله، هدف، چگونگی پژوهش، موضوعات مقاله و یافته‌های مهم و نتیجه باشد. این بخش باید به‌تنهایی بیان‌کننده تمام مقاله و به‌ویژه نتایج به‌دست آمده باشد. اندازه چکیده فارسی و چکیده انگلیسی حداکثر ۳۰۰ کلمه است.
- جهت تایپ متن مقاله و عنوان قسمت‌های مقاله از قلم (فونت) BZar و (سایز) ۱۲ استفاده شود.
- در صورت نبودن معادل فراگیر فارسی برای واژه خارجی، آن را به زبان فارسی نوشته و اصل واژه به صورت پی‌نوشت با قلم Times New Roman با ضخامت ۱۰ آورده شود.
- تعداد صفحات مقاله حدود ۱۵ صفحه A4 (با درج شماره صفحه)، فاصله بین خطوط ۱ سانتی‌متر، حاشیه صفحات از بالا ۳ سانتی‌متر، پایین ۲ سانتی‌متر و طرفین ۲/۵ سانتی‌متر باشد.
- مقاله‌ها باید در فرم دو ستون عمودی نگارش گردند.
- نتیجه نوشتار باید به گونه‌ای منطقی و مفید که روشن‌کننده بحث و ارائه یافته‌های تحقیق باشد، ارائه گردد.
- در بخش تشکر و قدردانی، راهنمایی و کمک‌های دیگران یادآوری شده و به‌طور خلاصه از آن‌ها سپاسگزاری گردد.
- پی‌نوشت‌های مقاله (اصطلاحات و معادل‌های واژه‌ها، توضیحات و غیره) می‌باید در متن به ترتیب شماره گذاری شده و در پایان همان صفحه به صورت پاورقی ارائه شود. شماره پاورقی‌ها در هر صفحه باید از ۱ شروع شود.
- فهرست منابع به ترتیب الفبایی نام خانوادگی در انتهای مقاله می‌آید.
- مقاله‌ها می‌بایست به فراخور شامل شکل و جدول واضح و گویا با دقت 300dpi و با فرمت jpg و در محل مناسب در مقاله باشند.
- چنانچه مقاله دارای چند نویسنده باشد، تمامی نویسندگان می‌بایست کتباً یک نفر را به عنوان نماینده جهت انجام مکاتبات به دفتر نشریه معرفی نمایند.

توجه

- نویسندگان می‌توانند فایل الگوی نگارش مقاله‌های فصلنامه را با مراجعه به سایت نشریه به آدرس daneshpajooan.ac.ir دریافت و یا جهت کسب اطلاعات بیشتر با آدرس الکترونیکی suinjournal@daneshpajooan.ac.ir مکاتبه نمایند.



فصلنامه علمی تخصصی پژوهشی صنعت پایدار
سال اول، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱

صاحب امتیاز: موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو
مدیرمسئول: دکتر سیده راضیه انوری
سر دبیر: دکتر سید محمود منیرواقفی

هیات تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر مجید الیاسی، دانشیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دکتر سیده راضیه انوری، استادیار موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو
دکتر علی زینل همدانی، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر فتح اله کریم زاده، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر محمدعلی گل‌عذار، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر شهرام لنجان نژادیان، استادیار دانشگاه اصفهان
دکتر بهروز موحدی، دانشیار دانشگاه اصفهان

داوران و همکاران این شماره (به ترتیب حروف الفبا)

دکتر فرشید آقاداتودی	دکتر مهدی صفری
دکتر مصطفی ابویی	دکتر محسن عباسی
دکتر مجید الیاسی	مهندس صفورا عشاقی
دکتر سیده راضیه انوری	دکتر محمدرضا لقمانیان
دکتر سیده زهرا انوری	مهندس محمدرضا مقومی
دکتر محمد تقی رضوان	دکتر محمد مونسان

مدیر داخلی: مهندس مریم طائف نیا

صفحه آرا: فاطمه محمدی

مدیر تولید نشر: مهندس محمد رضا مقومی

ویراستار فارسی: دکتر سیده راضیه انوری، مهندس محمد رضا مقومی

ویراستار انگلیسی: دکتر سیده راضیه انوری

نشانی نشریه: اصفهان، بلوار کشاورز، چهار راه مفتح، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

تلفن: ۰۳۱-۳۷۷۷۹۹۱۴، داخلی ۳۰۷

نمابر: ۰۳۱-۳۷۷۵۳۲۴۸

وب سایت نشریه: daneshpajooan.ac.ir

پست الکترونیکی: suinjournal@daneshpajooan.ac.ir

این شماره زیر نظر معاونت پژوهش موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو در جهت اخذ مجوز علمی از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در تابستان ۱۴۰۱ منتشر گردید. این شماره به همت هیات تحریریه، هیات داوران و کارگروه اجرایی فصل نامه در موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو آماده شده است. از همه فرهیختگان، استادان، دانشجویان و صاحب نظران صنعت پایدار دعوت می‌شود مطالب و نظرات خود را به این فصلنامه ارائه نمایند.

- ۱ طراحی و بررسی امکان ساخت مکانیزم خزش ربات متحرک
درون لوله با محرک پنوماتیک
مریم علیزاده، محمد گهري، مجيد رجایی
- ۱۳ اثر تغلیظ لحیم‌های بدون سرب توسط افزودن عنصر نیکل در
تشکیل ترکیبات میانی موجود با سطح مس نقره اندود شده
صفورا عشاقی، سیدمحمد رضا لقمانیان
- ۲۱ بررسی اثر نیروی کازمیر بر رفتار میکروتیر با استفاده
از روش هموتویی بهینه شده
علی تاجمیری، محمد رضا مقومی
- ۳۳ بررسی نقش شتاب حرکتی و گرانش زمین در تئوری
معادلات حرکتی موشک‌های چند مرحله‌ای ماهواره‌بر
محمد رضا مقومی، آبتین شمیلی، محمود محمدخانی، نسا زمانی بختیاروند
- ۴۱ مدل‌سازی دینامیکی ربات بالارونده سندبلاست
محمد گهري، محدثه رمضی، نیما همتا
- ۵۵ ارزیابی تاثیر پارامترهای جوشکاری *TIG* بر تشکیل
ترک در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴
سیده راضیه انوری، محمد رضا نصرافهانی، سعید احمدی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱/۲۲

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه ۱-۱۲

طراحی و بررسی امکان ساخت مکانیزم خزش ربات متحرک درون لوله با محرک پنوماتیک

مریم علیزاده^۱؛ محمد گهری^{۲*}؛ مجید رجایی^۳

چکیده

لوله‌ها در صنعت کاربرد گسترده‌ای دارند. از این رو در ابعاد و جنس‌های مختلف ساخته می‌شوند. این لوله‌ها به مرور زمان دچار رسوب‌گذاری، خوردگی، نشتی، شکست و مشکلاتی از این قبیل می‌شوند. این عوامل موجب کاهش بازدهی و تحمیل هزینه‌های بسیار می‌گردد. به همین علت نیاز به بازرسی ضروری می‌باشد. در این مقاله به طراحی و بررسی امکان ساخت مکانیزم حرکتی خزشی ربات درون لوله با محرک پنوماتیک به صورت تجربی و تئوری پرداخته می‌شود. ابتدا طراحی مفهومی سامانه حرکتی ربات صورت گرفته است و معادلات حرکت استخراج شد. سپس با توجه به شبیه‌سازی اولیه در نرم‌افزار *Solidworks* بدنه ربات ساخته گردید. در این مطالعه طراحی مکانیزم حرکت ربات درون لوله به صورت خزش و پنوماتیک در نظر گرفته شد به گونه‌ای ربات بتواند درون لوله حرکت کند و از زانویی‌ها به راحتی عبور نماید. انطباق‌پذیری با شرایط فیزیکی لوله منجر به افزایش کاربری آن نظیر ورود به لوله‌های سمی و گاه باریک و پرپیچ و خم می‌شود. پس از استخراج معادله حاکم بر حرکت، ربات در آزمایشگاه در لوله‌های شفاف افقی، شیب‌دار و دارای زانویی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از تغییرات فشار بر روی گام حرکتی ربات و سرعت بدست آورده شد. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصله، نتایج تئوری و تجربی مقایسه شدند که تطابق خوبی مشاهده گردید. نتایج نشان داد که افزایش فشار موجب افزایش سرعت و گام حرکتی ربات می‌گردد. علاوه بر این، ربات پیشنهادی توانایی حرکت در لوله‌های عمودی و شیب‌دار را دارد و به راحتی می‌تواند از زانویی‌ها عبور کند. هم‌چنین ماژول کششی قابلیت خمش هنگام عبور از خم‌ها و زانویی‌ها را دارد.

واژه‌های کلیدی

ربات بازرسی لوله، حرکت خزشی، ربات با محرک پنوماتیک، حرکت پنوماتیکی

۱ - کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

۲ - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

* نویسنده مسئول: Moh-gohari@araku.ac.ir

۳ - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

گرفته شدند (Anthierens et al. 1999, Bertetto and Ruggiu 2001). مکانیزمهای کرم مانند به علت ساخت آسان، هزینه کم و راحتی عمل آنها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. مکانیزم حرکتی کرم مانند حداقل به سه محفظه جداگانه شامل بست عقب، ماژول کششی و بست جلو نیاز دارد (Phee et al. 2002, Carrozza et al. 1996).

ربات‌های انعطاف‌پذیر کاربردهای مختلفی دارند (Pack et al. 1997, Fukuda et al. 1989, Ismail et al. 2012). این نوع ربات قادر به کار در محیط‌های غیرساختاری با توجه به سازگاری افزایش یافته‌ی آنها، حتی تحت شرایط سخت مانند رادیواکتیو، میدان الکترومغناطیسی، گرادیان‌های دمایی بالا هستند. به همین دلیل این ربات‌ها می‌توانند به راحتی جهت تمیز نمودن اتاق‌ها و محیط زیست مورد استفاده قرار گیرند.

علاوه بر این، از آنجایی که ربات‌های انعطاف‌پذیر اغلب نیاز به برق ندارند، به نظر می‌رسد که برای کاربردهایی که در معرض خطر انفجار قرار دارند، مناسب هستند. نگهداری و تشخیص عیوب لوله‌ها هدفی مناسب جهت استفاده از ربات‌های بازرسی چند درجه می‌باشد. انعطاف‌پذیری و سازگاری ویژگی‌های اساسی است که ربات باید داشته باشد. برخی از ربات‌های بازرسی لوله با استفاده از ساختارهای انعطاف‌پذیر ساخته شده‌اند. فوکودا و همکارانش مارک دو^۵ را ساختند (Fukuda et al. 1989). این ربات از سه قسمت صلب تشکیل شده است. چهار موتور، اتصال ربات را به دیواره داخلی لوله فراهم می‌کند. ربات اندوسکوپی انعطاف‌پذیر برای تشخیص و درمان توسط گروه تحقیقاتی کالتیج^۶ ساخته شده است (Slatkin and Burdick 1999). اندوسکوپ توسط هوای فشرده هدایت می‌شود و دارای یک منبع نوری به منظور روشن‌سازی منطقه مقابل آن است. روه و همکاران

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت‌های علمی، اتوماسیون فرآیندها و کارهای صنعتی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است به طوری که موجب شده است انسان نقش کمتری را در فرآیندهای مختلف ایفا نماید. استفاده از سیستم‌های هوشمند و ربات‌ها به عنوان یکی از ابزارهای اتوماسیون موجب کاهش هزینه و افزایش بازدهی، سرعت، دقت و امنیت فرآیندهای مختلف گردیده است. یکی از کاربردهای مهم ربات‌ها، استفاده از آنها در شرایط سخت و خطرناک و همچنین مکان‌های غیرقابل دسترسی به جای انسان می‌باشد که به موجب این مزیت، استفاده از این اتوماسیون‌های پیشرفته با رشد چشمگیری همراه بوده است. با توجه به گستردگی کاربرد خطوط لوله در صنایع گوناگون و معضل بازرسی این خطوط در صنعت، حجم گسترده‌ای از تحقیقات صورت گرفته بر روی ربات‌های بازرسی لوله متمرکز شده است. تحقیقات بسیاری از گذشته تاکنون در مورد استفاده از ربات‌ها با مکانیزم‌های متفاوت جهت انجام عمل بازرسی در لوله‌ها صورت گرفته است که هر کدام از آنها با توجه به شرایط خاص بهره‌برداری از ربات و با ویژگی‌های متفاوت ساخته شده‌اند. توسعه صنایع مدرن ماشین‌آلات و ابزار مکانیکی - حرکتی پیچیده در لوله برای بازرسی آنها نیاز به مکانیزم‌های حرکتی در ابعاد بزرگ و کوچک داخل لوله دارند (Suzuki and Satoh 1999, Suzumori et al. 1995).

استفاده از موتورهای معمولی برای تحقیقات وسایل پیچیده مناسب نیستند. تحقیقات میکرو و مکانیزم حرکتی با موتورهای میکرو (Kawakita et al. 1997, Idogaki et al. 1995) و محرک‌های هوشمند بر اساس موادی مانند آلپاژ پیزو (Kim et al. 2005, Lee et al. 2004) و آلپاژ حافظه‌دار (AMS) و موتورهای پنوماتیکی به کار

4- Front Clamp
5- Mk2
6- CALTECH

1- Shape Memory Alloy
2- Rear Clamp
3- Bongation Module

دارای انشعاب پرداختند (Kang et al. 2013). دسته‌ای دیگر از مطالعات بر روی توسعه و تحلیل ربات‌های الهام گرفته از طبیعت انجام شده است.

لیو و همکارانش حرکت یک میکروروبات با محرک آلیاژ حافظه‌دار را با حرکت یک زالوی درمانی در یک خط لوله شبیه‌سازی نمودند (Liu et al. 2002). بدین منظور برای حرکت در یک لوله به قطر ۲۵ میلی‌متر، یک میکروروبات بر پایه محرک آلیاژ حافظه‌دار و ترکیب پایه‌های الاستیک و فنرهای خطی طراحی نمودند.

ویرگالا و همکارانش به بررسی حرکت یک ربات در داخل لوله با استفاده از محرک آلیاژ حافظه‌دار پرداختند (Virgala et al. 2013). آن‌ها در این پژوهش با به دست آوردن معادلات دینامیک ربات و با استفاده از روش نیوتن حرکت ربات در داخل لوله‌ای با قطر ۱۳ میلی‌متر را با بکارگیری محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار محقق نمودند. کیم و همکاران با استفاده از محرک آلیاژ حافظه‌دار یک میکروروبات از نوع کپسولی و با کاربرد پزشکی طراحی نمودند (Kim and Lee 2005).

کورینی و همکاران نیز مکانیزمی با استفاده از پاهای انعطاف پذیر و سیستم محرکه یک موتور گیربکس برای کنترل و حرکت پاها در مجاری باریک طراحی نمودند (Quirini and Scapellato 2008). یاگوچی و همکارانش یک محرک مغناطیسی با نیروی محوری بسیار بالا که قابلیت حرکت رفت و برگشتی در لوله را داشت، طراحی کردند (Yaguchi and Kamata 2012). تحقیق طراحی دیگری توسط برتو و همکارانش صورت گرفت (Bertetto and Ruggiu 2001). آنان یک ربات انعطاف پذیر پنوماتیکی جهت بازرسی لوله طراحی و مورد آزمایش قرار دادند. یک مدل دینامیکی برای محاسبه انعطاف پذیری، میرایی و اصطکاک استفاده شد. آزمایشاتی به منظور تعیین مشخصات ربات و فراهم نمودن ورودی برای مدل عددی انجام گردید. به منظور اعتبارسنجی مدل،

مکانیزم‌های مختلف ربات‌های بازرسی را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند (Roh et al. 2009). میراتس و همکاران مروری بر طرح‌های رباتیکی به منظور بازرسی لوله‌ها انجام دادند و با بررسی مشکلات موجود، طرح‌های مختلف جهت افزایش قابلیت و کارایی ربات‌های جستجوگر لوله را توسعه دادند (Mirats et al. 2010). تحقیقاتی نیز بر روی طراحی ربات و اجزاء آن با هدف ساخت یک ربات بسیار کوچک برای بازرسی لوله‌های با قطر کم صورت گرفته است (Neubauer 1994).

برخی از کارها بر روی ایجاد یک ربات با قابلیت تحرک بالا، دسترسی مناسب به محیط و توانایی استفاده از سنسورهای متفاوت برای تعیین وضعیت خطوط لوله، انجام شده است (Park et al. 2011). گامبو و همکاران رباتی جهت بازرسی کانال‌های با قطر کم طراحی نمودند که قادر بود در لوله‌های با قطر ۳۵ میلی‌متر حرکت کند (Gambao et al. 2005). این ربات با توجه به دوربینی که در ابتدای ربات نصب شده است، قابلیت عکس‌برداری از داخل لوله جهت تشخیص عیوب را دارا بود. چوی و همکاران یک ربات فرمان‌پذیر برای حرکت در داخل لوله طراحی نمودند (Choi et al. 2007). این مکانیزم از پایه‌های چرخ‌دار مکانیکی ساخته شده که حرکت چرخ‌ها قابل کنترل بوده و امکان حرکت در مسیرهای زانویی و دارای خم را فراهم می‌کند. کارهایی نیز بر روی هوشمندسازی عملیات بازرسی به وسیله ربات و استفاده از الگوریتم‌های فازی در بازرسی محیط صورت گرفته است.

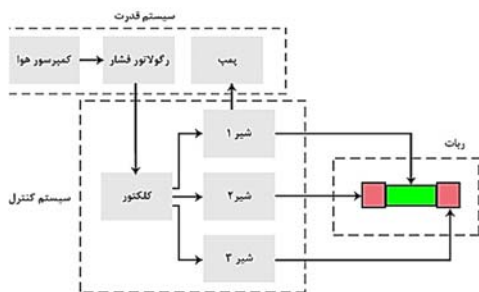
سبزه‌میدانی و همکاران به بررسی کنترل و مدل‌سازی یک ربات جهت بازرسی در داخل لوله پرداختند (Sabzehmeidani et al. 2010). آن‌ها در این تحقیق یک میکروروبات کرم‌مانند هوشمند جهت استفاده در لوله‌ها با کنترل نیروی فعال، مدل‌سازی و شبیه‌سازی نمودند. کانگ و همکاران با تعیین درجات آزادی یک ربات به بررسی حرکت و کنترل آن در داخل لوله‌های

سطح داخلی لوله و از توانایی حرکت در لوله ها با قطرهای مختلف برخوردار باشد.

۲- طراحی سامانه حرکتی ربات

سامانه حرکت ربات به صورت خزش در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به این خواسته، حرکت کرم مانند ربات با استفاده از سه بخش مختلف محقق گردید که شامل بست انبساط بادی عقب، ماژول کششی و بست انبساط بادی جلو می باشد. ابتدا بست عقب منبسط می شود و سپس ماژول کششی در راستای حرکت منبسط می شود. در این حالت بست جلو فعال شده و به دیواره لوله فشار وارد می کند. با خروج هوا از بست عقب و انقباض ماژول کششی حرکت ربات فراهم می گردد.

سامانه حرکت ربات همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، از سه سیستم مختلف تشکیل شده است، شامل سیستم قدرت که فشار پنوماتیک را فراهم می کند، سیستم کنترل که زمان ارسال فشار پنوماتیک را مدیریت می کند و ربات که درون لوله حرکت می کند، می باشد. سیستم قدرت دارای رگولاتور است که سطح فشار پنوماتیک را کنترل می کند و یک کمپرسور که فشار پنوماتیک مورد نیاز را فراهم می نماید. به علاوه از یک پمپ به منظور انقباض ماژول کششی استفاده شده است.

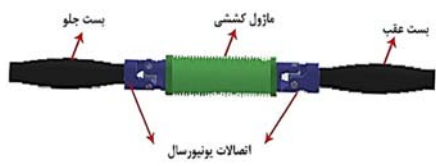


شکل (۱). دیاگرام شماتیک سیستم ربات

سیستم کنترل ربات شامل سه شیر دو وضعیت سه راهه و یک کلکتور است. کنترل سیستم به صورت دستی انجام می شود. با توجه به اینکه ربات از سه قسمت تشکیل شده است، لذا سه خط پنوماتیکی جهت تغذیه ربات مورد نیاز

حرکت تجربی و عددی ربات در حوزه زمان مقایسه گردید. هم چنین حرکت ربات در لوله های شفاف با هندسه های مختلف ارائه گردیده است. در این مطالعه بیشتر بر روی فائدهای تحریک و بکار انداختن ربات و فرض بر ساختار کنترل حلقه باز که شامل اطلاعات فیدبک سنسوری و الگوریتم کنترل برای وظایف کاربردی بحرانی نیست، متمرکز شده است. چون و همکارانش یک آلیاژ حافظه شکل طراحی و پیشنهاد کردند تا یک مکانیزم که بر اساس کوپلینگ صلب-فنر با محرک SMA، جهت به حرکت درآوردن میکروچرخ های ربات در خط لوله استفاده شود (Jun et al. 2004).

با توجه به شرایط و محیط های متنوع و همچنین عیوب گوناگونی که در صنایع مختلف وجود دارد امکان ساخت یک ربات که قابلیت استفاده در همه موقعیت ها را داشته باشد، وجود ندارد. از این رو باید از مکانیزم های متفاوتی با توجه به نوع کاربری مورد نظر استفاده کرد که این کار نیازمند بکارگیری از روش های مختلف بوده که به نوبه ی خود دارای هزینه هست. در کارهای گذشته ابتدا ربات های چرخ دار بدون مکانیزم تطبیق برای این منظور مورد استفاده قرار می گرفته است که در سطوح شیب دار و لوله های دارای رسوبات و همچنین لوله های با قطرهای مختلف دچار مشکل می شدند. برای رفع این مشکلات برای ربات های چرخ دار، مکانیزم تطبیق و اعمال نیرو به دیواره طراحی شده است. ولی افزودن مکانیزم تطبیق به ربات سبب پیچیده شدن آن شده است. به علاوه بسیاری از مکانیزم های ارائه شده برای بکارگیری در قطرهای متنوع تر دارای ساختار پیچیده ای بوده که فرآیند ساخت و کنترل آن ها را مشکل می کند. بخصوص برای مجاری باریک تدبیر مؤثری ارائه نشده است. در این مطالعه مکانیزم حرکت ربات درون لوله به منظور دستیابی به حرکت رباتیک درون لوله های افقی، شیب دار و هم چنین زانویی با ساختار ساده و بر اساس استفاده از محرک پنوماتیکی به منظور بازرسی از مجاری باریک طراحی می گردد. به نحوی که از قابلیت انطباق با



الف



ب

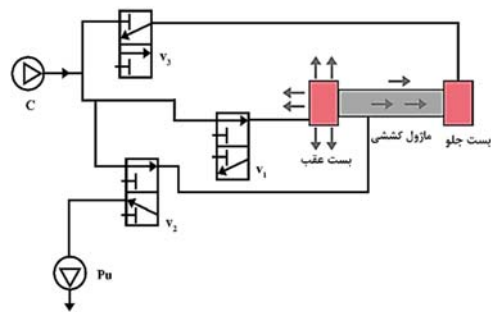
شکل (۳). ربات کرم مانند الف) شبیه سازی اولیه ربات در نرم افزار Solidworks ب) مدل ساخته شده و اجزای آن

بخش های مختلف ربات دارای ابعاد و اندازه های متفاوتی است. مشخصات ابعادی ربات در جدول ۱ ذکر گردیده است.

جدول (۱). مشخصات ربات مدل سازی شده

اندازه (mm)	اجزاء	پارامتر
۳۵	ماژول کششی	قطر
۵	ورودی بست عقب	
۵	ورودی بست جلو	
۱۰۰	بست انبساط بادی عقب و جلو	طول
۱۶۰	ماژول کششی در حالت انقباض	
۲۲۰	ماژول کششی در حالت انبساط	
۱۰۰	بست انبساط بادی جلو	
۱۰۰	جلو	

می باشد. به منظور کنترل فشار ورودی از کمپرسور، شیر کنترل دو وضعیت سه راهه در مسیر هر یک از خطوط پنوماتیکی استفاده می شود که قابلیت تغییر جهت جریان و مقدار آن را دارد. در شکل ۲ مدار پیشروی ربات به سمت جلو نشان داده شده است. مشخص است که در این لحظه شیرهای V_1 و V_2 مسیر جریان را به سمت به ترتیب بست عقب و ماژول کششی هدایت می کنند و شیر V_3 جریان را به محیط تخلیه می کند. پمپ تخلیه (P_{II}) در زمان انقباض ماژول کششی فعال می شود.

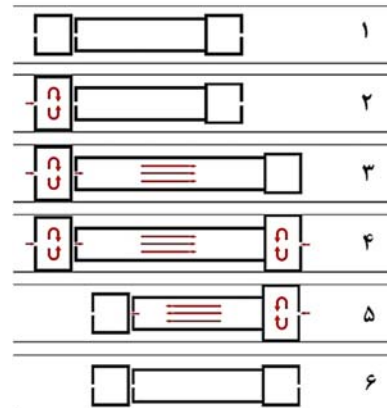


شکل (۲). مسیر جریان و جهت حرکت اجزاء در حالت پیشروی

در این ربات پیشنهادی از دو بست انبساط بادی در ابتدا و انتهای خود استفاده شده است و یک ماژول کششی دیگر در وسط این دو بست انبساط بادی قرار می گیرد. در ابتدا جهت دستیابی به پیکربندی مناسب، شبیه سازی اولیه در نرم افزار Solidworks انجام شد که در شکل ۳ قسمت الف قابل مشاهده است. سپس ساخت ربات بر اساس شبیه سازی اولیه صورت گرفت. بست های عقب و جلو از تیوپ ساخته شده اند که بوسیله اتصالات یونیورسال به ماژول کششی متصل گردیده اند. اتصال یونیورسال به ربات کمک می کند که به راحتی از خم و پیچ ها عبور کند. هر یک از بست های عقب و جلو و هم چنین ماژول کششی با استفاده از یک خط پنوماتیکی تغذیه می شوند. در شکل ۳ قسمت ب ربات ساخته شده و اجزای آن قابل مشاهده است.

۳- مکانیزم حرکت

مکانیزم حرکت ربات این گونه است که ابتدا بست انبساط بادی عقب توسط کمپرسور منبسط می‌شود. در این صورت بست انبساط بادی عقب که از تیوپ ساخته شده است با دیواره داخلی لوله ثابت می‌شود و مانند یک بست عمل می‌کند. سپس هوا توسط کمپرسور وارد ماژول کششی شده و در نتیجه آن به سطح مقطع ماژول کششی نیرو وارد می‌شود و آن را به جلو می‌راند. در این هنگام بست انبساط بادی جلو وارد عمل شده و حرکتی مشابه با بست انبساط بادی عقب صورت می‌گیرد. سپس بست انبساط بادی عقب با خروج هوا از آن مجدداً به وضعیت اولیه خود باز می‌گردد و در نتیجه آن اتصال خود را با دیواره داخلی لوله از دست می‌دهد. در این هنگام با خروج هوا از ماژول کششی، ماژول کششی و به دنبال آن بست انبساط بادی عقب به سمت جلو رانده می‌شوند. به عبارتی با معکوس شدن جریان هوا و آزادسازی قسمت عقب، ربات به اندازه یک گام به جلو حرکت می‌کند. پس از آن بست انبساط بادی جلو نیز آزاد می‌شود و یک گام حرکتی ربات بدست می‌آید. این سیکل تکرار می‌شود و ربات درون لوله حرکت می‌کند. شماتیک این گام حرکتی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه شکل مشخص است که حالت‌های ۶ و ۱ یکسان هستند.



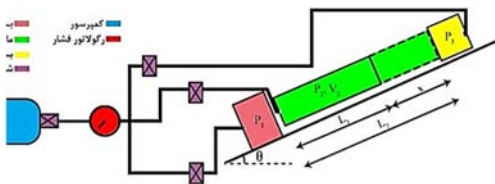
شکل (۴). شماتیک فائده کار مکانیزم حرکت ربات

۴- معادلات سیستم

معادلات سیستم در دو حالت حرکت در لوله شیب‌دار و افقی بررسی گردید.

۴-۱- معادلات سیستم در سطح لوله شیب‌دار

سیستم تغذیه و تغییر شکل بخش میانی ربات در شکل ۵ مشاهده می‌شود. P_0 و T_0 فشار و دمای کمپرسور، P_1 و T_1 فشار بست عقب، P_2 و T_2 فشار و دمای ماژول کششی و P_3 و T_3 فشار و دمای بست جلو می‌باشند.



شکل (۵). حرکت در سطح شیب‌دار

مقادیر اولیه برخی از پارامترهای طراحی در جدول ۲ **Error! Reference source not found.** ذکر گردیده است.

جدول (۲). مشخصات ربات مدل سازی شده

پارامتر	اندازه	واحد
V_0	۱/۵	m^3
A_2	$961/625 \times 10^{-2}$	m^2
m	۰/۴۵۰	kg
L_1	۱۶	cm
L_2	۲۲	cm
μ	۰/۳	---

اگر V_0 و V_2 به ترتیب حجم کمپرسور و ماژول کششی در هر لحظه باشد و فرض اینکه فرآیند در دمای ثابت انجام می‌شود، با توجه به شکل و معادله‌ی حالت می‌توان نوشت:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

با ساده‌سازی داریم:

$$P_2 = \frac{T_2}{T_0 V_2} P_0 V_0 \quad (2)$$

۳-۴- اندازه‌گیری سختی ربات

به منظور اندازه‌گیری میزان سختی ربات از ستون مدرج و وزنه استفاده شد. ربات به عنوان فنر در راستای عمودی به گیره آویخته شد. سپس وزنه به انتهای ربات متصل گردید. در این حالت بر اساس قانون هوک در حالت تعادل می‌توان نوشت:

$$kx_l = Mg \quad (10)$$

$$k = \frac{Mg}{x_l} \quad (11)$$

که در آن M و x_l و k به ترتیب جرم مجموعه ربات و وزنه و میزان کشش ربات در راستای عمودی و سختی ربات است.

مطابق با معادله ۱۱ و جایگذاری مقادیر اولیه، جدول ۲ به صورت زیر تدوین شده است.

جدول (۲). مشخصات ربات مدل‌سازی شده

پارامتر	اندازه	واحد
M	۲/۴	kg
x_l	۶	cm
k	۴۰۰	N/m

۵- نتایج

ربات کرم‌مانند با توجه به نحوه عملکرد آن در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اراک مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایشات در لوله شفاف افقی و در لوله‌ای دارای زانویی و شیب‌دار، انجام شد. منحنی‌های گام حرکت ربات بر حسب فشار، همچنین سرعت بر حسب فشار و دما مطابق با معادلات و آزمایشات تجربی استخراج شده است. سپس نتایج آزمایشگاهی و تئوری جهت اعتبارسنجی نتایج و کسب اطلاعات بیشتر از نحوه عملکرد ربات با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

نحوه چیدمان شیرهای کنترل در آزمایشگاه و مدار آن در شکل ۷ قابل مشاهده است.

اگر نیروی کل وارد شده را برابر F_T در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$F_T = F_2 - \mu N - mg \sin \theta \quad (3)$$

$$F_2 = kx \quad (4)$$

با ساده‌سازی معادله (۳) بدست می‌آید.

$$P_2 A_2 = kx - \mu N - mg \sin \theta \quad (5)$$

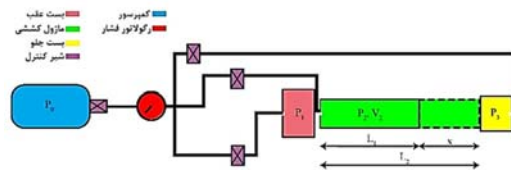
با توجه به معادلات (۲) و (۵) معادله (۶) بدست می‌آید.

$$x = \frac{1}{k} \left(\frac{T_2}{T_0 V_2} P_0 V_0 A_2 + \mu N + mg \sin \theta \right) \quad (6)$$

$$N = mg \cos \theta \quad (7)$$

۴-۲- معادلات سیستم در سطح لوله افقی

در حقیقت معادلات در سطح افقی همان معادلات حرکت در سطح شیب‌دار است، با این تفاوت که مقدار θ در معادله (۶) برابر با صفر باشد، آنگاه معادلات حرکت در حالت سطح افقی بدست می‌آید. سیستم تغذیه و تغییر شکل بخش میانی ربات در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است P_0 و T_0 فشار و دمای کمپرسور، P_1 و T_1 فشار بست عقب، P_2 و T_2 فشار و دمای مازول کششی و P_3 و T_3 فشار و دمای بست جلو همانند بخش قبل در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۶). سیستم تغذیه ربات جابجایی مازول کششی

با توجه به معادله (۷) و جایگذاری $\theta = 0$ معادله (۸) حاصل می‌شود.

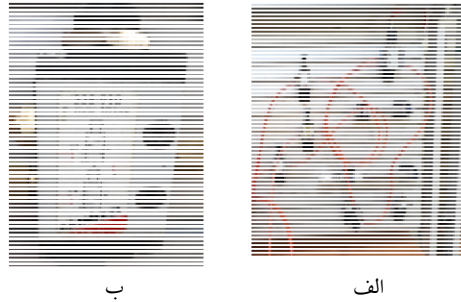
$$x = \frac{1}{k} \left(\frac{T_2}{T_0 V_2} P_0 V_0 A_2 + \mu N \right) \quad (8)$$

$$N = mg \quad (9)$$

به منظور بررسی حرکت ربات درون لوله و عبور از خم‌ها، به لوله شفاف، زانویی با زاویه‌ی ۴۵ درجه اضافه گردید. این لوله به گونه‌ای بر روی زمین نصب شد که با سطح افقی زاویه‌ی ۴۵ درجه ایجاد نماید. هدف از این بخش ارزیابی حرکت ربات بر خلاف نیروی جاذبه‌ی زمین و عین حال عبور از زانویی می‌باشد.

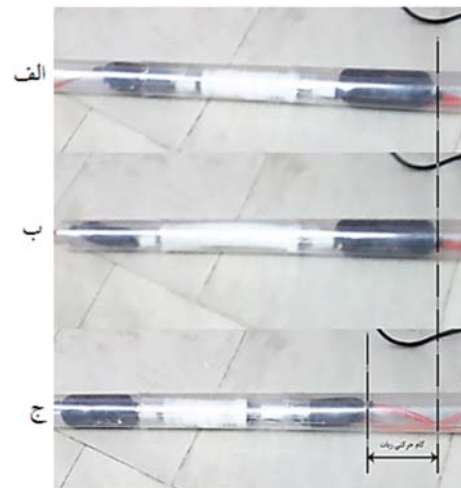
در شکل ۹ ربات در مسیر عبور از زانویی و حرکت در مسیر خلاف جاذبه زمین، تحت زاویه‌ی ۴۵ درجه نشان داده شده است. در شکل ۹ قسمت الف، در حالت ۱ ربات در آستانه‌ی ورود به زانویی قرار دارد. در این حالت بست عقب با دیواره‌ی لوله ثابت شده است. در حالت ۲ در عین حال که بست عقب با دیواره‌ی لوله ثابت است، ماژول کششی به سمت جلو رانده شده است. در این حالت بخشی از ربات شامل بست جلو و اتصال یونیورسال آن وارد زانویی گردیده است. در حالت ۳ بست جلو با دیواره‌ی لوله ثابت می‌باشد، با معکوس شدن جریان هوا بست عقب تخلیه شده و ماژول کششی نیز منقبض شده است. در نتیجه ربات به اندازه‌ی یک گام به سمت جلو حرکت کرده است. در این قسمت ب گام دوم حرکت ربات حاصل شده است. در این حالت ماژول کششی وارد زانویی لوله شده است و ربات در حال حرکت در مسیر لوله با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به افق است. در قسمت ج ماژول کششی از زانویی عبور کرده است. با توجه به شکل ۹ ربات قادر به حرکت در مسیر لوله‌ها تحت زوایای مختلف می‌باشد و از زانویی‌ها و خم‌ها به راحتی عبور می‌کند.

به منظور بررسی اثر فشار بر گام حرکتی ربات، مقدار گام جابجایی ربات به ازای فشارهای مختلف اندازه‌گیری شد. این نتایج در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. با توجه شکل مشخص است که گام حرکتی ربات با افزایش فشار افزایش می‌یابد که این موضوع منطقی می‌باشد. حداکثر گام ربات مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده که برابر با حداکثر طول ماژول کششی است، برابر ۶ cm است که در آزمایش مقدار ۵/۸ cm بدست آمد. بنابراین می‌توان گفت



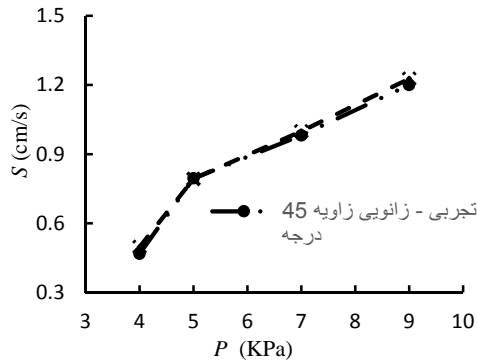
شکل (۷). الف) آرایش شیرهای کنترل جریان در سیستم ب) بزرگنمایی شیر کنترل جهت جریان به همراه مدار آن

آزمایشات در لوله‌ای به قطر ۵ cm و در فشارهای مختلف صورت گرفت. در بررسی‌های صورت گرفته میزان گام حرکتی ربات بدست آمد. در شکل ۸ کلیپ حرکت ربات در یک گام حرکتی درون لوله شفاف در سطح افقی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۸ قسمت الف، بست عقب به سطح داخلی لوله متصل شده است. در قسمت ب در عین حال که بست عقب به دیواره داخلی لوله فشار وارد می‌کند، ماژول کششی منبسط شده است و در قسمت ج بست جلو فعال شده و بست عقب و ماژول کششی منقبض گردیده اند. در این حالت گام حرکتی ربات بدست آمده است.



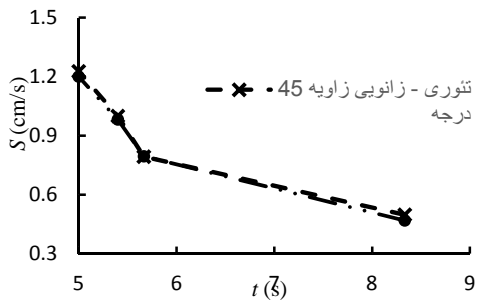
شکل (۸). حرکت ربات درون لوله شفاف

سرعت متوسط حرکت بر اساس گام حرکت ربات در واحد زمان که با کرنومتر اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. در شکل ۱۱، منحنی تغییرات سرعت بر حسب فشارهای مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش فشار، سرعت نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۱۱). مقایسه سرعت متوسط ربات بر حسب فشارهای مختلف در لوله شیب‌دار و دارای زانویی

در شکل ۱۲ سرعت حرکت ربات به ازای زمان‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنومتر نشان شده است. مطابق شکل با کاهش فشار، زمان انجام فرآیند افزایش می‌یابد. به دنبال آن، سرعت حرکت ربات کاهش محسوسی داشته است، تا جایی که در فشار 4 KPa ، سرعت به 0.47 cm/s می‌رسد و مدت زمان فرآیند نسبت به فشار ماکزیمم $3/33\text{ s}$ افزایش داشته است.

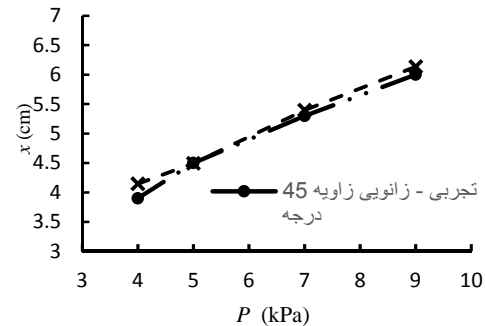


شکل (۱۲). مقایسه سرعت متوسط ربات بر حسب زمان در فشارهای مختلف در لوله شیب‌دار و دارای زانویی

که فشار 9 KPa فشار مناسبی برای بدست آوردن حداکثر جابجایی در یک گام هست.



شکل (۹). حرکت ربات درون لوله با زانویی 45° درجه و زاویه نسبت به خط افق (الف) در آستانه ورود به زانویی (ب) پیشروی در زانویی (ج) پیشروی در زانویی و حرکت در مسیر قائم



شکل (۱۰). مقایسه گام حرکتی ربات بر حسب فشارهای مختلف در لوله شیب‌دار و دارای زانویی

۶- بحث و نتیجه گیری

<p>۲- فهرست علائم</p> <p>سطح مقطع ماژول کششی (m^2) کمپرسور سختی ربات (Nm^{-1}) جرم ربات (kg) جرم مجموعه ربات و وزنه (kg) نیروی عمودی تکیه گاه (N) فشار (Pa) فشار گاز داخل کمپرسور (Pa) فشار بست عقب (Pa) فشار ماژول کششی (Pa) فشار بست جلو (Pa) سرعت (cms^{-1}) زمان (s) دمای گاز داخل کمپرسور (K) دمای بست عقب (K) دمای ماژول کششی (K) حجم کمپرسور (m^3) حجم ماژول کششی (m^3) شیر ورودی و خروجی بست جلو گام حرکت ربات (cm) میزان کشش ربات در راستای عمودی (cm)</p> <p>علائم یونانی</p> <p>زاویه (degree) ضریب اصطکاک</p> <p>مراجع</p> <p>-Anthierens C., A.Ciftci and M. Betemps 1999. Design of an electro pneumatic micro robot for in-pipe inspection, In: Proceedings of the IEEE international symposium on ISIE'99, vol. 2: 968-972.</p> <p>-Bertetto A. M. and M. Ruggiu 2001. In-pipe inchworm pneumatic flexible</p>	<p>A ربات‌های بازرس لوله برای پوشش‌دهی کارها در</p> <p>C محیط‌های غیر قابل دسترس انسان و محیط‌های خطرناک</p> <p>k طراحی شده‌اند. با وجود این محدودیت‌ها، بازرسی لوله‌ها</p> <p>m بسیار لازم و جدی می‌باشند، زیرا با گذر زمان لوله‌ها به</p> <p>M تدریج کارایی اولیه خود را از دست می‌دهند و بدون</p> <p>N تمهیدات پیشگیرانه ممکن است خطرات جبران‌ناپذیری را</p> <p>P به همراه داشته باشد. علاوه بر این هزینه پیشگیری و</p> <p>P_0 تعمیرات بسیار کمتر از هزینه خرید مجدد و تولید هست.</p> <p>P_1 با توجه به موارد ذکر شده، یک ربات کرم‌مانند برای</p> <p>P_2 بازرسی لوله در این مطالعه ارائه شده است. بررسی‌های</p> <p>P_3 زیادی تاکنون در زمینه بازرسی لوله‌ها به روش‌های مختلف</p> <p>S انجام شده است. ربات‌های میکرو به صورت ساده و ترکیبی</p> <p>t مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یک نوع جدید از این نوع</p> <p>T_0 ربات‌ها در این مطالعه پیشنهاد شد. سیستم کلی ربات عبارت</p> <p>T_1 است از سیستم قدرت، سیستم کنترل و بدنه ربات. این ربات</p> <p>T_2 از سه قسمت پنوماتیکی تشکیل شده است. قسمت اول و</p> <p>V_0 سوم شامل بست عقب و جلو با توجه به کاربرد آن، از تیوپ</p> <p>V_2 ساخته شده‌اند. از شیرهای کنترل نیز جهت تنظیم جریان</p> <p>V_3 ورودی و خروجی به بخش‌های مختلف ربات استفاده شده</p> <p>x است. معادلات حرکت ربات استخراج گردید. هم‌چنین</p> <p>x_l ربات پیشنهادی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی</p> <p>اراک مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج تجربی و</p> <p>تئوری عملکرد ربات بررسی شد. با توجه به نتایج مشخص</p> <p>گردید که سرعت ربات می‌تواند با فشار و زمان سیکل</p> <p>تنظیم شود. در مدل ساخته شده نتایج آزمایشگاهی و تجربی</p> <p>به ازای فشارهای مختلف در لوله‌ای با قطر ۵ cm بدست</p> <p>آمدند. سپس نتایج تجربی و تئوری به منظور اعتبارسنجی</p> <p>نتایج با یکدیگر مقایسه شدند که تطابق خوبی بین آن‌ها</p> <p>مشاهده گردید. نتایج نشان داد ربات پیشنهادی توانایی</p> <p>حرکت در لوله‌های عمودی و شیب‌دار را دارد. به علاوه به</p> <p>راحتی می‌تواند از زانویی‌ها عبور کند و ماژول کششی</p> <p>قابلیت خمش هنگام عبور از خم‌ها و زانویی‌ها را دارد.</p>
---	--

Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology:310-315.

- Jun C, M. Pei, and Y. Qin 2004. A prototype micro-wheeledrobot using SMA actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 113:94-99.

- Kang Y., J. Park and H. Yang 2013. Analytical Approach of the In-Pipe Robot on Branched Pipe Navigation and Its Solution, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 5:907-911.

-Kawakita S., T. Isogai, N. Ohya, and N. Kawahara 1997. Layered piezoelectric bimorph actuator, In: *Proceedings of the international symposium on micro mechatronics and human science: 73-78.*

- Kim B. K., S. H. Lee, J. H. Park, and J. O. Park 2005. Design and fabrication of a locomotive mechanism for capsule-type endoscope using shape memory alloys (SMAs), *IEEE/ASME Trans.:* 77-86.

- Kim B. and S. Lee 2005. Design and Fabrication of a Locomotive Mechanism for Capsule-Type Endoscopes Using Shape Memory Alloys (SMAs), *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 10, No. 1: 77-86.

- Liu F., P. Ma, J. Chen, J. Zhu and Q. Yao 2002. Locomotion Characteristics of an SMA Actuated Micro Robot Simulating a Medicinal Leech in a Pipeline, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 19, No. 6: 245-253.

-Lee Y. P., B. K. Kim, M. G. Lee, and J. O. Park 2004. Mechanism design and fabrication of biomimetic micro robot using shape memory alloy, In: *Proceedings of the IEEE international*

robot, In: *Proceedings of IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*, vol. 2:1226-1231.

- Carrozza M. C., L. Lencioni, B. Magnani, P. Dario, D. Reynaerts, M. G. Trivella, and A. Pietrabiissa 1996 microrobot for colonoscopy, In: *IEEE seventh international symposium on micro machine and human science:223-228.*

- Choi H. and S. Roh 2007. In-pipe Robot with Active Steering Capability for Moving Inside of Pipelines, *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*, Vienna: I-Tech Education and Publishing: 375-402.

- Bertetto M. and M. Ruggiu 2001. In-pipe inch-worm pneumatic flexible robot', *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Como, Italy:1226-1331.

- Fukuda T., H. Hosokai, and M. Uemura 1989. Rubber Gas Actuator Driven by Hydrogen Storage Alloy or In-Pipe Inspection Mobile Robot with Flexible Structure, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, AZ: 1847-1852.

- Gambao E., M. Hernando, A. Brunete 2005. Multi configurable Inspection Robots for Low Diameter Canalizations, *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction: 11-14.*

- Idogaki T., H. Kanayama, and N. Ohya 1995. Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine, In: *Proceedings of the micro machine and human science: 193-198.*

- Ismail I. N., A. Anuar, and K. S. M. Sahari 2012. Development of in-pipe inspection robot, *IEEE Conference on*

- Roh S., D. Kim, and J. Lee 2009. In-pipe robot based on selective drive mechanism, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol 7, No. 1: 105–112.
- Sabzehmeidani Y., M. Mailah, and M. Hussein 2010. Intelligent Control and Modelling of a Micro Robot for In-pipe Application, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 72, No. 1: 449-454.
- Slatkin A. B., and J. Burdick 1999. Development of a Robotic Endoscope, In: *Proceedings of the IROS*, Pasadena, PA.
- Suzuki T., and M. Satoh 1995. In-pipe miniature mobile robot with flexible worm wheel mechanism, In: *Proceedings of the 1995 international symposium on microsystems, intelligent materials and robots*: 544–547.
- Suzumori, K., T. Miyagawa, M. Kimura and Y. Hasegawa 1999. Micro inspection robot for 1-in pipes, *IEEE/AMSE Trans*, 4(3):286–92.
- Virgala I, A. Gmitterko and M. Kelemen 2013. Motion Analysis of In-pipe Robot Based on SMA Spring Actuator, *Journal of Automation and Control*, Vol. 1, No. 1:21-25.
- Yaguchi H. and K. Kamata 2012. In-piping Magnetic Actuator Capable of Inspection in a Thin Complex Pipe, *Mechanical Engineering Research*, Vol. 2, No. 2.
- conference on robotics and automation: 5007–5012.
- MiratsTur M. and W. Garthwaite 2010. Robotic devices for water main inpipe inspection, *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 4: 491–508.
- Neubauer W. 1994. A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes, *IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*:1178–1185.
- Pack R.T., J. L. Jr. Christopher, and K. Kawamura 1997. A Rubberactuator-Based Structure-Climbing Inspection Robot, *IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque , New Mexico, USA.
- Park J., D. Hyun, and W. Hee Cho 2011. Normal-force control for an inpipe robot according to the inclination of pipelines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 12:5304– 5310.
- Phee L., A. Menciassi, S. Gorini, G. Pernorio, A. Arena, and P. Dario 2002. An innovative locomotion principle for minirobots moving in the gastrointestinal tract, In: *Proceedings of the IEEE international conference in robotics and automation*: 1125–1130.
- Quirini M. and S. Scapellato 2008. Design and Fabrication of a Motor Legged Capsule for the Active Exploration of the Gastrointestinal Tract, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 13, No. 2.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه ۱۳-۲۰

اثر تغلیظ لحیم‌های بدون سرب توسط افزودن عنصر نیکل در تشکیل ترکیبات میانی موجود با سطح مس نقره اندود شده

صفورا عشاقی^{۱*}؛ سیدمحمد رضا لقمانیان^۲

چکیده

اساساً قابلیت اطمینان پیوندهای لحیمی به ضخامت و مورفولوژی لایه‌های میانی تشکیل شده مابین اتصال لحیم بستگی دارد. این ترکیبات میانی در طی فرایند لحیم‌کاری به وجود آمده و سپس توسط عملیات پیرسازی رشد پیدا می‌کنند که به دنبال آن بررسی مورفولوژی ترکیبات میانی از اهمیت زیادی برخوردار می‌شود. تغلیظ لحیم‌های بدون سرب توسط افزودن مقدار کمی عناصر مثل Ni, Bi, Zn به وجود می‌آید که نقش بسزایی بر روی رشد ترکیبات میانی دارد. این پیوند لحیمی طی فرایند لحیم‌کاری ما بین لحیم‌کاری از سرب SAC و سطح پایه مورد نظر است. این تحقیق اثر اضافه کردن مقدار کمی عنصر نیکل ($0.05\%Ni, 0.1\%Ni$) را بر روی تشکیل فاز میانی طی عملیات لحیم‌کاری با لحیم $SAC305$ بیان می‌کند. لحیم‌های آلیاژی موردنظر در این تحقیق عبارت‌اند از $SAC(0.05Ni), SAC(0.1Ni), SAC305$ که دمای کاربردی در طی فرایند لحیم‌کاری ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و به‌صورت هم‌دمای استفاده می‌شود. فرایند پیرسازی در ۱۵۰ برای مدت ۲۰۰۰ ساعت به طول انجامید. نتایج نشان می‌دهد بعد از لحیم‌کاری ترکیبات میانی $Cu_6Sn_5/(Cu, Ni)_6Sn_5$ از نوع حلزونی شکل تنها محصولات این واکنش هستند و مهم‌ترین تأثیر تغلیظ توسط Ni بر روی نرخ رشد و ضخامت Cu_3Sn است. تأثیر اضافه کردن مقدار $0.05Ni$ در $SAC305$ نسبت به مقدار درصد نیکل ۰/۱ طبق مشاهدات بدین گونه بود که اثر کمتری داشته که البته رشد فاز Cu_3Sn ادامه پیدا می‌کند. همچنین با افزایش زمان پیرسازی طی این فرایند ضخامت ترکیبات میانی افزایش یافته و در اثر افزودن عنصر نیکل به $SAC305$ میکروساختار ترکیبات میانی ریزتر و کوچک‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی

لحیم‌کاری، سطح نهایی، ترکیبات میانی، لحیم بدون سرب، سطح نهایی نقره اندود

۱-عضو هیات علمی موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

*نویسنده مسئول: oshaghi@daneshpajooan.ac.ir

۲-استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان(خوراسگان)

۱- مقدمه

قابلیت اطمینان این اتصال لحیمی یکی از مهم‌ترین مسائل کلیدی و مهم می‌تواند باشد. درک و فهم هرچه بهتر این واکنش‌های میانی از جمله مهم‌ترین و کامل‌ترین بخش در توسعه قابلیت اطمینان سیستم‌های اتصالی هستند. خیلی از مطالعات روی قابلیت اطمینان پیوندی و واکنش میانی بین لحیم عاری از سرب و سطح‌های نهایی متنوع طی فرایند پیرسازی انجام می‌گیرد که این سطح‌های نهایی عبارت‌اند از مس لخت سطح نهایی غوطه‌ور در نقره، سطح نهایی غوطه‌ور در طلا (ENIG) و غیره.

در این مطالعه اثر افزودن درصد‌های مختلف عنصر نیکل به لحیم ($Sn-Ag-Cu$) در طی واکنش‌های میانی مابین لحیم SAC و سطح نهایی غوطه‌ور در نقره و مس را مورد بررسی قرار دادیم. تشکیل و رشد ترکیبات میانی مابین لحیم نیکل دار و سطح نقره اندود شده مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید.

۲- روش پژوهش

برای این تحقیق از دو نوع سطح نهایی مس بدون روکش (Cu) و سطح غوطه‌ور شده در نقره (IMAg) استفاده شده است. برای ایجاد سطح غوطه‌ور شده در این تحقیق ابتدا سطح مسی در پروسه آماده‌سازی قرار می‌گیرد که به منظور برداشتن هرگونه اکسید و سپس فعال کردن سطح مس جهت غوطه‌ور شدن در ماده مورد نظر است. قبل از لحیم‌کاری یک ماسک از لحیم‌های خشک روی سطح پایه قرار داده می‌شود که این کار توسط دستگاه لمینیت انجام می‌گیرد. سپس ماسک لحیمی که دارای الگو و طرح خاصی است در برابر اشعه UV گذاشته می‌شود. در مرحله بعدی لحیم‌های کروی شکل از جنس $Sn-3Ag$ و $0.05Ni$ و $0.1Ni$ و $0.5Cu(SAC305)$ در چندین ردیف

محققان زیادی تلاش کرده‌اند تا اثر افزودن عناصر دوپینگ مثل نیکل را بر روی لحیم‌هایی شامل نقره-قلع مورد بررسی قرار دهند (Lee et al. 2002). معمولاً عناصر آلیاژی اضافه‌شده به این نوع لحیم‌ها (نقره-قلع) شامل Cu, Ni, Co, Sb, Bi و غیره هست که به منظور کاهش دمای نقطه ذوب لحیم و همچنین هم‌زمان با آن برای بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی به کار می‌رود. در بین این عناصر آلیاژی مس و نیکل بهترین انتخاب می‌باشند. این عناصر در طی اضافه شدن به لحیم مورد نظر باعث بهبود خواص مکانیکی لحیم می‌شوند. در واقع با افزودن این عناصر نقطه ذوب کاهش یافته و خاصیت خیس‌کنندگی لحیم نیز بهبود می‌یابد. معمولاً نیکل برای ایجاد یک سد نفوذی مابین مس و زمینه (قلع) استفاده می‌شود که به دنبال آن از تشکیل ترکیبات میانی Cu_6Sn_5, Cu_3Sn تا حد امکان جلوگیری می‌کند (Guo et al. 2001).

نیکل یکی از مؤثرترین عناصر افزودنی می‌باشد زیرا فاز پایداری از سیستم ساده $Ni-Sn$ تشکیل می‌دهد که نسبت به رشد ترکیب میانی $Cu-Sn$ آهسته‌تر عمل می‌کند.

اساساً انتخاب یک سطح نهایی مناسبی تواند نقش مهمی را در قابلیت اطمینان صنعت تکنولوژی بسته‌بندی ایفا کند. مس از جمله مهم‌ترین عناصری است که در این صنعت بسیار استفاده می‌شود. در لایه سطحی مابین لحیم و مس قلع سریعاً با مس واکنش داده و ترکیب میانی $Cu-Sn$ را به وجود می‌آورد. این ترکیب به خاطر ذات ترد بودنش باعث ضعیف شدن پیوند لحیمی می‌گردد (Lee et al. 2003).

معمولاً در اتصال لحیمی هم جریان الکتریکی و هم موضوع استحکام مکانیکی باید وجود داشته باشد که نقش مهمی را در اتصالات الکتریکی جهت توسعه دستگاه‌های تکنولوژی بسته‌بندی ایفا می‌کند. در این باره

1- Electroless Nickel Gold

2- Emersion Silver

طی ۱۰۰۰ ساعت عملیات پیرسازی را توسط دستگاه $FESEM$ نشان می‌دهد. در تمام واکنش‌ها تنها ترکیب میانی موجود مابین لحیم‌ها و لایه مسی Cu_6Sn_5 حلزونی شکل بود و در این مرحله اثری از ترکیب میانی Cu_3Sn مشاهده نشد. بعد از مرحله پیرسازی ترکیب میانی Cu_3Sn از فاز پایدار Cu_6Sn_5 طبق واکنش زیر منتج گردید:

(۱)



همچنین طبقه‌ای تحول شکل و مورفولوژی این ترکیبات میانی به صورت آهسته از نوع حلزونی به نوع لایه‌ای تبدیل می‌شود. سپس این دو لایه ترکیب میانی (Cu_6Sn_5, Cu_3Sn) با افزایش زمان پیرسازی رشد پیدا کرده و ضخیم‌تر می‌شود. طبق مطالعات قبلی بررسی واکنش‌های میانی و رشد این ترکیبات مورد تحقیق قرار گرفته است. بر اساس شکل (۱) زمانی که غلظت Ni افزایش داده می‌شود مقدار Cu_6Sn_5 افزایش یافته و یا به عبارت دیگر ضخامت ترکیب میانی با بیشتر شدن درصد نیکل افزایش پیدا می‌کند (Kim et al. 2003). علاوه بر این شکل (۱) نشان می‌دهد زمانی که عنصر نیکل به لحیم افزوده می‌شود طی فرایند لحیم‌کاری میکروساختار سوزنی شکل Cu_6Sn_5 به وجود می‌آید. اگرچه قسمت‌هایی از این ترکیبات میانی هنوز شکل حلزونی از خود نشان می‌دهند. در ضمن میکرو ساختار سوزنی به میکروساختار ستونی نیز موسوم است.

بیشترین تحقیقات از این میکروساختارها مربوط به اندازه و سایز IMC است جایی که درصد نیکل افزودنی به لحیم افزایش پیدا کند (Lee et al. 2002). جدای از این که اساساً اضافه کردن نیکل به لحیم SAC می‌تواند مانعی جهت رشد Cu_3Sn در واکنش میانمیان

گذاشته شده و سپس اتصال لحیمی در یک کوره با پیک دمایی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد طی عملیات فرونشینی تشکیل می‌شود.

قبل از لحیم‌کاری همه پایه‌ها با یک نوع فلاکس آماده می‌شوند. استفاده از فلاکس در این مرحله جهت برداشتن هرگونه اکسید سطحی هست. در ادامه یک روش مفیدی به نام اچ کردن شیمیایی انتخابی جهت هرچه بهتر شدن مورفولوژی ترکیبات میانی که طی فرایند لحیم‌کاری به وجود می‌آید استفاده می‌گردد و تحقیقات و بررسی‌های بعدی جهت این کار توسط دستگاه SEM (میکروسکوپ روبشی الکترونی) صورت می‌گیرد. نهایتاً جهت تشخیص نوع ترکیبات میانی از تکنیک EDX استفاده گردید.

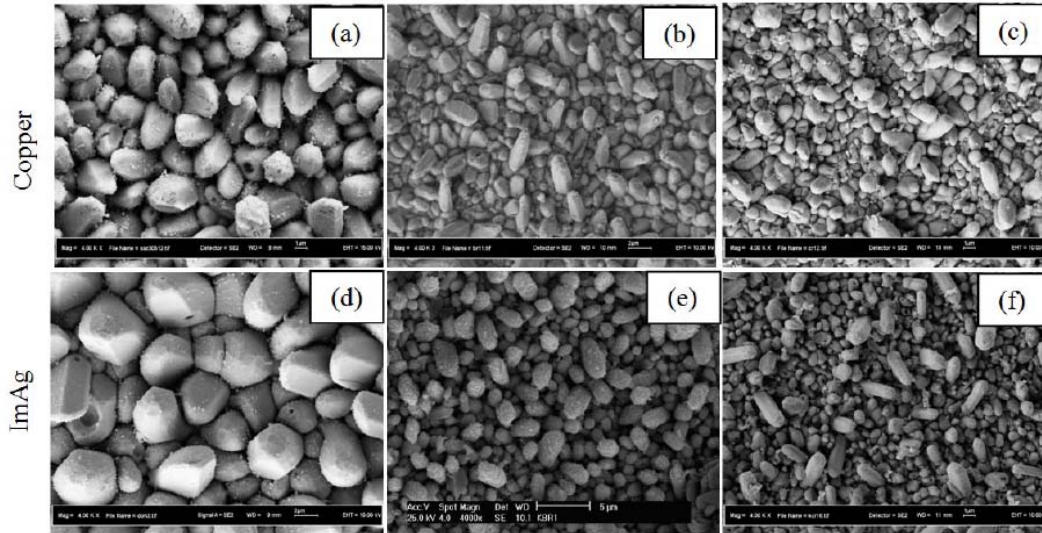
۳- نتایج و بحث

اساساً برای شرح و بررسی ترکیبات میانی که در لایه میانی مابین سطح نهایی و لحیم‌های با پایه قلع تشکیل می‌شوند از علم ترمودینامیک استفاده می‌شود. سپس از دیاگرام‌های فاز به منظور اینکه آیا این ترکیبات میانی تشکیل می‌شوند یا نه استفاده می‌شود (Guo et al. 2001). به طور واضح می‌توان بیان کرد که در طی لحیم‌کاری روی سطح مس بدون روکش و سطح نهایی نقره در فرایند فرونشینی دو نوع ترکیب میانی Ni_3Sn_4 و $(Ni, Cu)_3Sn_4$ تشکیل می‌شود.

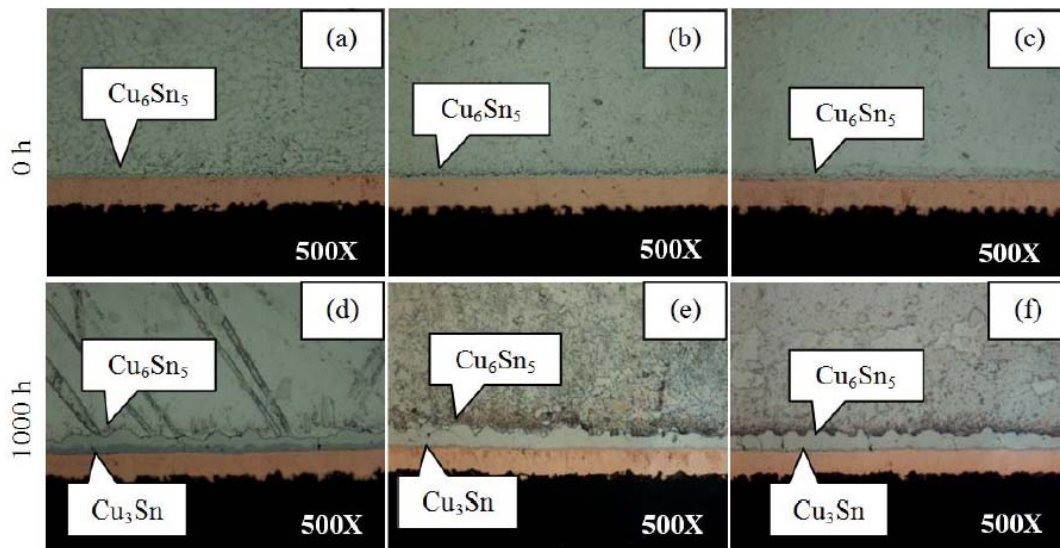
در سطح نهایی غوطه‌ور شده نقره لایه سطح بالایی غنی از نقره کاملاً در داخل لحیم SAC مذاب حل می‌شود و بعد از اولین فرونشینی لایه مسی باقیمانده در مواجهه با لحیم ذوب شده قرار می‌گیرد. به محض اینکه لایه نقره مصرف شد بعضی از قسمت‌های لایه مسی در داخل لحیم مذاب حل می‌شود و سپس این ترکیبات میانی مابین لحیم‌ها و لایه مسی رشد پیدا می‌کنند. شکل (۱) نمونه‌های لحیمی با درصدهای مختلف Ni افزودنی

عنصر آلیاژی افزودنی برای این لحیم‌ها باشد. در نهایت اضافه کردن نیکل میکروساختار Cu_3Sn را به صورت خیلی زیاد تغییر نداده و همچنین این فاز را ضخیم‌تر نمی‌کند (Kumar et al. 2006).

لحیم و پایه سطحی مسی بعد از عملیات پیرسازی هم‌دما باشد شکل (۲) رشد Cu_6Sn_5 اغلب به همراه تشکیل جای خالی بوده که باعث افت و تضعیف پیوند لحیمی می‌شود؛ بنابراین توصیه می‌شود عنصر نیکل به‌عنوان



شکل (۱). نمایی بالایی از ترکیب میانی Cu_6Sn_5 تشکیل شده مابین سطح مسی نقره‌اندود و لحیم‌های SAC305(a,d), SAC(0.05Ni)(b,e), SAC(0.1Ni)(c,f)



شکل (۲). نمایی از سطح مقطع ترکیب میانی Cu_6Sn_5 تشکیل شده بعد از ۰ و ۱۰۰۰ ساعت پیرسازی مابین سطح مسی نقره‌اندود و لحیم‌های SAC305(a,d), SAC(0.05Ni)(b,e), SAC(0.1Ni)(c,f)

نهایی نقره و سطح نهایی مس موجود هست دو فاز Cu_6Sn_5, Cu_3Sn بعد از عملیات پیرسازی محصول

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد پیرسازی هم‌دما روی ترکیبات میانی اثر فراوانی دارد. در این مورد که سطح

محقق می‌گردد درحالی‌که نرخ رشد ترکیب میانی Cu_6Sn_5 افزایش می‌یابد. اگرچه در مجموع طی عملیات پیرسازی ضخامت لایه‌های ترکیب میانی ($Cu_6Sn_5+Cu_3Sn$) برای هر دو سطح نهایی نقره اندود شده و Cu با افزایش درصد نیکل افزودنی بیشتر می‌شود (شکل (۴)).

اساساً افزودن هر چه بیشتر Ni به داخل لحیم SAC به‌طور واضح رشد ترکیب میانی Cu_3Sn را متوقف می‌کند درحالی‌که رشد ترکیب میانی Cu_6Sn_5 در لایه داخلی افزایش می‌یابد. اگرچه بعضی از تحقیقات بدین گونه بیان می‌کند که برای افزودن نیکل به داخل لحیم حدی وجود دارد که حداقل مقدار آن باعث به تعویق انداختن رشد Cu_3Sn شده و به‌طورهم‌زمان با مقدار ترکیب میانی Cu_6Sn_5 زیادی نیز دچار نشود (Ghosh 2001). دلیل اینکه چرا با افزودن عنصر نیکل به لحیم با کاهش ضخامت Cu_3Sn مواجه هست در این لحظه به‌صورت واضح آشکار نیست. در بسیاری از نظریه‌ها پیشنهاد گردیده است که اضافه کردن نیکل به لحیم گاهی اوقات باعث افزایش نسبت فلاکس نفوذی در میان لایه Cu_3Sn, Cu_6Sn_5 می‌گردد بدین گونه که فاز با ضریب ثابت نفوذی بالاتر رشد سریع‌تری نسبت به فاز با ضریب ثابت نفوذی پایین‌تر دارد (Yoon et al. 2014). با این‌وجود توضیح مکانیزم این‌که چرا افزودن نیکل به داخل لحیم باعث تغییر نسبت فلاکس نفوذی می‌شود با نقص روبرو است که البته مطالعات بیشتری برای روشن شدن این نکته مورد نیاز هست.

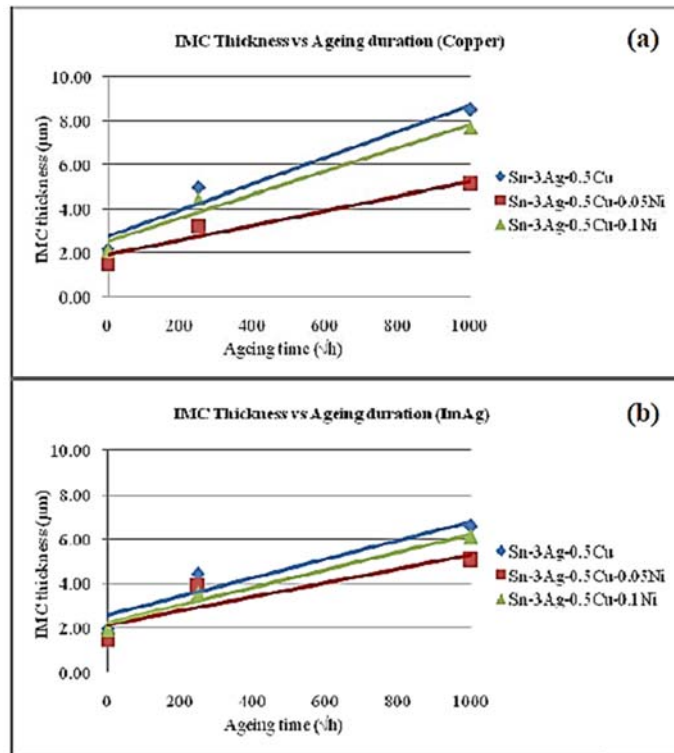
واکنش میانی مابین لحیم‌های $SAC-XNi/Cu$ و سطح نقره اندود شده می‌باشند. در نتیجه ترکیب میانی Cu_3Sn بعد از عملیات پیرسازی مابین Cu و Cu_6Sn_5 تشکیل می‌شود. بعد از طولانی‌تر شدن پروسه پیرسازی لایه Cu_3Sn ضخیم‌تر می‌شود (شکل (۳)).

سرعت رشد لایه IMC میانی طبق معادل زیر متناسب با جذر زمان گزارش شده است.

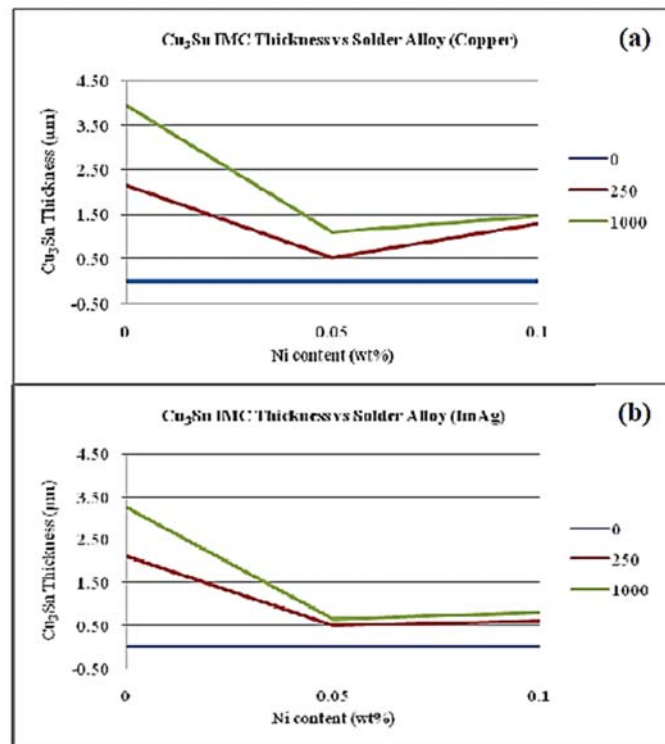
$$\sigma_t = \sigma_0 + kt^{1/2} \quad (2)$$

جایی که σ_t میانگین ضخامت لایه IMC در زمان پیرسازی t و σ_0 ضخامت اولیه قبل از پیرسازی k ثابت نرخ رشد و t زمان پیرسازی هست. شکل (۳) ضخامت ترکیبات میانی را به‌عنوان یک تابعی از جذر زمان برای هر لحیم بعد از عملیات پیرسازی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تا زمان ۱۰۰۰ ساعت نشان می‌دهد؛ بنابراین در پیوندهای نفوذی ضخامت لایه IMC به‌صورت خطی با جذر زمان پیرسازی افزایش می‌یابد (Yoon et al 2004, Chen et al. 2006).

در نتیجه نفوذ اتمی به‌صورت پروسه کنترل‌کننده برای رشد IMC در طی عملیات پیرسازی است. در مقایسه این دو نوع سطح نهایی که در این تحقیق استفاده شده است جالب‌ترین وجه از عملیات پیرسازی پیوندهای $SAC305(0.05Ni/Cu)$, $SAC305-0.1Ni/Cu$ بدین گونه بود که رشد ترکیب میانی Cu_3Sn با تشکیل لایه ضخیم Cu_6Sn_5 در مقایسه با پیوند SAC/Cu به‌صورت واضح کاهش پیدا می‌کند. به‌عبارت‌دیگر در سطح نهایی نقره اندود شده و Cu ، نرخ رشد ترکیب میانی Cu_3Sn کاهش پیدا می‌کند البته این امر با افزایش درصد نیکل اضافه‌شده به داخل لحیم



شکل (۳). اندازه ضخامت ترکیبات میانی با زمان پیرسازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل (۴). اندازه ضخامت لایه ترکیب میانی Cu₃Sn برحسب درصد غلظت نیکل بعد از پیرسازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد

۴- نتیجه گیری

-Ghosh G., 2001. Solder Paste in Electronics Packaging Acta Materialia 49(14): 2609–2624.

-Guo F., S. Choi, J.P. Lucas, and K. N. Subramanian 2001. Microstructural characterization of reflowed and isothermally-aged Cu and Ag particulate reinforced Sn-3.5Ag composite solders. Soldering and Surface Mount Technology 13(1): 7–18.

-Guo F., J. Lee, S. Choi, J.P. Lucas, and K. N. Subramanian 2001. Troubleshooting Electroless Nickel Plating Solutions. Journal of Electronic Materials, 30(9):1073–1082.

-Kim K. S., S. H. Huh, and K. Sugauma 2003. Effects of Intermetallic Compounds on Properties of Sn-Ag-Cu Lead-Free Soldered Joints Microelectronics Reliability 43 (2): 259–267.

-Kumar A., Z. Chen, S. G. Mhaisalkar, C.C. Wong, P.S. Teo, and V. Kripesh 2006. Barrier Properties of Thin Au/ Ni-P Under Bump Metallization for Sn-3.5Ag Solder. Thin Solid Films, 504: 410-415.

-Lee C. B., I.Y. Lee, S. B. Jung, and C. C. Shur 2002. An Overview of Process and Solderability Performance of HASL Alternatives Materials Transactions, 43(4): 751-756.

-Lee J.G., F. Guo, K.N. Subramanian, and J. P. Lucas 2002. Intermetallic morphology around Ni particles in Sn-3.5Ag solder. Soldering and Surface Mount Technology 14(2): 11–17.

-Yoon J.W., S. W. Kim, and S. B. Jung 2004. Unraveling the Final Finishing Mystery Materials Transactions, 45(3): 727-733.

در این تحقیق میکروساختار ترکیبات میانی مورد بررسی قرار گرفت جایی که سه نوع لحیم با $SAC3050.05Ni, SAC305-0.1Ni$ و $SAC305$ سطح‌های نهایی مختلف واکنش می‌دهند. زمانی که روی سطح نهایی Cu و نقره اندود شده لحیم کاریمی شود تنها لایه و ترکیب میانی Cu_6Sn_5 تشکیل شده و در ادامه با عملیات فرونشینی و پیرسازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد لایه میانی Cu_3Sn نیز مابین سطح پایه‌ای مس و Cu_6Sn_5 تشکیل خواهد شد. سپس بعد از پیرسازی ترکیب میانی Cu_3Sn به خاطر آهسته شدن نسبت نفوذ ترکیب میانی Cu_6Sn_5 رشد پیدا می‌کند. با اضافه کردن نیکل به داخل لحیم $SAC305$ دانه‌های Cu_6Sn_5 کاهش یافته و همچنین باعث ممانعت در رشد ترکیب میانی Cu_3Sn می‌شود. در نتیجه ضخامت محصول کمتر از ضخامت محصول با لحیم بدون نیکل می‌شود. جدای از این دریافتیم که افزودن نیکل در حد ۰/۰۵ درصد در مقایسه با ۰/۱ درصد برای کاهش رشد Cu_3Sn بهتر می‌باشد. نهایتاً از فرایند پیرسازی رشد ترکیبات میانی منتج گردیده و به دنبال آن ضخیم تر شدن و زبرتر شدن ترکیبات میانی به وجود می‌آید. در ضمن تغییرات مورفولوژی ترکیبات میانی به شکل کروی تر شدن پیش می‌رود.

منابع

-Chen W. M., P. McCloskey, and C. S. Mathuna 2006. The Local Nominal Composition. Useful Concept for Microjoining and Interconnection Applications. Microelectronics Reliability 46(5-6): 896-904.

-Gao F. T. and F. H. Nishikawa 2006. Chip on Board Technologies for Multichip Modules Materials Science and Engineering A420(1-2): 39-46.

Cu and Ni-P/Cu during Aging Treatment. Journal of Electronic Materials 32(11): 1195-1202.

-Yoon J. W., C. B. Lee, and S. B. Jung 2003. Growth of an Intermetallic Compound Layer with Sn-3.5Ag-5Bi on

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه ۲۱-۳۲

بررسی اثر نیروی کازمیر بر رفتار میکروتیر با استفاده از روش هموتویی بهینه شده

علی تاجمیری^{۱*}، محمد رضا مقومی^۲

چکیده

میکرو تیرها و نانوتیرها از جمله مسائلی هستند که در مباحث طراحی مهندسی مورد بحث و بررسی واقع می‌شوند. میکرو و نانوتیرهای با شرایط مرزی متفاوت از جمله یک سر گیردار و دوسر گیردار، در تحلیل مهندسی جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده اند. دو حالت شرایط مرزی (حالت اول تیر یک سر گیردار و حالت دوم تیر دوسر گیردار) برای مطالعه رفتار نانو تیر تحت اثر نیروی کازمیر بررسی می‌شوند. در این بررسی ها، میکروتیرها که تحت بارهای الکتریکی قراردارند تحلیل استاتیکی و دینامیکی شده و بر روی خیز تیرها از روش های متفاوت مدل غیرخطی و روش های تئوری استفاده می‌شود.

در این مقاله ضمن معرفی نیروی کازمیر و پژوهش‌های مربوط به اندازه گیری اثر این نیرو، به حل معادلات دیفرانسیلی مربوط به نانوتیر تحت اثر جذب کازمیر به روش هموتویی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که در روش حل ادومین، میزان اختلاف نتایج حاصله حدود ۱۰ درصد است. از طرفی اختلاف بین مقادیر بحرانی α در روش هموتویی نیز ۱۰ درصد است که عدد قابل قبولی هست.

واژه‌های کلیدی

معادلات دیفرانسیل، هموتویی، نانوتیر، نیروی کازمیر، میکروتیر.

۱ - دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران

*نویسنده مسئول: alitajmiri@gmail.com

۲ - عضو هیات علمی موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

۱- مقدمه

روش *HAM* بر اساس هموتوپیی پایه گذاری شده است. هموتوپیی یک اصل در توپولوژی و معادلات دیفرانسیل می باشد، که ادامه ی آن به تلاش های پوانکاره^۱ بر می گردد. به صورت عامیانه و ساده اگر بخواهیم آنالیز هموتوپیی را شرح دهیم، می توان گفت به وسیله ی آنالیز هموتوپیی می شود یک سری از حدس های اولیه را مورد ارزیابی قرار داد و بوسیله ی یک سری از پارامترهای کمکی یک سری از جواب ها به دست آورد که به جواب دقیق هم گرا می شود. این روش از امکاناتی چون آزادی عمل در انتخاب تابع اولیه و عملگر خطی بهره می برد. بوسیله همین آزادی عمل ها و انتخاب های اولیه یک مساله غیر خطی پیچیده حل می گردد و به مساله های خطی کوچکتر و ساده تبدیل می شود. تاکنون تحقیقات زیادی برای تحلیل استاتیکی و بررسی ناپایداری کششی و تحلیل ارتعاشی میکروتیرها انجام شده است. نقره آبادی و همکارانش ناپایداری کششی استاتیکی نانوتیرهای یک سر گیردار که در یک مایع الکترولیت غوطه ور هستند را به صورت تئوری مورد بررسی قرار داده اند (*Ghalambaz (Noghrehabadi, Eslami and 2013* در مدل کردن نانوتیر یک سر گیردار، اثرات نیروهای وان دروالسی، شرط مرزی الاستیک و وابستگی به سائز در نظر گرفته شده اند.

کانگ مطالعه ای بر روی اثر اندازه بر روی رفتار کششی یک میکروتیر که توسط میدان الکترواستاتیکی تحریک می شود، انجام داده است (*Kong 2013*). علی حاج اسفندیاری و همکارش مطالعه ای بر روی تئوری کوپل استرس مربوط به جامدات ارائه کرده است (*Hadjesfandiari 2011*). در این تحقیق با استناد

به تعریف شرایط مرزی قابل قبول، اصل کار مجازی و بعضی ملاحظات سینماتیکی، یک کاراکتر انحراف متقارن تانسور تنش مرکب درنمایش پیوسته ی وابسته به اندازه ایجاد شده است.

جیا و همکارانش در مقاله ی خود به بررسی ناپایداری کششی و ارتعاش آزاد میکروتیر اف-جی-ام تحت نیروی الکترواستاتیکی و نیروی بین مولکولی پرداختند (*Jia et al. 2011*). نتایج این مقاله که به بررسی پارامتری اثرات ترکیب مواد، شکل الکتروتود، تنشهای پسماند محوری و هندسه ی غیر خطی بر مشخصه های ولتاژ کششی و فرکانس آزاد پرداخته است با نتایج تجربی پیشین مقایسه شده و نتایج خوبی را نشان داده است.

هو و همکارانش میکروتیری را که به وسیله میدان الکتریکی تحریک می شود تحلیل استاتیکی نمودند و در معادلات استاتیکی نیروی وارده بر میکروتیر را تا مرتبه سوم بسط تیلور دادند (*Hu 2006*). نتایج تحلیلی آن ها با نتایج عددی، تنها در محدوده ناپایداری کششی متفاوت می باشد که علت اصلی این تفاوت، بسط نیروی الکتریکی در معادله استاتیکی می باشد. هو جابجایی استاتیکی یک میکروتیر انحنادار را که به وسیله میدان الکتریکی تحریک شده است، با استفاده از مشتق گیری از معادله انرژی و در نظر گرفتن یک مود به روش تحلیلی تعیین نمود (*Hu 2006*). او همچنین با استفاده از روش فوق توانست ولتاژ ناپایداری کششی را تعیین نماید. رضانی و همکارانش در مقاله ای از یک مدل پارامتری توزیع شده برای مطالعه ناپایداری کششی یک نوع سوئیچ نانو مکانیکی یک سر گیر دار که تحت نیروهای بین مولکولی و نیروی الکترواستاتیکی قرار دارد، استفاده نمودند (*Rezazadeh, Fathalilou and Sadeghi 2011*). برای مدل کردن

تحلیلی و بر اساس تئوری کوپل استرس اصلاح شده، حل شده است (Kong et al. 2008).

رضازاده و همکاران به مطالعه‌ی پاسخ استاتیکی و دینامیکی میکروتیر یک سر گیردار و دوسر گیردار به ولتاژ مستقیم و ولتاژ پله‌ای پرداختند. نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج تجربی پیشین مقایسه شده و منتج به تطابق قابل قبولی شده است (Rezazadeh, Fathalilou and Sadeghi 2011).

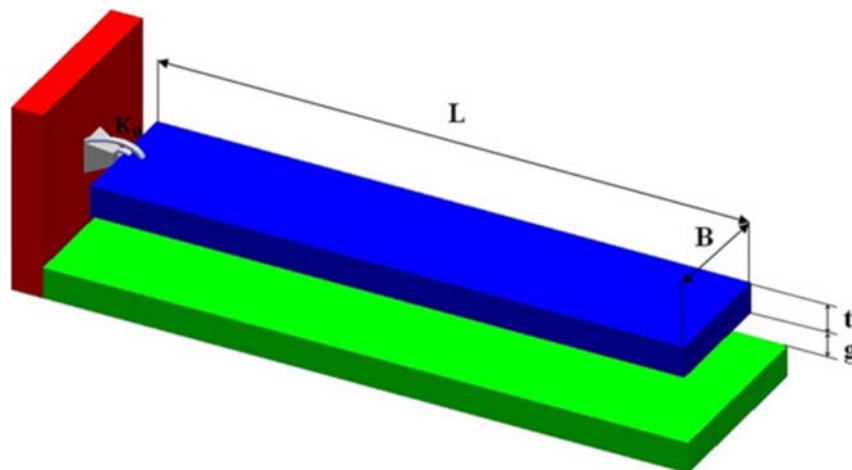
شکل ۱ نمایی از تیر قیدگذاری شده را نشان می‌دهد. شکل ۲ اثر تمرکز یونی و وابستگی اندازه‌ی خیز و ولتاژ کششی مربوط به تیر گیردار مشاهده می‌شود. در شکل ۳ محرک نانو الکترومکانیکال سیستمی را که از دو طرف گیردار شده است را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴ خیز مرکزی تیر دوسرگیردار مشاهده می‌شود. زمانی که مقدار بیشینه‌ی خیز در مقدار افقی ۰/۵ اتفاق می‌افتد.

نیروی الکترواستاتیکی، اثر میدان حاشیه دار در محاسبات در نظر گرفته شده است.

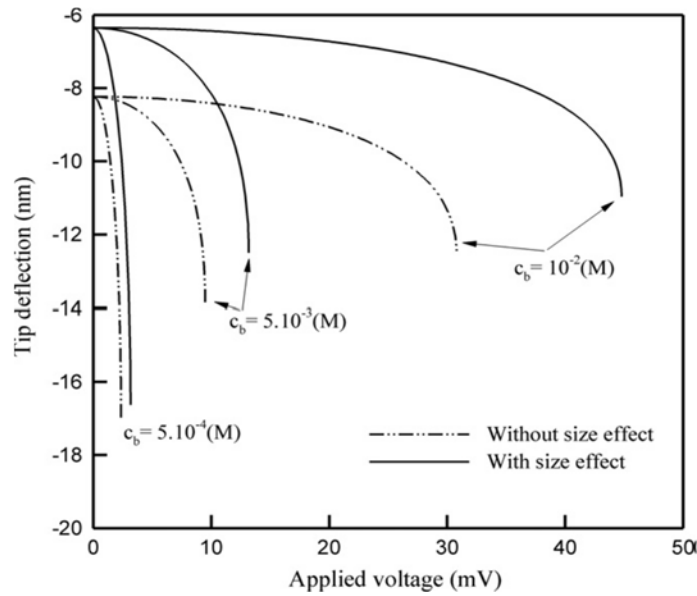
ژائو و همکارانش در مقاله دیگری یک مدل کاهش مرتبه‌ای برای میکروصفحات محرک الکتریکی بر پایه‌ی سیستم های میکرو الکترومکانیکی ارائه کرده‌اند. آنها اعلام کردند که مدل برای نیروهای الکتریکی غیرخطی و کشش صفحه میانی ورق دارای اعتبار است (Zhao, Abdel-Rahman and Nayfeh 2004).

یونس و نایفه پاسخ دینامیکی یک میکروتیر را که توسط یک میدان الکتریکی تحریک شده است بررسی نمودند (Younis and Nayfeh 2003). نشان می‌دهد که افزایش یافتن نیروی محوری، مشخصه‌های خطی فرکانس تشدید را افزایش می‌دهد و فرکانس نامطلوب که توسط عوامل غیرخطی ایجاد می‌شود را کاهش می‌دهد. بالعکس، افزایش کشش صفحه میانی اثر معکوس دارد.

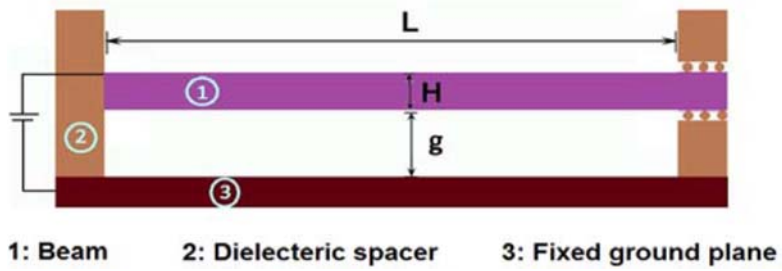
کانگ و همکارانش فرکانس‌های طبیعی وابسته به سائز یک تیر اویلر-برنولی را محاسبه کرده‌اند. در این مطالعه مسائل دینامیکی تیرهای اویلر-برنولی بصورت



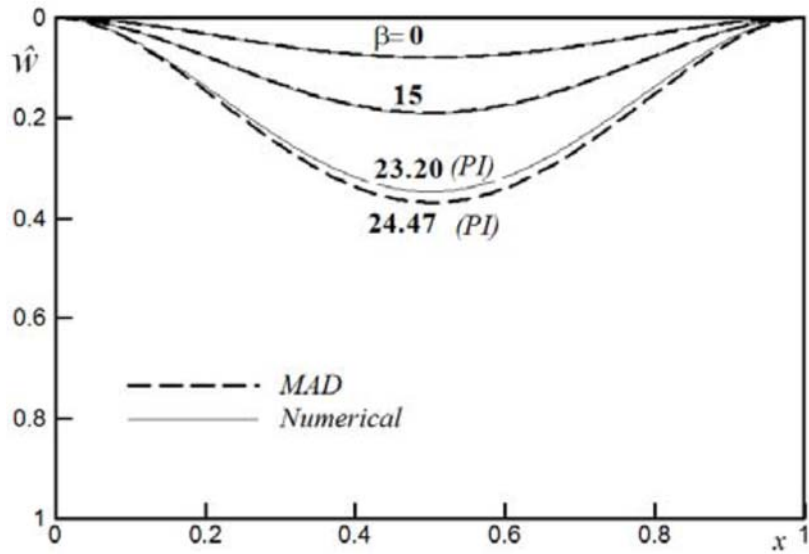
شکل (۱). نمایی از نانوتیر قیدگذاری شده



شکل (۲). اثر تمرکز یونی و وابستگی اندازه بر پارامتر کششی تیر گیردار



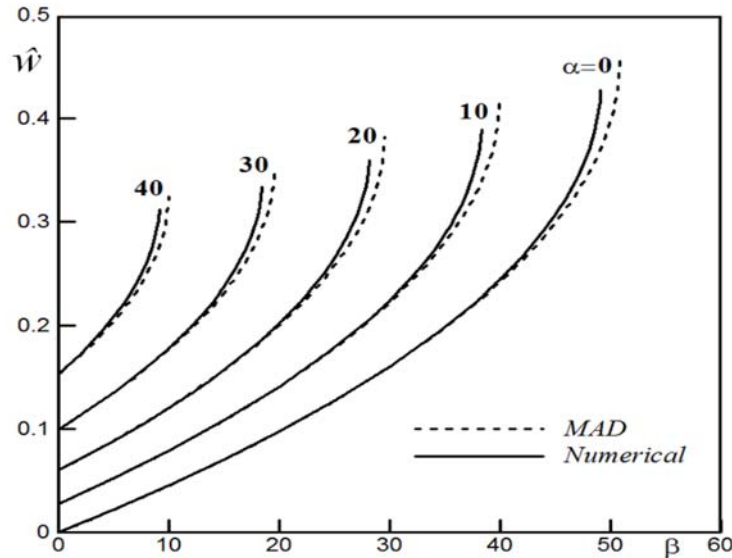
شکل (۳) نمایی از نانوتیر



شکل (۴). خیز نانو تیر

همچنین نیروی بین مولکولی را نشان می‌دهد که خیز کشش و ولتاژ نانو محرک را کاهش می‌دهد.

اثر نیروی واندروالس را در رفتار کشش شرط دوسرگیردار در شکل ۵ ملاحظه می‌کنید. این شکل نتایج به‌دست آمده برای مقادیر آلفای مختلف را نشان می‌دهد و



شکل (۵). خیز نانوتیر به صورت تابعی از مقادیر مختلف آلفا
(Tadi Beni, Abadyan and Noghrehabadi 2011)

شرایط مرزی برای تیر یک سر گیردار به صورت زیر است:

$$u(0) = u'(0) = 0 \text{ \& } u''(1) = u'''(1) = 0 \quad (2)$$

و برای تیر دو سر گیر دار داریم:

$$\begin{aligned} u(0) = u'(0) = 0 \\ u(1) = u'(1) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

و پارامتر های بی بعد α و β به صورت زیر تعریف

$$\alpha = \frac{\pi^2 \hbar c w L^4}{240 g^5 E_{eff} I} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\epsilon_0 w V^2 L^4}{2 g^3 E_{eff} I} \quad (5)$$

۲- حل معادله نانوتیر به روش هموتوپی

هدف ما در این مقاله آن است که بتوانیم معادله دیفرانسیل مرتبه چهارم را به روش هموتوپی حل نماییم. با داشتن معادله خیز تیر می‌توان تاثیر پارامترهای مختلفی مانند نیروی کازمیر را بر خیز نانو تیر بررسی کرد. معادله مذکور برای دو حالت شرایط مرزی به روش هموتوپی حل خواهد شد.

۲-۱- حل معادله دیفرانسیل

معادله دیفرانسیل مرتبه چهارم مربوط به خیز تیر که قبلاً "ساده سازی شده" به صورت معادله ۱ در نظر گیریم: (تاجمیر ۱۳۹۳)

$$\frac{d^4 u}{dx^4} = \frac{\alpha}{(1-u(x))^4} + \frac{\beta}{(1-u(x))^2} + 0.65 \frac{g}{w} \frac{\beta}{(1-u(x))} \quad (1)$$

با جای گذاری معادله ۱۱ در معادله ۱۰ معادله ۱۲ به صورت زیر در می آید:

$$\begin{aligned} & (y_0 + Py_1 + \dots)^4 \\ & \left[(y_0^{(4)} + Py_1^{(4)} + \dots) - y_0^{(4)} \right] \quad (12) \\ & = P \left[-\alpha - \beta(y_0 + Py_1 + \dots)^2 \right. \\ & \left. - 0,65 \frac{g}{w} (y_0 + Py_1 + \dots)^4 \right] \end{aligned}$$

با توجه به این که معادله فوق ، یک معادله دیفرانسیل غیر خطی بوده و مرتبه آن با ۴ است. همچنین روش هموتویی، نوعی روشی عددی است، لذا برای سادگی محاسبات (با حفظ میزان دقت قابل قبول) فقط ۲ جمله اول هموتویی را در نظر می گیریم: $y = y_0 + Py_1$ با ساده کردن رابطه (۱۳) و متحد قرار دادن ضرایب توان های مشابه دو طرف معادله داریم :

$$\begin{aligned} & (y_0^4 + 4Py_0^3y_1 + 6P^2y_0^2y_1^2 + 4P^3y_0y_1^3 + P^4y_1^4) \quad (13) \\ & [y_0^{(4)} + Py_1^{(4)} - y_0^{(4)}] \\ & = P \left[-\alpha - \beta(y_0^2 + 2Py_0y_1 + P^2y_1^2) \right. \\ & \left. - 0,65 \frac{g}{w} \beta(y_0^3 + 3Py_0^2y_1 + 3P^2y_0y_1^2 + P^3y_1^3) \right] \end{aligned}$$

به عنوان شرایط اولیه قرار می دهیم :

$$\begin{aligned} y_0(x) &= 1 \\ P^0: y_0^4 [y_0^{(4)} - y_0^{(4)}] &= 0 \quad \text{بدیهی} \\ P^1: y_0^4 y_1^{(4)} &= -\alpha - \beta y_0^2 - 0,65 \frac{g}{w} \beta y_0^3 (*) \\ P^2: 4y_1^3 y_0 y_1^{(4)} &= -2\beta y_0 y_1 - 0,65 \frac{g}{w} \beta (3y_0^2 y_1) (**) \end{aligned}$$

با حل معادله (*) داریم:

$$\begin{aligned} y_0(x) &= 1 \\ y_1^{(4)} &= -\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta \\ y_1^{(3)} &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta \right) x + c_1 \\ y_1^{(2)} &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta \right) \frac{x^2}{2} + c_1 x + c_2 \\ y_1^{(1)} &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta \right) \frac{x^3}{6} + c_1 \frac{x^2}{2} + c_2 x + c_3 \\ y_1 &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta \right) \frac{x^4}{24} + c_1 \frac{x^3}{6} + c_2 \frac{x^2}{2} + c_3 x + c_4 \end{aligned}$$

با تغییر متغیر $y=1-u$ می توان روابط فوق را به شکل ساده تری بازنویسی کرد. در این صورت معادله دیفرانسیل خیز تیر به شکل زیر می شود:

$$y_{(x)}^{(4)} = -\frac{\alpha}{y_{(x)}^4} - \frac{\beta}{y_{(x)}^2} - 0,65 \frac{g}{w} \frac{\beta}{y_{(x)}} \quad (6)$$

۱-۱-۲- حالت اول شرایط مرزی: تیر یک سرگیردار

شرایط مرزی نیز به شکل جدیدی بازنویسی شده اند، که برای تیر یک سرگیردار به شکل زیر می باشد:

$$\begin{cases} y(0) = 1 & y'(0) = 0 \\ y''(0) = 0 & y'''(1) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

برای حل معادله ۶ با شرایط مرزی ۷ هموتویی نشان داده شده در معادلات ۸ و ۹ را می توان در نظر گرفت.

$$\begin{aligned} & (1-p) \left(y_{(x)}^{(q)} - y_0^{(q)} \right) + \quad (8) \\ & p \left(y_{(x)}^{(q)} + \frac{\alpha}{y_{(x)}^4} + \frac{\beta}{y_{(x)}^2} + 0,65 \frac{g}{w} \frac{\beta}{y_{(x)}} \right) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & y_{(x)}^{(4)} - y_0^{(4)} = \quad (9) \\ & p \left(-\frac{\alpha}{y_{(x)}^4} - \frac{\beta}{y_{(x)}^2} - 0,65 \frac{g}{w} \frac{\beta}{y_{(x)}} \right) = 0 \end{aligned}$$

با ضرب طرفین معادله در $y_{(x)}^{(4)}$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} & y_{(x)}^{(4)} [y_{(x)}^{(4)} - y_0^{(4)}] = \quad (10) \\ & P \left[-\alpha - \beta y_{(x)}^2 - 0,65 \frac{g}{w} \beta y_{(x)}^3 \right] \end{aligned}$$

برای حل معادله (۱۰) ، جواب را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$y = y_0 + py_1 + p^2 y_2 + \dots \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 y_0(x) &= 1 \\
 y_1^{(4)} &= -\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta \\
 y_1^{(3)} &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) x + c_1 \\
 y_1^{(2)} &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{x^2}{2} + c_1 x + c_2 \\
 y_1^{(1)} &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{x^3}{6} + c_1 \frac{x^2}{2} + c_2 x + c_3 \\
 y_1 &= \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{x^4}{24} + c_1 \frac{x^3}{6} + c_2 \frac{x^2}{2} + c_3 x + c_4
 \end{aligned}$$

برای به دست آوردن ۴ ثابت از ۴ شرط مرزی داده

شده استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned}
 y(0) = 1 &\rightarrow y_0(0) + Py_1(0) = 1 \rightarrow y_1(0) = 0 \rightarrow c_4 = 0 \\
 y'(0) = 0 &\rightarrow y_0'(0) + Py_1'(0) = 0 \rightarrow y_1'(0) = 0 \rightarrow c_3 = 0 \\
 y(1) = 1 &\rightarrow y_0(1) + Py_1(1) = 0 \rightarrow y_1(1) = 0 \rightarrow \\
 \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{1}{24} + c_1 \frac{1}{6} + c_2 \frac{1}{2} &= 0 \\
 12c_2 + 4c_1 &= -\left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \quad \text{I} \\
 y'(1) = 0 &\rightarrow y_0'(1) + Py_1'(1) = 0 \rightarrow y_1'(1) = 0 \\
 \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{1}{6} + c_1 \frac{1}{2} + c_2 &= 0 \\
 6c_2 + 3c_1 &= -3\left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \quad \text{II}
 \end{aligned}$$

با حل دستگاه دو معادله - دو مجهول متشکل از

روابط I و II مقادیر مربوط به ثوابت C_1 و C_2 به دست می آید:

$$\begin{aligned}
 c_1 &= -\frac{5}{2} \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) = \\
 &\quad \frac{5}{2} \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \\
 c_2 &= \frac{3}{4} \left(-\alpha - \beta - 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \\
 &= -\frac{3}{4} \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right)
 \end{aligned}$$

با در نظر گرفتن ثابت های به دست آمده، پاسخ معادله

با شرایط مرزی دوم به صورت زیر معادله ۱۵ و یا ۱۶

$$u(x) = \left(\left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{x^4}{24} - c_1 \frac{x^3}{6} - c_2 \frac{x^2}{2} \right) \quad (15)$$

خواهد به د:

$$u(x) = \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \left(\frac{x^4}{24} - \frac{5x^3}{12} + \frac{3x^2}{8}\right) \quad (16)$$

برای به دست آوردن ۴ ثابت از ۴ شرط مرزی داده

شده استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned}
 y(0) = 1 &\rightarrow y_0(0) + Py_1(0) = 1 \rightarrow y_1(0) = 0 \rightarrow c_4 = 0 \\
 y'(0) = 0 &\rightarrow y_0'(0) + Py_1'(0) = 0 \rightarrow y_1'(0) = 0 \rightarrow c_3 = 0 \\
 y''(1) = 0 &\rightarrow y_0''(1) + Py_1''(1) = 0 \rightarrow y_1''(1) = 0 \rightarrow c_2 \\
 &= \frac{1}{2} \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) - c_1 \\
 y'''(1) = 0 &\rightarrow y_0'''(1) + Py_1'''(1) = 0 \rightarrow y_1'''(1) = 0 \rightarrow \\
 c_1 &= \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \\
 c_2 &= -\frac{1}{2} \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right)
 \end{aligned}$$

حال تمامی ثابت ها به دست آمده است. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned}
 \lim_{P \rightarrow 1} y_0 + Py_1 &= 1 + y_1 \\
 \rightarrow u &= 1 - y \\
 u &= -y_1 \\
 u(x) &= \left(\left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \frac{x^4}{24} - c_1 \frac{x^3}{6} - c_2 \frac{x^2}{2} \right)
 \end{aligned}$$

نکته: روش هموتویی، یک روش عددی و بر اساس

بسط چند جمله ای است که جواب آن در $(P^n)x \rightarrow$

∞ با پاسخ تحلیلی برابر است. به دلیل ماهیت معادله

صورت مساله که معادله ای غیر خطی است، در حل معادله

بیش از دو جمله در نظر گرفته نشد.

با جای گذاری ثابت ها در معادله فوق خواهیم داشت:

$$u(x) = \left(\alpha + \beta + 0,65 \frac{g}{w} \beta\right) \left(\frac{x^4}{24} - \frac{x^3}{6} + \frac{x^2}{4}\right) \quad (14)$$

که در رابطه ۱۴ حاصل مقادیر α ، β و $\frac{g}{w}$ مقادیر

مشخصی هستند.

۲-۱-۲- حالت دوم شرایط مرزی: تیر

دوسرگیردار

به طور مشابه برای تیر دو سر گیردار نیز شرایط مرزی

به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned}
 y(0) = 1 &\quad y'(0) = 0 \\
 y(1) = 1 &\quad y'(1) = 0
 \end{aligned}$$

به استفاده از روابط به دست آمده در بخش پیشین

داریم:

۳- نتایج مربوط به تیر یک سرگیردار

با استفاده از نرم افزار متلب و روش هموتوبی، به ازای هر α ، β و g/w داده شده و با استفاده از روابط نهایی حاصل شده در روابطی که قبلاً ذکر گردید، می توان پارامتر پولین را برای نانو تیر^۱ حساب کرد. در آغاز ناپایداری، بیشینه جا به جایی تیر بدون افزایش در مقدار بتا افزایش خواهد یافت به عبارت دیگر شیب منحنی $\beta-u$ برابر با صفر می شود زمانی که پولین^۲ رخ می دهد، یعنی زمانی که $d\beta/du(x=1) \rightarrow 0$ و $d\beta/du(x=0.5) \rightarrow 0$ به ترتیب برای تیرهای یک سرگیردار و دوسرگیردار صفر می شوند. به عنوان دیدگاه پذیرفته شده، ولتاژ پولین نانو تیر را می توان با ترسیم $u(x=1)$ در مقابل β برای تیر یک سر گیر دار و $u(x=0.5)$ در مقابل β برای تیر دو سرگیردار محاسبه کرد. به طور مشابه، برای نانو تیرهای ساده با $(\beta=0)$ ، جا به جایی بحرانی نیروهای بین مولکولی را می توان با ترسیم $u(x=1)$ و $u(x=0.5)$ در مقابل α به ترتیب برای تیر یک سرگیردار و تیر دو سرگیردار محاسبه کرد. البته شایان ذکر است که با افزایش تعداد جملات در حل تحلیلی جواب های دقیق تر و البته نزدیک تر به نتایج عددی حاصل خواهد شد. تاثیر نیروی جاذبه ی کازمیر در تغییر شکل و ولتاژ پولین برای تیر یکسر گیردار در شکل ۶ و ۷ برای مقادیر مختلف g/w نشان داده شده است.

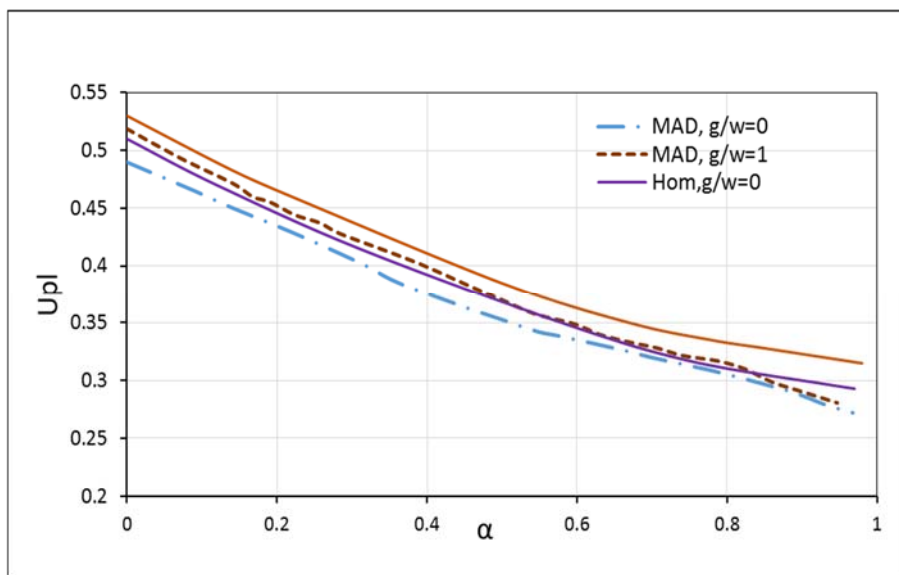
باید توجه شود که، U_{pl} بیانگر تغییر شکل سر تیر یک سر آزاد در شروع ناپایداری است. همانطور که دیده می شود، نیروی کازمیر باعث کاهش تغییر شکل پولین و ولتاژ نانو تیر می شود.

همان طور که انتظار می رفت نتایج مربوط به الگوی رفتار نانو تیر که از روش های هموتوبی و ادمین حاصل شده، یکسان می باشد. نکته قابل ملاحظه، اختلاف بین نتایج دو روش است که در تعداد جملات پاسخ معادله ریشه دارد. برای روش ادمین پایه از ۶ جمله استفاده شده است، اما در روش هموتوبی به دلیل پیچیدگی روابط پاسخ های بیش از ۴ جمله هزینه محاسباتی و زمانی بسیار زیادی را به دنبال دارد. شکل های ۸ و ۹ مقایسه دو روش هموتوبی و ادمین را نشان می دهند.

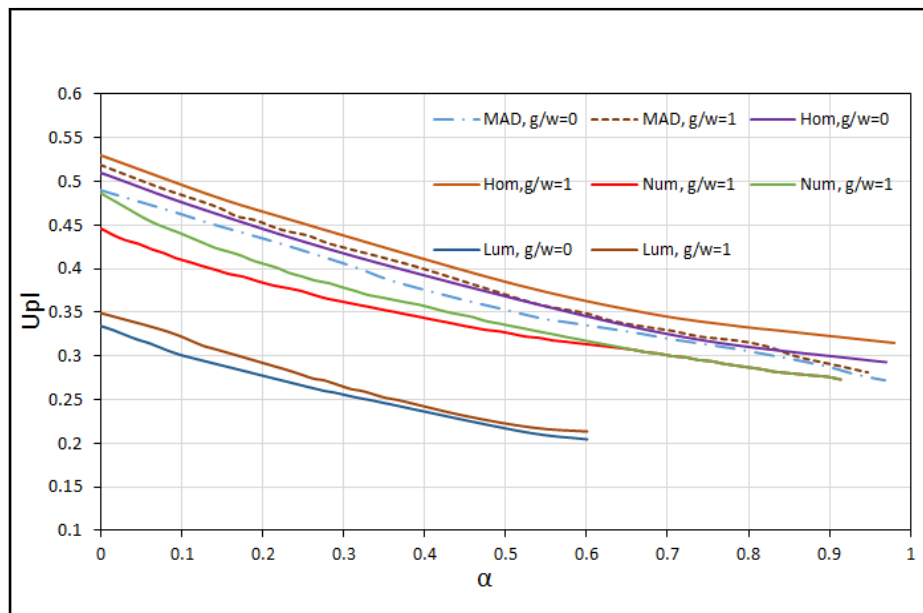
در شکل مقایسه تاثیر نیروی کازمیر بر ولتاژ پولین نانو تیریک سرگیردار در روش هموتوبی با کلیه محاسباتی دیفرانسیلی مشاهده می شود.

رابطه بین α و تغییر شکل سر نانو تیر در غیاب اختلاف ولتاژ در یا همان u ، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. زمانی که فاصله بین الکتروود و زمین به اندازه قابل توجهی کوچک باشد، این امکان به وجود می آید که الکتروود تحت نیروی کازمیر بر روی زمینه فرو بریزد. به عبارت دیگر α از مقدار بحرانی خود تجاوز می کند و u غیر قابل کنترل شده و موجب ناپایداری می شود.

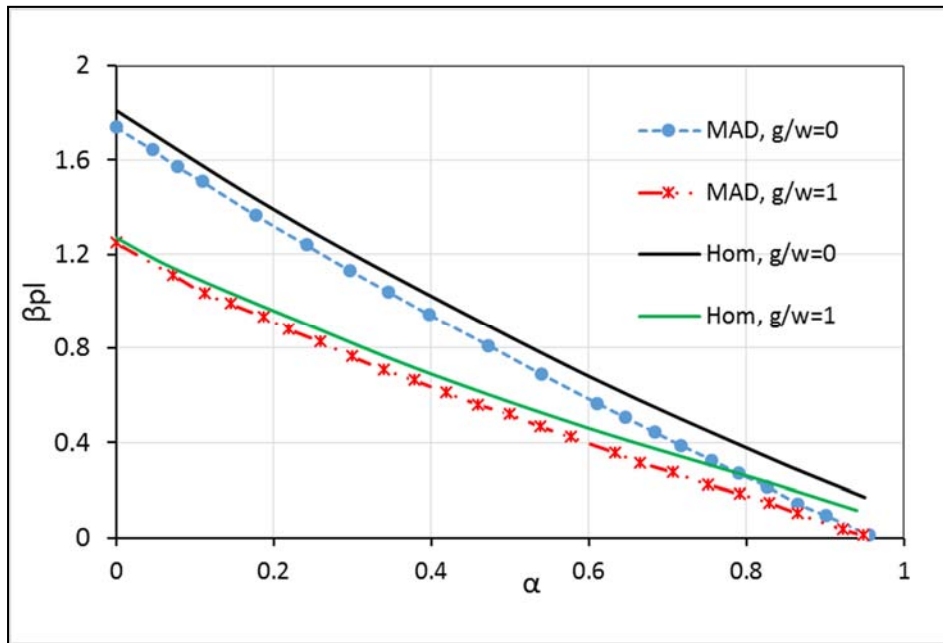
$$\alpha_c = 0.956(\text{MAD method})$$



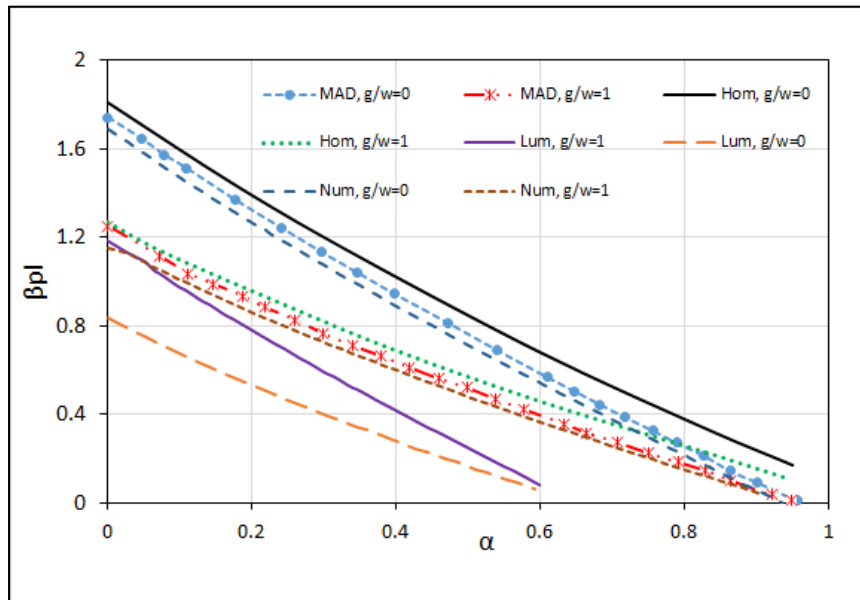
شکل (۶). تاثیر نیروی کازمیر بر تغییر شکل پولین نانوتیر یک سرگیردار برای مقادیر مختلف g/w



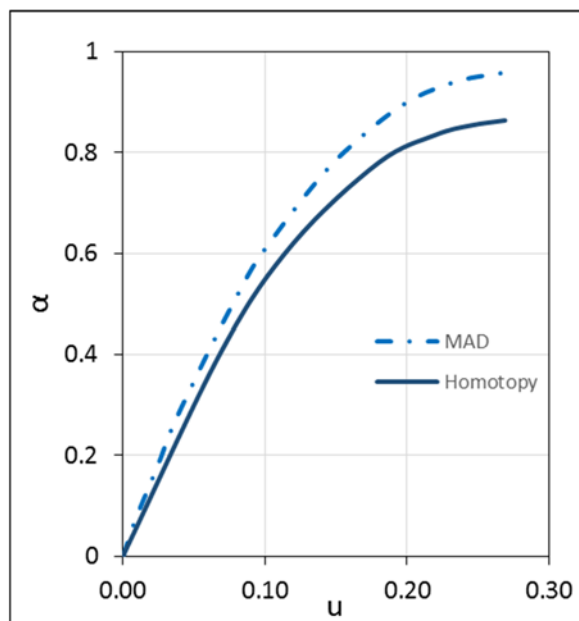
شکل (۷). تاثیر نیروی کازمیر بر تغییر شکل پولین نانوتیر یک سرگیردار برای مقادیر مختلف g/w



شکل (۸). تاثیر نیروی کازمیر بر ولتاژ پولین در نانو تیر یک سرگیردار برای مقادیر مختلف g/w



شکل (۹). تاثیر نیروی کازمیر بر ولتاژ پولین در نانوتیر یکسرگیردار برای مقادیر مختلف g/w



شکل (۱۰). رابطه بین α و تغییر شکل سر نانوتیر یک سر آزاد

دارد و در این مطالعه چهار جمله نخست تحلیل هموتویی ارائه شده است. از آنجایی که نتایج حاصل از روش دومین که در مقاله گزارش شده بود تعداد جملات بیشتری را در برداشت، میزان اختلاف بین نتایج (اختلاف در حدود ۱۰ درصد) در اکثر نتایج قابل توجه است. اختلاف بین مقادیر بحرانی α در روش هموتویی و دومین برای نانو تیر یکسر گیردار و نانوتیر دو سر گیردار به ترتیب ۱۰ درصد و ۹ درصد می باشد. همچنین الگوی نمودار رابطه بین α و تغییر شکل سر نانو تیرها حاصل از دو روش تحلیلی مشابه یکدیگر هستند.

اما نتایج مهم دیگر در این پژوهش آن است که؛ کاهش ضخامت یک میکروتیر دوسر گیردار و افزایش طول آن، باعث افزایش خیز میکروتیر خواهد شده و برای میکروتیرهای ضخیم تر، کاهش ضخامت باعث می شود که خیز میکروتیر با نسبت بزرگتری نسبت به میکروتیرهای نازک تر، افزایش یابد. همچنین بر اساس نتایج به دست

در هر شرایط گپ و ولتاژ بیشینه طول مجاز الکتروود به صورت L_{max} تعریف می شود و به همین شکل به ازای هر طول الکتروود مینیمم مقدار گپ بین الکتروود و زمینه قابل تعریف است به گونه ای که الکتروود تحت نیروی کازمیر به زمینه متصل نشود. اندازه طول الکتروود و کمینه گپ بین الکتروود و زمینه پارامترهای اساسی طراحی هستند و می تون آنها را بر حسب α_c (بحرانی) محاسبه کرد. بیشینه طول نانوتیر و حد اقل اندازه گپ بین نانو تیر و زمینه با کمک روابط مربوط به α ارائه شده در انتهای فصل قبلی و مقدار بحرانی α_c قابل محاسبه است (تاجمیر ۱۳۹۳).

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی بر آن شده است که حل دیفرانسیل رفتار نانوتیر تحت اثر جذب کازمیر به روش هموتویی حل شود و نتایج حاصل با نتایج مشابه گزارش شده در مقاله مبنا مقایسه گردد. همان گونه که پیشتر اشاره شد، روش هموتویی نیاز به محاسبات بسیار سنگین ریاضی

-Zhao X., A. R. Eihab, and A. H. Nayfeh 2004. A reduced-order model for electrically actuated micro-plates, *J. Micromech.*, 14: 900-906.

-Noghrehabadi A., M. Eslami, and M. Ghalambaz 2013. Influence of size effect and elastic boundary condition on the pull-in instability of nano-scale cantilever beams immersed in liquid electrolytes. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, (52): 73-84.

-Kong, S., 2013. Size effect on pull-in behavior of electrostatically actuated microbeams based on a modified couple stress theory, *Applied Mathematical Modelling*, 37: 7481-7488.

-Hadjesfandiari, Ali., 2011. Couple stress theory for solids, *International Journal of Solids and Structures* 48:2496–2510.

-Shengli K., Sh. Zhou, Zh. Nie, and K. Wang 2008. The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler microbeams, *International Journal of Engineering Science* 46:427–437.

-Jia X.L., J. Yang, S. Kitipornchai, and C. W. Lim 2011. Pull-in instability and free vibration of electrically actuated poly-SiGe graded micro-beams with a curved ground electrode, *Applied Mathematical Modeling* 36:1875–1884.

-Rezazadeh G., M. Fathalilou, and M. Sadeghi 2011. Pull-in Voltage of Electrostatically-Actuated Microbeams in Terms of Lumped Model Pull-in Voltage Using Novel Design Corrective Coefficients, *Sense Imaging* 12: 117–131.

-Tadi B. Y., M. R. Abadyan, and A. R. Noghrehabadi 2011. Investigation of Size Effect on the Pull-in Instability of Beamtype NEMS under van der Waals Attraction, *Procedia Engineering*, 10: 1718-1723.

آمده مشخص شد که افزایش ضریب پواسون باعث افزایش خیز میکروتیر می‌شود.

از طرفی حداکثر خیز یک میکروتیر دوسر گیردار با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش خواهد یافت. که این افزایش در ابتدا به صورت خطی و سپس بصورت غیرخطی و با شیب بسیار زیاد اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر حداکثر خیز میکروتیر با تغییر مقدار α_1 چندان دچار تغییر نمی‌شود. هر چند که برای مقادیر بزرگتر از α_1 این تغییرات چشمگیرتر خواهد بود. نکته دیگر این که با افزایش نسبت طول به ضخامت میکروتیر دو سر گیردار، افزایش حداکثر خیز میکروتیر حاصل خواهد شد. همچنین، با افزایش ضخامت میکروتیر (و در حالیکه طول آن ثابت نگه داشته می‌شود) مقدار حداکثر خیز میکروتیر کاهش می‌یابد.

مراجع

-تاجمیری، علی، ۱۳۹۳. مطالعه تئوری اثر نیروی کازمیر بر رفتار میکروتیر با استفاده از روش هموتویی بهینه شده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی الیگودرز.

-Hu, Yuh-Chung. 2006. Closed form solutions for the pull-in voltage of micro curled beams subjected to electrostatic loads, *J. Micromech. Microeng*, 16, 648-655.

-Younis M. I., and A.H. Nayfeh 2003. A study of the nonlinear response of a resonant micro-beam to an electric actuation, *Nonlinear Dynamics*, 31: 91-17.

-Ramezani A., A. Alasty, and J. Akbari 2006. Influence of van der waals force on the pull-in parameters of cantilever type nanoscale electrostatic actuators, *Microsyst. Technol*, 12: 1153-1161.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه ۳۳-۴۰

بررسی نقش شتاب حرکتی و گرانش زمین در تئوری برای ماهواره‌های چند مرحله‌معادلات حرکتی موشک

محمدرضا مقومی^{۱*}، آبتین شمیلی^{۲*}، محمود محمدخانی^{۳*}، نسا زمانی بختیاروند^۴

چکیده

برای طراحی، محاسبه و ساخت موشک‌های فضایی نیاز به محاسبات دقیق ریاضی و شبیه‌سازی آن‌ها توسط نرم‌افزارهای کاربردی با دقت مناسب می‌باشد. موشک‌های ماهواره‌بر، براساس نوع سوخت به موشک‌های با سوخت جامد، مایع، شیمیایی و هیبریدی تقسیم می‌شوند. همچنین از لحاظ ساختمان می‌توانند به صورت یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و یا سه مرحله‌ای طراحی و ساخته شوند. در این مقاله با توجه به روابط ریاضی حاکم بر دینامیک ذرات، نقش شتاب حرکتی و گرانش زمین در معادلات کاربردی موشک‌های ماهواره‌بر، مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند. این معادلات شامل: اندازه حرکت، نیروهای اعمال شده به موشک‌ها، معادلات سرعت از شروع تا جدا شدن از میدان گرانشی، ضربه‌ی ویژه و تاب‌گیری فضاپیما می‌باشند. هم‌چنین در تحقیق پیشرو علاوه بر بررسی روابط حاکم، به نقاط بحرانی طراحی و محاسبه موشک‌ها توجه شده است.

واژه‌های کلیدی

موشک‌های فضایی، سوخت موشک، ضربه ویژه، شتاب حرکتی

۱- عضو هیات علمی موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

* نویسنده مسئول: moghoomi@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده هنر، دانشگاه سوره

۳- دانش‌آموخته مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی پژوهان پیشرو

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۱- مقدمه

به دست آمده از قانون فوریه و کاتنیو، تقریب بهتری برای انتقال حرارت می‌باشد (Chen 2001).

کریستیانسن و کرا^۴ در تحقیقی پیرامون معادلات محدود بالستیک برای محافظت از فضاپیما معادلات قابلیت عملکرد بالستیک را در خصوص سیستم حفاظت کننده در ایستگاه فضایی بین‌المللی مورد تحلیل قرار دادند و روش‌هایی را برای بهبود عملکرد معرفی نموده‌اند (Christiansen and Kerr 2001).

گانا و هافمن^۵ در تحقیقی در خصوص شرایط هندسی برای بالستیک و حرکت کنترلی چشمی به این نتیجه رسیده‌اند که حرکت بالستیک مستقل از مدت‌زمان حرکت بوده و از یک الگوی سه‌بخشی در الگوی شتاب موج سینوسی تبعیت می‌کند (Gana and Hoffmann 2007).

دیوید ریدل^۶ در رابطه با بهینه‌سازی سیستم موشک‌های با سوخت مایع توسط الگوریتم ژنتیک در پژوهش خود کدهای سرعتی آئرو دینامیکی را در شرایط مختلف بررسی و بهینه‌ترین حالت را در طراحی‌های مؤثر ارائه نموده‌اند (Riddle et al. 2009).

چارلز^۷ در سال ۲۰۰۹ تحقیقات مناسبی را در رابطه با استفاده از پلاسما برای نیروی محرکه‌ی فضاپیما انجام داد. در این تحقیق اصول تخلیه پلاسما‌ی اعمال شده جهت تأمین نیروی محرکه‌ی فضاپیما مورد بررسی قرار گرفته است (Charles 2009).

روش تحقیق در این مقاله، بررسی عوامل دینامیکی حرکت موشک‌های ماهواره‌بر به صورت معادلات ریاضی حاکم می‌باشد.

پیش‌ران‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های دینامیکی محسوب می‌شوند که با معادلات بسیار ساده اما قابل‌گسترشی همراه هستند. امروزه با گسترش فعالیت شاخه‌های مختلف مهندسی مکانیک و هوا و فضا چشم‌انداز روشنی در خصوص فرستادن موشک‌های ماهواره‌بر، ترسیم شده است. هم‌چنین محققین زیادی به مطالعه در این زمینه پرداخته‌اند. این مطالعات در خصوص بررسی عوامل طراحی، محاسبه، ساخت و بهینه‌سازی انواع موشک‌های فضایی و نظامی صورت گرفته است.

اوزان تکینالپ^۱ در تحقیقی با عنوان شبیه‌سازی آنیلینگ برای بهینه‌سازی موشک‌ها؛ گسترش روش‌ها و فن‌های فرمولی گسترش زیادی برای برآورد مطلوب جهانی در زمینه‌ی برنامه‌ی خنک‌سازی پیشنهاد کرده است. برای بررسی این مقوله نیز دو راهکار را پیشنهاد داده است (Tekinalp and Bingol 2004).

منون^۲ در پژوهشی تحت عنوان طراحی یکپارچه‌ی هدایت موشک‌های سریع و سیستم‌های خلبان اتوماتیک به تحلیل موشک‌های با هدایت خودکار پرداخته‌اند. در این پژوهش نتایج حاصله با استفاده از یک شبیه‌سازی شش درجه آزادی موشک، مورد تحلیل قرار گرفته است. آن‌ها اعتقاد داشتند که با این تحلیل بتوانند در کاهش وزن موشک‌ها و تلفات انسانی مؤثر واقع شوند (Menon and Ohlmeyer 2001).

گانگ چن^۳ در مقاله‌ای با عنوان معادلات انتشار هدایت گرمایی بالستیک معادلات مشتق شده از بولترمن را مورد تحلیل قرار داد و نتیجه‌گیری کرد که معادلات

4 Christiansen and Kerr

5 Gana and Hoffmann

6 David B. Riddle

7 -Charles

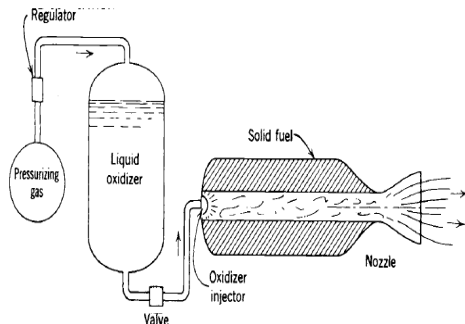
1- Ozan Tekinalp

2- Menon

3- Gang Chen

۲- عملکرد استاتیکی

منع انرژی لازم در موشک می‌تواند شیمیایی، هسته‌ای، یا خورشیدی باشد. اندازه حرکت داده شده به سیال ممکن است ناشی از فشار یا نیروی الکترواستاتیکی یا الکترومغناطیسی باشد؛ بنابراین انواع موتورهای موشکی با مشخصه‌های عملکردی ویژه وجود دارد. کاربرد معادله‌ی اندازه حرکت، وابستگی رانش به وجود آمده را به دبی جرمی پیش‌ران، سرعت و فشار خروجی و همچنین شرایط نشان می‌دهد. رانش موشک به عوامل گوناگون نظیر نوع سوخت مصرفی، ساختار آئرونامیکی، نوع موتور طراحی شده و نیروهای حرکت بالستیکی و ... بستگی دارد. نمونه‌های متفاوتی از موشک‌های با سوخت‌های مختلف در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) مشاهده می‌شوند.



شکل (۳). راکت با سوخت هیبریدی (جامد و مایع) (Biblarz 2001)

۳- روابط ریاضی

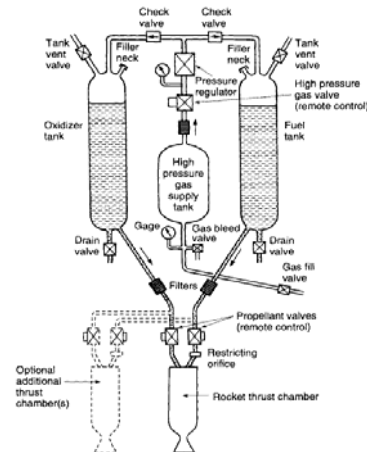
در این تحلیل رانش موشک ساکنی را در نظر می‌گیریم که برای سادگی محاسبات، فرض می‌شود که جریان یک‌بعدی با سرعت خروجی U_e و دبی پیش-ران \dot{m} است.

سطح معیار ساکن S را عمود بر جهت خروجی از شیپوره در نظر می‌گیریم. نیروی رانش مثبت T در جهت مخالف U_e عمل می‌کند. اگر سیال خروجی پیوسته فرض شود، فشار درون صفحه‌ی خروجی شیپوره P_e و فشار محیط P_a را باید در نظر گرفت.

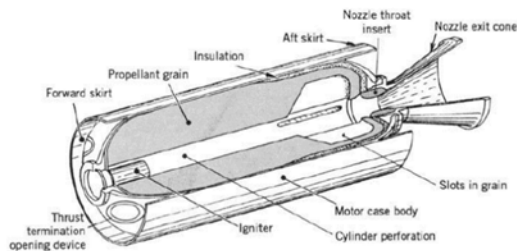
روابط (۱) تا (۶) از منبع (Hill and Peterson 1992) استفاده شده است. مساحت مقطع جت، همان مساحت خروجی شیپوره A_e است. به همین صورت معادله‌ی اندازه حرکت چنین حجم معیاری عبارت است از:

$$\sum F_x = \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho u_x dv + \int_{cv} u_x dm \quad (1)$$

که در آن F_x مؤلفه‌ی نیرو در جهت x ، ρ الی سیال، u_x مؤه‌ی سرعت سیال در جهت x ، V حجم، \dot{m} دبی رمی جریان (مثبت برای جریان



شکل (۱). راکت با سوخت مایع (Biblarz 2001)

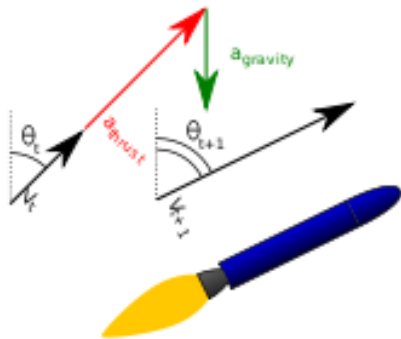


شکل (۲). راکت با سوخت جامد (Biblarz 2001)

در رابطه (۶)، سرعت خروجی U_e و بر اساس تعریف فوق، معادله‌ی نیروی تراست (رانش) به صورت رابطه‌ی (۷) خواهد شد:

$$\tau = \dot{m} \cdot u_{eq} \quad (۷)$$

شکل (۴) نمودار سرعت و نیروی بردار حرکت یک موشک فضایی را در طول زمان حرکت نشان می‌دهد.



شکل (۴). نمودار سرعت و نیروی بردار حرکت در یک وسیله نقلیه فضایی در طول راه‌اندازی

اما اگر سرعت u_{eq} ثابت باشد، باید مقدار ضربه در واحد جرم پیش‌ران (که متغیر عملکردی مهمی به شمار می‌رود) محاسبه شود. حالتی که m جرم از دست می‌دهد همان حالتی است که در پرواز موشک با آن سروکار داریم. برای این سیستم، جرم درون حجم توسط سطح خارجی موشک و صفحه‌ی تخلیه‌ی شیپوره تعریف می‌شود. در خارج از این سیستم، نمودار جسم آزاد مقدار لحظه‌ای جاذبه‌ی گرانشی mg ، مقاومت آئرودینامیکی R ، و نی pA ناشی از فشار استاتیکی میانگین p در صفحه‌ی تخلیه‌ی شیپوره با مساحت A را نشان می‌دهد. آهنگ جریان جرمی برابر است با \dot{m} . پس می‌توان معادله‌ی حرکت موشک، $\sum F = -\dot{m}u + m\dot{v}$ را به صورت رابطه (۸) نوشت:

$$pA - mg - R = m\dot{v} + \dot{m}u \quad (۸)$$

خروجی) است. همچنین Cv و C به رتیب حجم معیار و سطح معیار را نشان می‌دهند.

جریان شار اندازه و حرکت به صورت رابطه (۲) می‌باشند:

$$\int_{CS} u_x dm = \dot{m}u_e \quad (۲)$$

اگر فشار بر روی سطح کنترل، به جز در صفحه جهت، یکنواخت و مساوی P_a باشد، مجموع نیروها را از رابطه (۳) می‌توان در نظر گرفت:

$$\sum F_x = \tau + (A_e P_a) - A_e P_e \quad (۳)$$

درواقع برای موشک‌های شیمیایی، رانش در نتیجه‌ی توزیع فشار یا تنش بر روی سطح‌های درونی و بیرونی است. با استفاده از معادله‌ی اندازه حرکت، رانش کلی را برحسب شرایط صفحه‌ی خروجی می‌توان محاسبه کرد. بنابراین از رابطه (۴) برای محاسبه نیروی تراست (پیش ران) خواهیم داشت:

$$\tau = \dot{m}u_e + (P_e - P_a)A_e \quad (۴)$$

البته اگر فشار در صفحه خروجی با فشار محیط مساوی باشد، نیروی رانش از رابطه‌ی (۵) قابل دست‌یابی است:

$$\tau = \dot{m} \cdot u_e \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، τ نیروی پیش ران می‌باشد. از طرفی هنگامی که سیال تا فشار محیط انبساط می‌یابد، رانش موشک برای شرایط اتاق و مساحت گلوگاه مفروضی، بیشتر خواهد شد. بر همین اساس سرعت خروجی معادل u_{eq} به صورت رابطه‌ی (۶) قابل محاسبه است:

$$u_{eq} = u_e + \left(\frac{P_e - P_a}{\dot{m}} \right) A_e \quad (۶)$$

و یا

$$\dot{m}u + pA - mg - R = m\dot{v} \quad (9)$$

معادله‌ی (۹) همان صورت $\sum F = ma$ را دارد که در جمله‌ی نخست در $\sum F$ نیروی رانش $T = \dot{m}u$ است. بنابراین موشک را می‌توان به صورت جسمی شیب‌سازی کرد که نیروی رانش خارجی T بر آن وارد می‌شود (شکل ۴-۷ ب) و مسئله را می‌توان مانند هر مسئله‌ی دیگر $F = ma$ تحلیل کرد با این تفاوت که m تابعی از زمان است.

توجه کنید که در مراحل اولیه‌ی حرکت که اندازه‌ی سرعت v موشک کمتر از سرعت نسبی u گاز خروجی از شیبوره است، سرعت مطلق v_0 گاز خروجی به سمت عقب خواهد بود. از طرف دیگر، وقتی سرعت موشک به v برسد که اندازه‌ی آن از u بزرگ‌تر است، سرعت مطلق v_0 گاز خروجی به طرف جلو است. به ازای آهنگ جریان جرمی مفروض، نیروی رانش T موشک فقط به سرعت نسبی خروج گاز از شیبوره، u وابسته است و به اندازه یا امتداد سرعت مطلق خروج گاز، v_0 بستگی ندارد.

در بررسی اجسامی که جرمشان با زمان تغییر می‌کند، فرض کردیم که همه‌ی اجزای جرم m جسم، در همه‌ی لحظات با سرعت v حرکت می‌کنند و سرعت ذرات جرمی که به جسم افزوده شده یا از آن کاسته می‌شوند، در هنگام ورود به جسم، یا خروج از آن، به طور ناگهانی تغییر می‌کند. این تغییر سرعت را به صورت ناپیوستگی ریاضی مدل‌سازی کردیم. در جهان واقعی، این تغییر سرعت نمی‌تواند ناپیوسته باشد، هرچند این گذار ممکن است خیلی سریع اتفاق بیافتد. مثلاً در مورد موشک، تغییر سرعت به صورت پیوسته بین منطقه‌ی احتراق و صفحه‌ی تخلیه شیبوره رخ می‌دهد (Meriam and Kraige 2007).

مشخصه بسیار مهم دیگری که در مهندسی موشک‌های ماهواره‌بر باید در نظر گرفته شود، ضربه ویژه پیش‌ران می‌باشد. ضربه کل پیش‌ران وارد به موشک در حین شتاب‌گیری از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$I = \int T dt = M_p u_{eq} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، M_p جرم کل سوخت خروجی است. همچنین برای ارزیابی موتورهای سوخت استاندارد مشخصه‌ی دیگری به نام ضربه‌ی ویژه پیش‌ران موتور I_s تعریف شده است. فرق پیش‌ران ویژه و ضربه‌ی ویژه در آن است که پیش‌ران نسبت نیروی پیش‌ران به دبی وزنی سوخت و ضربه‌ی ویژه نسبت نیروی پیش‌ران به دبی جرمی سوخت است که از رابطه (۱۱) قابل دست‌یابی است.

$$I_s = \frac{P}{m} \left(\frac{KgF.S}{Kg} \right) \text{ or } (m/s) \quad (11)$$

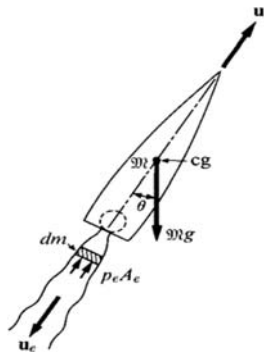
واحد ضربه‌ی پیش‌ران موتور سوخت مایع (I_s) با سرعت مؤثر جریان خروجی W_c در معادله‌ی P_{sy} برابر است. یعنی به هنگام پرواز در شرایط خلأ، ضربه‌ی ویژه‌ی پیش‌ران موتور با رابطه‌ی (۱۲) با پیش‌ران ویژه مربوط می‌شود:

$$I_s = \frac{P}{m} \left(\frac{KgF.S}{Kg} \right) \text{ or } (m/s) \quad (12)$$

سرعت ایده‌آل موشک‌های چندمرحله‌ای از جمع جبری سرعت‌های به دست آمده به وسیله‌ی هر مرحله خواهد بود. در این حالت وزن تمامی مراحل بعدی و بار مفید برای مرحله‌ی قبلی موشک به عنوان بار مفید در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۳).

$$V_E = -w_{c1} \ln \mu_{E1} - w_{c2} \ln \mu_{E2} - \dots - w_{cn} \ln \mu_{En} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، μ_{E1} نسبت وزن خشک مرحله‌ی اول به کل وزن موشک در مرحله‌ی اول می‌باشد.



شکل (۵). دیاگرام آزاد شتاب گرفتن موشک در میدان گرانشی

اما با توجه به دیاگرام آزاد، در صورتی که مرکز جرم لحظه‌ای موشک در نقطه cg فرض شود، نیروی خالص به وجود آمده در اثر گاز خروجی که می‌تواند تأمین کننده‌ی سرعت باشد $(Pe - Pa)Ae$ در جهت حرکت موشک بوده و با در نظر گرفتن جرم موشک در مرکز ثقل آن (Mg) ، که نسبت به موشک زاویه θ می‌سازد به صورت معادله (۱۷) خواهد بود.

$$\sum Fx = (pe - pa)Ae - D - Mg \cdot \cos \theta \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، D نیروی پسا در نظر گرفته می‌شود. همچنین Pe و Pa به ترتیب فشار خروجی و فشار جو می‌باشند. از طرفی اگر تغییرات سرعت du فرض شود و نیروی پسا در نظر گرفته نشود، با انتگرال‌گیری از معادله متأثر از تغییرات سرعت، Δu از رابطه (۱۸) قابل دستیابی می‌باشد:

$$\Delta u = -u_{eq} \ln(M/M_0) = u_{eq} \ln(M_0/M) \quad (18)$$

که در این رابطه Δu تغییر در سرعت موشک و M_0 جرم اولیه می‌باشد. نسبت جرم هنگامی که M_b جرم موشک در زمان جدا شدن سیستم رانش در نظر گرفته شود، از رابطه (۱۹) قابل محاسبه است:

برای محاسبه شتاب حرکتی موشک‌های ماهواره‌بر، رابطه (۱۴) مناسب‌ترین معادله می‌باشد. در این معادله g تاب گرانشی موضعی، g_e شتاب گرانشی در سطح زمین، R_e شعاع زمین، h فاصله از سطح زمین می‌باشد.

$$g = g_e \left(\frac{R_e}{R_e + h} \right)^2 \quad (14)$$

معمولاً دوره‌ی رانش موشک‌های شیمیایی هنگامی - که فاصله‌ی پیموده شده به وسیله‌ی موشک کسر کوچکی از شعاع زمین است و شتاب گرانشی تغییر زیادی نکرده است، پایان می‌پذیرد (Hill and Peterson 1992).

همچنین نسبت ضربه ویژه و شتاب گرانشی را می‌توان بر اساس رابطه (۱۵) به دست آورد.

$$I_s = \frac{I_t}{m_p \cdot g_0} \quad (15)$$

در معادله (۱۴)، I_s ضربه ویژه، I_t ضربه کل حاصل از انرژی ایجادشده، m_p جرم سوخت مصرفی، g_0 شتابگرانشی می‌باشند.

۴- آنالیز حرکت و شتاب موشک‌ها

به علت این که بخش بزرگی از جرم کل موشک‌ها شامل جرم پیش‌ران می‌باشد، بنابراین جرم موشک در حین پرواز تغییرات زیادی داشته و برای تعیین سرعت باید مدنظر قرار گیرد. شکل (۵) شتاب‌گیری موشک را به صورت دیاگرام آزاد نشان می‌دهد.

اگر جرم لحظه‌ای موشک M ، و سرعت را u فرض کنیم، سرعت خروجی گازهای احتراقی u_e ، و سرعت موشک به $u + du$ تبدیل خواهد شد. به همین جهت تغییر اندازه حرکت جرم موشک dm از معادله (۱۵) به دست آمده خواهد آمد.

$$dm(u - u_e) - dm \cdot u = -dm \cdot u_e \quad (16)$$

طی زمان حرکت در حال احتراق است و نمی‌تواند ثابت فرض شود.

از دیگر نتایج بررسی معادلات حرکت موشک‌ها می‌توان به نیروی گرانشی زمین اشاره کرد. همان‌گونه که در روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود، شتاب جاذبه زمین نقطه بحرانی محاسبات مهندسی دینامیک حرکت می‌باشد و نه تنها در ضربه ویژه، بلکه در برآورد نیروهای وارد بر ماهواره‌بر و شتاب‌گیری آن مؤثر است. به همین جهت در محاسبات صورت گرفته، تاب‌گیری موشک‌ها طبق استانداردهای موجود در محدوده‌ی مشخصی در نظر گرفته می‌شوند. با عنایت به جداول استاندارد موجود ماکزیمم شتاب ماهواره‌های کنترلی بزرگ کمتر از ۰/۱ شتاب گرانشی می‌باشند. آنچه مسلم است در معادلات بررسی‌شده در این مقاله، از آثرو دینامیک پروازی موشک و نیروهای مقاوم ناخواسته صرف‌نظر شده است.

منابع

- Tekinalp O., and M. Bingol 2004. Simulated Annealing for Missile Optimization: Developing Method and Formulation Techniques, Journal of Guidance, Control, and Dynamics 27 (4): 616-626.
- Menon, P., and Ernest J. Ohlmeyer 2001. Integrated design of agile missile guidance and autopilot systems, Control Engineering Practice 9(10): 1095-1106.
- Chen., Gang. 2001. Ballistic-Diffusive Heat-Conduction Equations, Physical Review Letters 86(11): 2297-300.
- Christiansen, Eric L., and Justin H. Kerr 2001. Ballistic limit equations for spacecraft shielding, International Journal of Impact Engineering 26 (1-10): Pages 93-104.

$$R = \frac{M_o}{M_b} \quad (19)$$

بر اساس جداول استاندارد، میزان شتاب ماکزیمم انواع موشک‌ها به صورت جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱). عملکرد برخی از موشک‌ها بر اساس مدت‌زمان شلیک و شتاب ماکزیمم (Biblarz) (2001)

کاربرد	مدت‌زمان شلیک	ماکزیمم شتاب
راه‌انداز بزرگ به همراه تقویت‌کننده	۲ تا ۸ دقیقه	۱/۲ تا ۶ برابر
موشک هوا پرتاب هدایت‌شونده	۲ تا ۵ ثانیه	بالاتر از ۲۵ برابر
موشک‌های جنگی پرتاب از زمین	بالاتر از ۲ دقیقه	بالاتر از ۱۰ برابر
موشک‌های پرتابی به وسیله شلیک‌کننده‌ها	کمتر از چند ثانیه	بیش از ۲۰۰۰۰ برابر شتاب گرانشی
ماهواره‌های کنترلی بزرگ (حمل توسط وسیله نقلیه)	بیش از چند ساعت	کمتر از ۰/۱ شتاب گرانشی
موتورهای قابل‌استفاده مجدد برای شاتل‌های فضایی	بیش از ۷ ساعت	-
موشک‌های فرو در ماه	۴ دقیقه	بیش از شتاب گرانشی
موشک‌های بدون کمکی	۰/۲ تا ۳ ثانیه	بیش از ۲۰ برابر شتاب گرانشی

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس معادلات حاکم بر دینامیک حرکت موشک‌های ماهواره‌بر، در کلیه روابط حاکم، جرم کل سازه‌ی پرتابی باید متغیر و بر مبنای زمان حرکت فرض شود. به علت اینکه در ابتدای حرکت جرم موشک شامل پیش‌ران و ماهواره می‌باشد. طبیعی است با آغاز حرکت، جرم مواد جامد، مایع و یا ترکیبی از این دو

- Biblarz, Oscar. 2001. Rocket Propulsion Element, Department of Aeronautics and Astronautics Naval Postgraduate School :9.
- Biblarz, Oscar. 2001. Rocket Propulsion Element, Department of Aeronautics and Astronautics Naval Postgraduate School :10.
- Hill, Philip G., and Carl R. Peterson. 1992. Mechanics and Thermodynamics of Propulsion, Second Edition 511-514.
- Meriam, G. L., and L. Glenn. Kraige. 2007. Engineering Mechanics (Dynamics), Eight Edition :309-310.
- Hill, Philip G., and Carl R. Peterson. 1992. Mechanics and Thermodynamics of Propulsion, Second Edition :511-514.
- Oscar Biblarz. 2001. Rocket Propulsion Element, Department of Aeronautics and Astronautics Naval Postgraduate School :24.
- Tekinalp, O., and M. Bingol 2004. Simulated Annealing for Missile Optimization: Developing and Method Formulation Techniques, Journal of Guidance, and Dynamics 27(4): 616-626.
- Gana, Kh. Ch., and E. R. Hoffmann 2007. Geometrical conditions for ballistic and visually movements 31(5): 829-839.
- Riddle, D. B., R. J. Hartfield, J. E. Burkhalter, and Rh. M. Jenkins 2009. Genetic-Algorithm Optimization of Liquid-Propellant Missile Systems, Journal of Spacecraft and Rockets 46(1): 151-159.
- Charles., Christine . 2009. Plasmas for spacecraft propulsion, Journal of Physics D: Applied Physics 42(16):18.
- Biblarz, Oscar. 2001. Rocket Propulsion Element, Department of Aeronautics and Astronautics Naval Postgraduate School :7.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۹

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه ۴۱-۵۴

مدلسازی دینامیکی ربات بالارونده سندبلاست

محمد گهري*، محدثه رمضي، نیما همتا^۲

چکیده

این پژوهش به طراحی و تحلیل ربات بالارونده ای به منظور عملیات سندبلاست می پردازد که برای حرکت از چرخ و برای گیرش به سطح کار از مغناطیس دائم استفاده می کند. این پژوهش شامل فرآیند طراحی و مدلسازی در نرم افزار سالیدورک و ساخت نمونه اولیه ربات، بیان ساختار مکانیکی و سیستم ضد سقوط ربات و همچنین ساختار نازل پاشش سندبلاست است. ربات در حالات استاتیکی و دینامیکی تحلیل و در نهایت با انجام آزمایشاتی به بررسی عملکرد ربات تحت فشار کمپرسور در زوایای متفاوت از سطوح مختلف پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی

ربات سندبلاست، ربات بالارونده، ربات چرخ دار، مکانیزم چسبندگی مغناطیسی دائم

۱ - استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

* نویسنده مسئول: Moh-gohari@arakut.ac.ir

۲ - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اراک

۳ - استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

۱- مقدمه

ربات های بالارونده نوعی از ربات های متحرک هستند که قادرند روی مسیرهای دوبعدی و سه بعدی مانند دیوارها، سقف‌ها، پشت بام‌ها و سازه‌های هندسی جهت انجام وظایف خاص حرکت کنند. ربات‌ها ابزارهایی مفیدند که می‌توانند در کارهای سخت به انسان‌ها کمک کنند. مانند کار در نیروگاه هسته‌ای، نقاشی ساختمان، تمیز کردن شیشه برج‌های بلند (Akinfiyev et al. 2009). بازرسی (Nam et al. 2014) جوشکاری (Shang et al. 2008)، سندبلاست و رنگ پاشی سطح مخازن نفتی، هرس کردن درختان و غیره. ربات‌ها نه فقط قادرند در انجام کارهای تکراری، سخت و طاقت فرسا جایگزین انسان‌ها شوند، بلکه دقت و کارایی آنها نسبت به انسان‌ها بیشتر است. این ربات‌ها به علت عمود بودن فضای کاری، علاوه بر وزن خود باید قابلیت حمل بار متناسب با وظایف خود را داشته باشند. بنابراین از مهمترین عواملی که در طراحی ربات های بالارونده باید لحاظ شود، مکانیزم گیرشی و مکانیزم حرکتی ربات ها روی مسیر تعیین شده هست. ربات‌های بالارونده از لحاظ مکانیزم حرکتی به صورت زیر دسته بندی می شوند.

۱- پاها و بازوها (Minor et al. 2000)

۲- چرخ ها و شنی ها (Kim et al. 2008)

۳- سیم بکسل ها و ریل ها (Warszawski 1999)

۴- فریم‌های لغزشی (Apostolescu et al. 2011)

۵- حرکت با نیروی فن (Akinfiyev et al. 2009)

از دیدگاه مکانیزم گیرش نیز به این صورت دسته‌بندی می‌شوند:

۱- مکانیزم گیرش مغناطیسی (Rochat et al. 2009)

۲- چسبندگی نیوماتیکی (Drexler 2005, Zhang et

al. 2010, Chu et al. 2009)

۳- مکانیزم گیرش مکانیکی (Bretl et al. 2006)

(Birkmeyer et al. 2012)

۴- چسبندگی الکترواستاتیکی (Prahlad et al. 2008)

۵- چسبندگی شیمیایی (Kennedy et al. 2006)

هدف از این پژوهش طراحی رباتی بالارونده از سطوح فازی به منظور انجام عملیات هایی نظیر بازرسی، تعمیرات، جوشکاری، سندبلاست و غیره است. از این میان مکانیزم حرکتی چرخ و شنی و گیرش مغناطیسی به سبب سادگی و کم هزینه بودن مناسب است.

در این پژوهش، ابتدا مکانیزم حرکتی و چسبندگی و اجزای ربات، طراحی و ساختار مکانیکی آن بررسی شده است. سپس معادلات استاتیکی و دینامیکی آن تحلیل می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از طراحی و ساخت نمونه اولیه ربات بالارونده سندبلاست آورده شده است.

۲- طراحی ربات بالارونده سندبلاست

هدف اصلی از ساخت این ربات، توانایی انجام عملیات سندبلاست در ارتفاع و یا در حالت عمودی است. همچنین این ربات باید بتواند از برآمدگی های موجود در سطح کار مثل خطوط جوش (ارتفاع تا ۵ میلی متر) عبور کند و انتظار می رود در کل مسیر، حرکت سریع و روانی داشته باشد بدون اینکه چسبندگی خود با سطح را در حین حرکت از دست بدهد و بتواند به هر نقطه ای از مسیر حتی با وجود کثیفی و زنگ زدگی برسد و هیچ گونه لغزشی نداشته باشد. همانطور که در شکل نشان داده شده است ساختمان این ربات بالارونده از دو چرخ در هر سمت و در مجموع چهار موتور گیربکس دار و یک دم در انتها و تجهیزات مربوط به سندبلاست مانند نازل پاشش و شلنگ تشکیل شده است. در ساخت این ربات سعی بر آن بوده که تا حد امکان ربات کوچک و ارزان و سبک باشد. پس تلاش شده همه اعضا در سائز و وزن کم انتخاب شوند. مثلا برای انتخاب موتور در صورتیکه سائز موتور زیاد باشد حداقل فاصله ی بین

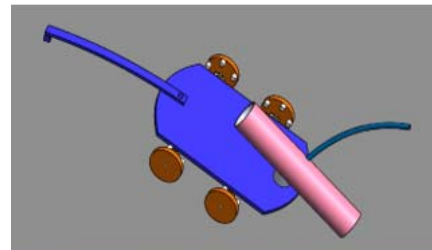
چرخ ها افزایش و در نتیجه سایز کلی ربات نیز افزایش می یافت. مشخصات اجزای به کار رفته در این ربات به صورت جدول ۱ است.

جدول (۱). مشخصات تجهیزات ربات

نام اجزا	تعداد	وزن واحد برحسب گرم	سایر مشخصات
صفحه پایه	۱	۴۱	طول - عرض: ۱۲۰-۱۴۰ میلی متر
دم	۱	۸	طول: ۱۳۰ میلی متر
چرخ	۴	۴	قطر: ۳۵ میلی متر
لوله سندبلاست	۳	۶۰	قطر: ۵-۱۰-۲۳ میلی متر طول: ۱۵۵ میلی متر
موتور گیربکس دار	۴	۱۴	۵۰ دور بر دقیقه
باتری	۲	۳۸	۹ ولت
آهنربا	۲۰	۲	قطر: ۵ میلی متر ارتفاع: ۲ میلی متر
مجموعه ربات	۱	۲۵۹	ابعاد: ۲۴۰-۱۵۵-۷۵ میلی متر

۱-۲- چرخ مغناطیسی

این ربات ۴ چرخ به قطر ۳۵ میلی متر در ساختمان خود دارد که به صورت متقارن در دو سمت بدنه ربات قرار گرفته اند.



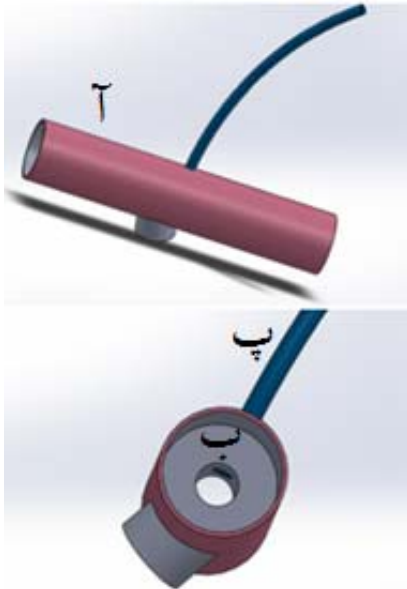
۲-۲- موتور

در مکانیزم های مختلف با توجه به ساختار کلی ربات ها و نیاز آن ها به سرعت یا قدرت و نحوه عملکرد، موتورهای متفاوتی انتخاب می شود. در این مدل سازی از موتور $50\ rpm$ استفاده شده است.



شکل (۱). طراحی ربات سندبلاست در نرم افزار *solidworks* و مدل سازی اولیه

و فشار با توجه به بقای انرژی کم می شود. انرژی جنبشی با افت فشار یا گرادیان فشار بالانس می شود. برای محاسبه افت فشار در لوله ونتوری می توان از ترکیب معادله پیوستگی و معادله برنولی معادله‌ای به دست آورد.



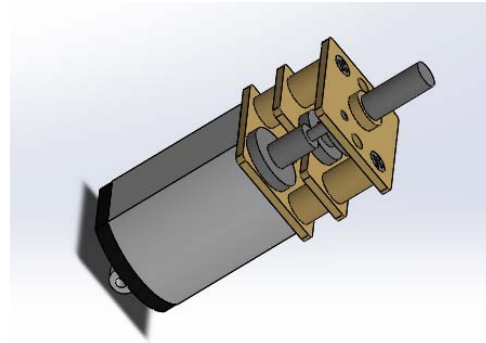
شکل (۱): طراحی نازل سندبلاست در نرم افزار *solidworks* و مدلسازی اولیه

با توجه به معادله برنولی در شرایط سیال غیرقابل تراکم، هنگامی که سیال در یک عمق ثابت حرکت می کند، در این موارد فرض ($H_1 = H_2$) درست است. تحت چنین شرایطی، رابطه برنولی به شکل زیر نوشته می شود (White 2009).

$$P_1 + 1/2\rho v_1^2 = P_2 + 1/2\rho v_2^2 \quad (1)$$

که در آن P فشار، ρ چگالی و v سرعت است. از این معادله نتیجه گرفته می شود که با افزایش سرعت سیال در یک عمق ثابت، فشار آن کاهش خواهد یافت.

برای به وجود آوردن شرایط برقراری قانون برنولی، باید لوله (ب) را درون لوله (آ) قرار داد. به گونه ای که



شکل (۲). موتور مدلسازی شده در *solidworks*

۲-۳- مکانیزم چسبندگی مغناطیسی

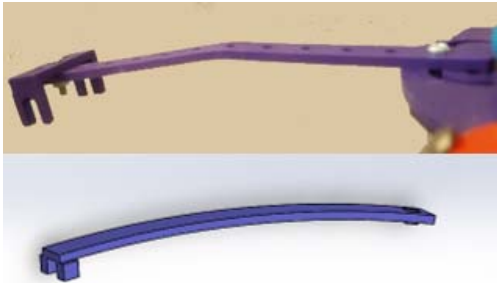
ساختار مکانیزم مغناطیسی این ربات به این صورت است که بر روی محیط هر چرخ ۵ عدد آهنربای نئودیمیوم با فاصله معین قرار گرفته و مکانیزم چسبندگی مغناطیسی دائم را تشکیل داده اند که حرکت عمودی ربات روی سطوح فلزی را ممکن می کند.

آهنرباهای نئودیمیوم روی چرخ به صورت غیرمتقارن با چرخ سمت مخالف قرار داده شده است به صورتی که در لحظه ای که در چرخ سمت راست، آهنربا از صفحه فلزی کنده می شود آهنربای غیر متقارن در چرخ سمت چپ به دیواره بچسبد و به سبب این درگیری تعادل ربات روی دیواره حفظ می شود و هم اینکه از آهنربای کمتر و در نتیجه وزن کمتری استفاده شده است.

۲-۴- ساختار نازل

ساختار نازل از یک لوله با قطر ۲۳ میلی متر (آ) و یک لوله درون آن با قطر ۱۰ میلی متر (ب) تشکیل شده است که مجموع طول هر دوی آنها ۱۵۵ میلی متر می باشد. همچنین یک لوله با قطر ۵ میلی متر (پ) به لوله کوچکتر متصل شده است.

در ساختار نازل از اثر ونتوری استفاده شده است. اثر ونتوری اثر کاهش فشار سیال است در زمانی که سیال از قسمت تنگ لوله عبور می کند. وقتی قطر لوله کوچک می شود با توجه به معادله پیوستگی، سرعت زیاد می شود



شکل (۴). طراحی دم انتهایی در نرم افزار solidworks و مدلسازی اولیه

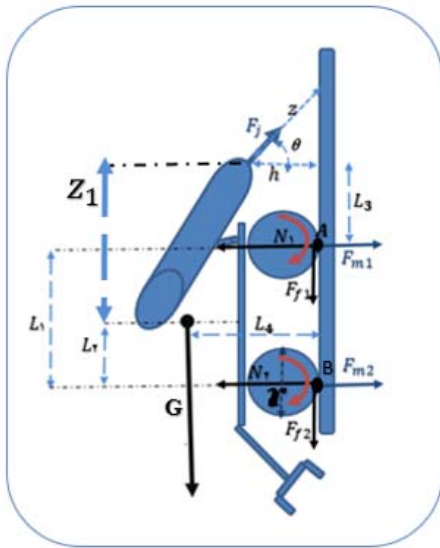
۳- تحلیل معادلات

۳-۱- تحلیل نیروهای استاتیکی

در این بخش نیروهای استاتیکی را در چهار حالت تحلیل می‌شوند (Beer et al. 2015).

۳-۱-۱- حالت اول

هنگامی که ربات به صورت ثابت روی دیوار عمودی توقف کرده است و پاشش سندبلاست وجود ندارد.



شکل (۵). نیروهای وارد بر ربات در حالت عمودی

برآیند نیروها در حالت تعادل استاتیکی صفر خواهد بود. تعادل نیرویی در راستای X و Y:

به علت کاهش ناگهانی قطر از لوله (آ) به لوله (ب) سرعت افزایش و فشار کاهش می‌یابد. افزایش سرعت به اثر بخشی بیشتر نازل سندبلاست کمک می‌کند و از طرفی با کاهش فشار در لوله (ب) اختلاف فشاری بین لوله (ب) و لوله (پ) متصل به آن به وجود می‌آید که موجب انتقال ذرات شن به نازل و در نتیجه سندبلاست خواهد شد.

فاصله نازل تا سطح کار حدوداً ۴ سانتی متر و با زاویه نسبتاً مایل است تا در صورت توسعه ربات و استفاده از آن در رنگ آمیزی از *Over Spray* جلوگیری شود و رنگ بدون سایه روشن باشد.

۲-۵- دم ربات

در انتهای این ربات یک دم وجود دارد که از دو قسمت تشکیل شده است. بخش اول قطعه ای افقی و ساده است که برای نزدیکتر شدن آن به سطح کار اندکی به آن انحنا و شکم داده شده است. در انتهای این قطعه دیگری عمود بر آن وجود دارد که تا چند میلی متر نزدیک سطح کار می‌رسد. هدف از قرار دادن این قطعات در انتهای ربات این بوده است که در هنگام عبور از موانعی مثل جوش، هنگامی که چرخ جلو اتصال خود با سطح را از دست داده و شیب پیدا می‌کند و موجب افزایش گشتاور و بالا رفتن احتمال سقوط می‌شود، این دم با نیرویی که به سطح وارد میکند از جدایش ربات از سطح جلوگیری کرده و چرخ جلو را مجدداً به سطح برساند. همچنین هنگامی که در فشارهای کاری نسبتاً بالا (تا کمتر از ۱۰ bar) نیروی جت از نازل به سطح در جهت عکس نیروی تکیه گاهی وارد می‌شود موجب جدایش چرخ جلو از سطح می‌گردد. در این شرایط دم به کمک ربات آمده و از سقوط چرخ جلوگیری می‌کند و چرخ های جلو را مجدداً به سطح برمی‌گرداند.

۳-۱-۴- حالت چهارم: بررسی شرط عدم لیز خوردن ربات^۲

اگر نیروی کشش صفحه کم باشد ربات لغزش خواهد نمود. فرض می کنیم که نیروهای اصطکاکی بتوانند بر وزن غلبه کنند تا این مشکل حل گردد. بنابراین:

$$2F_f \geq G \quad (10)$$

$$2N = 2F_m + F_j \cos \theta \quad (11)$$

$$F_f = N\mu = (F_m + F_j/2 \cos \theta)\mu \quad (12)$$

$$F_m \geq \frac{1}{2}(G/\mu - F_j \cos \theta) \quad (13)$$

بنابراین نیروی مغناطیسی باید بیشترین مقدار بین معادله های ۹ و ۱۳ باشد.

۳-۲- تحلیل دینامیکی

در این بخش معادله های حرکت ربات در حالت دینامیکی دو بعدی بررسی می شود (Beer et al. 2015). برای ساده سازی این معادلات فرضیات زیر به کار برده می شود:

- ۱- ربات بالارونده یک جسم صلب یکپارچه است.
- ۲- مرکز جرم ربات در مرکز هندسی آن قرار گرفته است.
- ۳- هیچ لغزشی در چرخ ها وجود ندارد.
- ۴- اصطکاک بین چرخ ها و دیواره به صورت متقارن و یکنواخت است و در مرکز ربات قرار گرفته است.
- ۵- ربات بالارونده متقارن است بنابراین تحلیل نیرویی به شکل دو بعدی صورت می گیرد.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{m1} + F_{m2} - N_1 - N_2 = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow -F_{f1} - F_{f2} - G = 0 \quad (3)$$

۳-۱-۲- حالت دوم

هنگامی که ربات به صورت ثابت روی دیوار عمودی توقف کرده است و پاشش سندبلاست وجود دارد.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{m1} + F_{m2} - N_1 - N_2 + F_j \cos \theta = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_j \sin \theta - F_{f1} - F_{f2} - G = 0 \quad (5)$$

۳-۱-۳- حالت سوم: بررسی شرط عدم لغزش^۱

اگر ربات حول نقطه B بچرخد و چرخ جلو را بلند کند اتصال به صفحه قطع شده و ربات لغزش و سقوط خواهد داشت. پس برای اینکه ربات تعادل استاتیکی خود را از دست ندهد گشتاور حول نقطه B صفر خواهد بود.

$$\sum M_B = 0 \rightarrow GL_4 - L_1 N_2 + F_{m2} L_1 - L_3 F_j \cos \theta - h F_j \sin \theta = 0 \quad (6)$$

$$F_{m2} = \frac{F_j(h \sin \theta + L_3 \cos \theta) - GL_4}{L_1} + N_2 \quad (7)$$

اگر چرخ به صفحه بچسبد و جدا نشود پس:

$$N_1 = N_2 = N \geq 0 \quad (8)$$

$$F_{m1} = F_{m2} = F_m \geq \frac{F_j(h \sin \theta + L_3 \cos \theta) - GL_4}{L_1} \quad (9)$$

بنابراین نتیجه می گیریم نیروی چسبندگی مغناطیسی در هر یک از چرخ ها باید در معادله بالا صدق کند تا ربات چسبیده به صفحه باقی بماند.

² sliding

¹ slippage

جهت ربات بالارونده F_L و F_R نیروهای موتور راست و چپ هستند که با هم برابرند. f اصطکاک بین چرخ و دیواره است. G وزن ربات J گشتاور اینرسی حول مرکز جرم ربات بالارونده، d فاصله بین چرخ راست و چپ با مرکز جرم ربات بالارونده است. براساس قانون دوم نیوتن رابطه زیر به دست می آید.

$$m\dot{V} = F_j \cos \theta - G - f + 2F_R + 2F_L \quad (18)$$

سرعت ربات بالارونده در مختصات عمومی $q=[x,y,\theta]^T$ به شکل زیر نوشته می شود.

$$v=\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta \quad (19)$$

شتاب ربات بالارونده به صورت زیر حاصل می شود.

$$\dot{v} = \ddot{x} \cos \theta + \ddot{y} \sin \theta - \dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + \dot{y} \cos \theta \dot{\theta} \quad (20)$$

در معادله بالا \dot{x} و \dot{y} سرعت های مرکز جرم ربات بالارونده در جهات x, y هستند و به همین ترتیب $\dot{\theta}$ و \ddot{x} شتاب های مرکز جرم در جهات x, y خواهند بود. از جاگذاری معادله ۲۰ در معادله ۱۸ معادله زیر حاصل خواهد شد.

$$\begin{aligned} mr \cos \theta \ddot{x} + mr \sin \theta \ddot{y} &= F_R \cos \theta \quad (21) \\ + mr \sin \theta \dot{\theta} \dot{x} - mr \cos \theta \dot{\theta} \dot{y} &+ 2\tau_R \\ + 2\tau_L - fr - mgr \sin \theta & \end{aligned}$$

۳-۳-۱- تعادل گشتاور ها:

$$J\ddot{\theta} = 2F_R d - 2F_L d \quad (22)$$

$$\tau = Fr \quad (23)$$

$$\frac{rJ}{2d} \ddot{\theta} = \tau_R - \tau_L$$

۳-۳-۲- شرط عدم لغزش ربات:

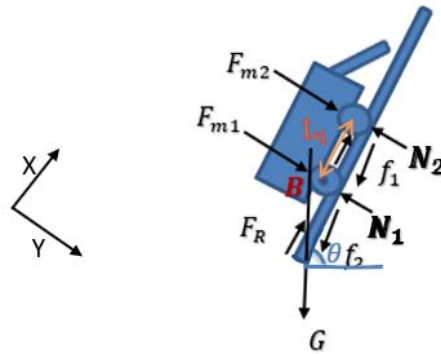
ربات در جهت مستقیم حرکت میکند و لغزش در جهت راست و چپ ندارد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (24)$$

از این معادله نسبت به زمان دیفرانسیل می گیریم.

$$\sin \theta \ddot{x} - \cos \theta \ddot{y} = -\cos \theta \dot{\theta} \dot{x} - \sin \theta \dot{\theta} \dot{y} \quad (25)$$

معادلات دینامیکی حرکت روی سطح شیبدار به صورت زیر خواهد بود.



شکل (۶). نیروهای وارد بر ربات روی سطح شیبدار

$$F_R = \tau_R / r \quad F_L = \tau_L / r \quad (14)$$

$$\sum F_x = ma_x \quad (15)$$

$$2F_R - f_2 - f_1 - G \cos \theta = m\ddot{x}$$

$$\sum F_y = ma_y \quad (16)$$

$$F_{m2} + F_{m1} - N_2 - N_1 + G \sin \theta = 0$$

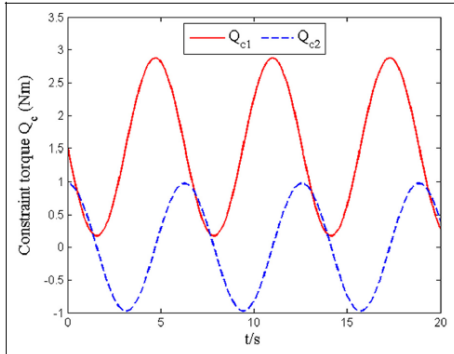
$$\sum M_B = I\alpha \quad (17)$$

$$(F_{m2} - N_2)L_1 + G \sin \theta \times L_1/2 = I\ddot{\theta}$$

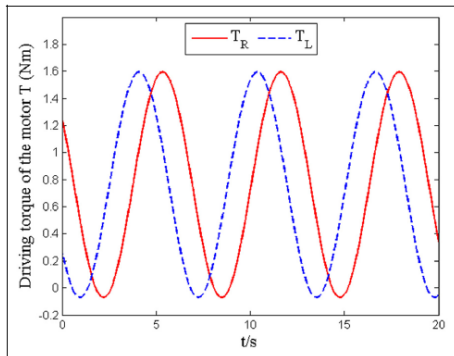
۳-۳-۳- تحلیل سینماتیک مستقیم

مرجع اصلی xoy در نظر گرفته می شود که در آن جرم m (مرکز جرم در نقطه O) در صفحه دو بعدی حرکت می کند. مختصات عمومی $q=[x,y,\theta]^T$ براساس ساختار مرکز جرم ربات بالارونده نوشته شده است که در آن V سرعت ربات بالارونده θ زاویه تغییر

نمودارهای ۴ و ۵ نشان دهنده مقادیر گشتاورهای ثابت و محرک موتورها است.



نمودار (۴). منحنی مقادیر گشتاور ثابت



نمودار (۵). نمودار گشتاورهای محرک موتور

۴-۱- تحلیل عملکرد ربات

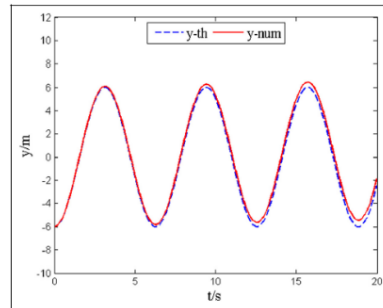
۴-۱-۱- آزمایش اول

در ابتدا فشار 1 bar را به دستگاه اعمال شده و سرعت حرکت ربات روی صفحه فلزی به ضخامت ۱ سانتیمتر در زاویه های مختلف شیب صفحه بررسی می شود. در این آزمایش سرعت حرکت ربات براساس شیب های متغیر را بررسی شد. همانطور که از نمودار مشخص است زاویه و سرعت با هم نسبت عکس دارند زیرا ربات در حرکت خود با افزایش شیب، نیاز به غلبه بیشتری بر نیروی وزن دارد که موجب کاهش سرعت حرکت آن می شود.

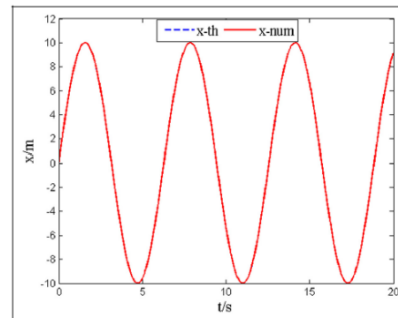
با حل سه معادله ۲۵ و ۲۳ و ۲۱ گشتاورهای چرخ ها در سمت راست و چپ (T) قابل محاسبه خواهد بود.

۴- نتایج

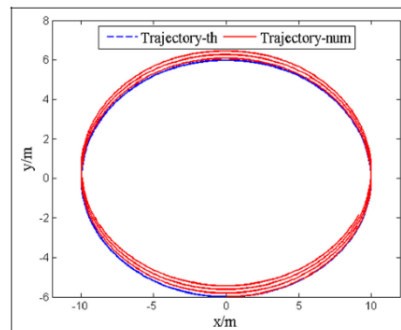
نمودارهای مربوط به حرکت ربات بالارونده به صورت زیر است.



نمودار (۱). مقایسه مقادیر عددی و تئوری مسیر حرکت ربات در راستای y



نمودار (۲). مقایسه مقادیر عددی و تئوری مسیر حرکت ربات در راستای x



نمودار (۳). مقایسه مقادیر عددی و تئوری مسیر حرکت ربات بالارونده

جدول (۱). تغییر سرعت حرکت متناسب با شیب صفحه

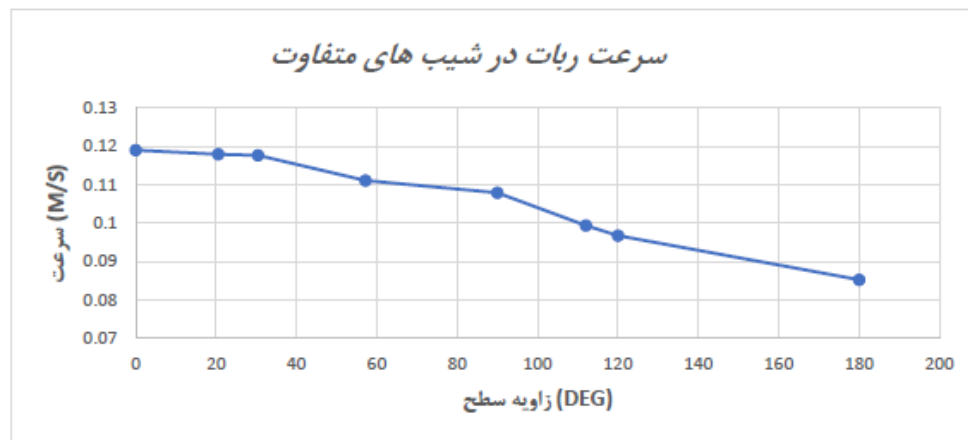
طول حرکت (m)	شیب (deg)	زمان (s)	سرعت (m/s)
۰.۵	۰	۴.۱	۰.۱۱۹۸
۰.۵	۱۵.۲۵	۴.۲۰	۰.۱۱۹۰
۰.۵	۲۰.۵۵	۴.۲۴	۰.۱۱۷۹۲
۰.۵	۳۰.۴۳	۴.۲۵	۰.۱۱۷۶۵
۰.۵	۵۷.۱۸	۴.۵۰	۰.۱۱۱۱
۰.۵	۹۰	۴.۶۳	۰.۱۰۷۹
۰.۵	۱۱۲	۵.۰۳	۰.۰۹۹۴
۰.۵	۱۲۰	۵.۱۷	۰.۰۹۶۷۱
۰.۵	۱۸۰	۵.۵۶	۰.۰۸۵

۴-۱-۲-آزمایش دوم

ریات را در زوایای گوناگون قرار داده و با وجود فشار کمپرسور، زاویه ای که ربات در آن تسلیم نیروی

وزن و پیشرانه جت شده و سقوط می کند ثبت می شود. برای این آزمایش سطح فلزی با ضخامت ثابت ۱ میلی متر را در زاویه های مختلف قرار داده و سپس ربات روی آن قرار گرفته و تحت فشار ۶ bar که حداکثر فشار دستگاه است به حرکت در می آید. این آزمایش به این علت طراحی شده است تا محدودیت حرکتی ربات شناسایی شود.

همانطور که در تصاویر مربوط به شکل ۷ قابل مشاهده است ربات تحت هیچ زاویه ای با فشار ۶ bar از سطح فلزی جدا نمی شود. حال با قرار دادن ربات در سطوح با شیب مختلف، تاثیر زاویه بر نیروی مغناطیسی بررسی می شود. هرچه شیب سطح افزایش یافته مقدار نیروی مغناطیسی آن کمتر شده و نیروسنج راحت تر ربات را از صفحه فلزی کنده شده است. تا جایی که در شیب ۱۸۰ که ربات برعکس روی سطح قرار گرفته مقدار نیروی مغناطیسی به ۶ کاهش یافته است که به علت حداکثری بودن نیروی وزن است.



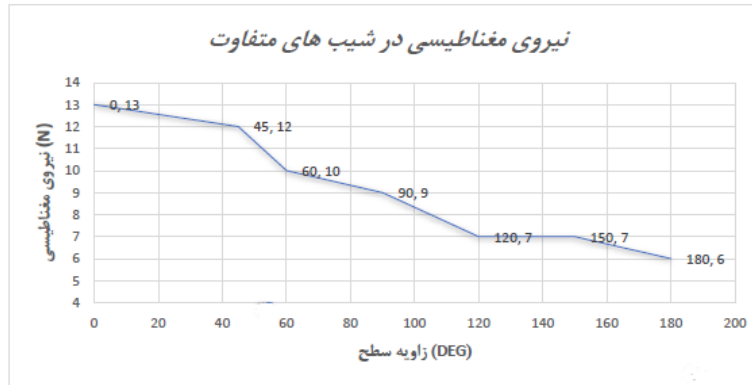
نمودار (۶). تغییر سرعت حرکت متناسب با شیب صفحه



شکل (۲). ربات بالارونده سندبلاست در زوایای مختلف

جدول (۳). تغییرات نیروی مغناطیسی در شیب های گوناگون

زاویه سطح فلزی (deg)	نیروی مغناطیسی (N)
۰	۱۴
۴۵	۱۳
۶۰	۹
۹۰	۱۰
۱۲۰	۷
۱۵۰	۷
۱۷۰	۸
۱۸۰	۶



نمودار (۷). تغییرات نیروی مغناطیسی متناسب با شیب

۴-۱-۴-آزمایش چهارم

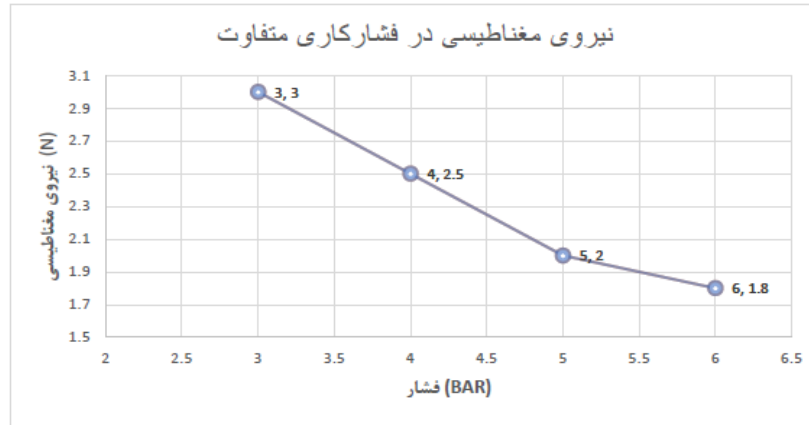
بر اساس داده های موجود در نمودار ۹ در یک جنس ثابت از صفحه، با افزایش ضخامت نیروی چسبندگی مغناطیسی افزایش خواهد یافت.

جدول ۲. تغییرات نیروی مغناطیسی در فشارهای کاری متفاوت

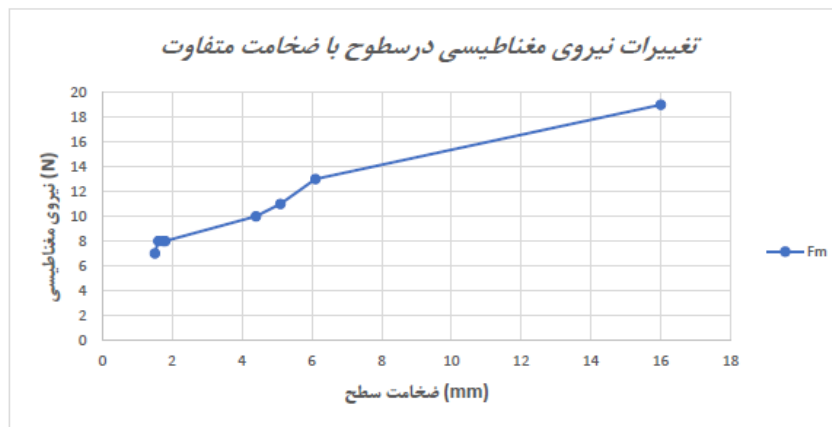
نیروی مغناطیسی (N)	فشار کاری (bar)
۳	۳
۲,۵	۴
۲	۵
۱,۸	۶

۴-۱-۳-آزمایش سوم

اگر زاویه سطح فلزی ۹۰ درجه و ربات عمودی تحت فشارهای مختلف قرار گرفته باشد، نیروی مغناطیسی برای کندن چرخ جلو از سطح متفاوت خواهد بود. همانطور که از نمودار ۸ مشخص است در فشارهای کاری بالاتر نیروی مغناطیسی کمتری وجود دارد زیرا نیروی فشار هوا برخورد به صفحه در جهت مخالف با نیروی مغناطیسی است و به آن غلبه می کند و در نتیجه راحت تر می توان چرخ های جلو را از صفحه جدا نمود. گمان آن می رود که با افزایش مقادیر فشار کمپرسور بتوان چرخ های جلو را از صفحه جدا کرد. نکته جالب توجه این است که حتی پس از جدایی چرخ های جلو، دم طراحی شده در انتهای ربات از سقوط آن جلوگیری می کند و مجدداً چرخ های جلو را به سمت سطح بر می گرداند. با این نوآوری تحت فشارهای بالاتر از ۶bar هم احتمال سقوط ربات وجود نخواهد داشت.



نمودار (۸). تغییرات نیروی مغناطیسی در فشارهای کاری متفاوت



نمودار (۹). تغییرات نیروی مغناطیسی در ضخامت های گوناگون

۴-۱-۵-آزمایش پنجم

ارتفاع پاشش سندبلاست تحت فشارهای گوناگون

در حالت افقی بررسی می شود.



شکل (۳). پاشش شن از ربات سندبلاست تحت فشار ۱bar

در فشار ۰/۵bar محدوده پاشش کم بوده و به علت سرعت پایین ذرات در اثر فشار کم قدرت کافی برای سندبلاست را ندارد و مناسب به نظر نمی رسد. در فشار ۱bar پاشش مناسبتر از حالت قبل است و محدوده



شکل (۲). عملکرد ربات سندبلاست در فشار ۰/۵bar

ربات در هیچ یک از زاویه ها و فشارهای کاری آزمایش شده، ربات عملکردی خوب دارد و هدف اصلی و آغازین پژوهش یعنی ساخت ربات سبک و سریع با حرکتی روان و ایمن محقق شد. همچنین لوله و تئوری که در نازل استفاده شد به خوبی عمل کرده و پاشش مناسبی دارد. با افزایش شیب صفحه و با قرارگیری ربات در زوایای مختلف از سرعت حرکت ربات و همچنین نیروی مغناطیسی چرخ ها کاسته می شود ولی حتی در زاویه ۱۸۰ درجه و تحت فشار کمپرسور ربات سقوط نمی کند. ولیکن با افزایش مقادیر فشار، نیروی مغناطیسی در چرخ های جلو کاهش خواهد داشت. وجود قطعه ساده دم مانند در انتهای ربات مفید واقع شده و هنگام جدایش و گشتاور چرخ جلو به کمک ربات آمده و اجازه گردش چرخ عقب و در نتیجه سقوط را نمی دهد. ضخیم بودن صفحات کاری موجب افزایش مقدار نیروی مغناطیسی می شود که به عملکرد بهتر ربات کمک می کند.

مراجع

-Akinfiyev, T., A. A. Manuel and S. Nabulsi 2009. Climbing cleaning robot for vertical surfaces. *Industrial Robot: An International Journal* 36(4): 352-357.

- Apostolescu, T. C., N. Alexandrescu, G. Ionascu and L. Bogatu 2011. Design and control aspects of a climbing robot with vacuum cups attachment system. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics* 13(2):64-69.

-Birkmeyer, P., G. Andrew, and S. F. Ronald 2012. Dynamic climbing of near-vertical smooth surfaces, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.

-Bretl, T., S. Rock, J. C. Latombe, B. Kennedy and H. Aghazarian 2006. Free climbing with a multi-use robot.

و قدرت پاشش بیشتری دارد اما همچنان برای عملیات سندبلاست کافی نمی باشد.



شکل (۴). پاشش ذرات شن از نازل با فشار ۲bar

در فشار ۲bar به بالا محدوده به چند متر هم می رسد و ذرات شن و ماسه ضربه های عمیق تری وارد می کنند پس عملیات سندبلاست باید در فشارهای بالاتر انجام شود. چون هر چه فشار بالاتر باشد شدت ضربه ذرات بیشتر بوده و عملکرد ربات سندبلاست مناسب تر خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

آزمایشات متعددی صورت گرفت تا محدودیت ها و قابلیت های ربات را شناسایی کند. ربات حتی در زاویه های بالاتر از ۹۰ هم به سادگی به عملکرد خود ادامه می دهد. همچنین طی این آزمایشات ارزش وجودی دم ربات را درک کردیم و دانستیم که این قطعه در عین سادگی خود بسیار مفید می باشد و هنگام جدایش چرخ جلو از سطح در فشارهای کاری بالا، به کمک ربات آمده و اجازه نمی دهد که چرخ جلو گشتاور ایجاد کرده و موجب سقوط ربات شود.

در این پژوهش یک ربات سندبلاست طراحی شد که با توجه به نتایج آزمایش های انجام شده و عدم سقوط

- Journal of mechanical science and technology 28(12) :5175-5187.
- Pralhad, H., R. Pelrine, S. Stanford and R. Kornbluh 2008. Electroadhesive robot-wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology. Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA: 3028–3033.
- Rochat, F., P. Schoeneich, O. T. Nguyen and G. S. Virk 2009. Tripillar: miniature magnetic climbing robot with plane transition ability. International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR.
- Shang, J., B. Bridge, T. P. Sattar and A. Brenner 2008. Development of a climbing robot for inspection of long weld lines, *Industrial Robot* 35(3): 217-223.
- Warszawski, A., 1999. *Industrialized and Automated Building Systems: A Managerial Approach* Taylor & Francis Group.
- White, F. M., 2009. *Fluid mechanics*, University of Rhode Island.
- Zhang, H., W. Wang and J. Zhang 2009. High stiffness pneumatic actuating scheme and improved position control strategy realization of a pneumatic climbing robot. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.
- Experimental Robotics IX, Springer: 449-458.
- Chu, B., K. Jung, C. S. Han and D. Hong 2010. A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion. *International journal of precision engineering and manufacturing* 11(4):633-647.
- Cornwell, P., F. Beer, D. Mazurek, Jr. Johnston and E. Russell 2015. *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*
- Drexler, J., 2005. Robot workes with a head for heights, *Fraurhofer magazine* 1:34-35.
- Kim, H., D. Kim, H. Yang and J. Kim 2008. Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism. *Journal of mechanical science and technology*: 1490-1498.
- Kennedy, B., A. Okon, H. Aghazarian, M. Badescu, X. Bao, Y. B. Cohen, Z. Chang, B. E. Dabiri, M. Garrett, L. Magnone and S. Sherrit 2006. A robotic system for steep terrain access. *Industrial Robot: An International Journal* 33 (4): 265-269.
- Minor, M., H. Dulimarta, G. Danghi and D. M. Aslam 2000. Design, implementation, and evaluation of an under-actuated miniature biped climbing robot. Proceedings. International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- Nam, S., J. Oh, G. Lee and T. Seo 2014. Dynamic analysis during internal transition of a compliant multi-body climbing robot with magnetic adhesion.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه ۵۵-۶۵

ارزیابی تاثیر پارامترهای جوشکاری TIG بر تشکیل ترک در آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴

سیده راضیه انوری^{۱*}، محمدرضا نصرآصفهانی^۲، سعید احمدی^۳

چکیده

جوشکاری قوس تنگستن (TIG) تحت پوشش گاز محافظ از پرکاربردترین روش‌های جوشکاری در صنایع مختلف است. این روش مزایای فراوانی از جمله ایجاد جوش با کیفیت بالا، بدون پاشش جرقه و قابلیت استفاده در تمام حالت‌ها را دارد. علی‌رغم مزایای فراوان، در این فرایند نیز مانند دیگر فرایندهای جوشکاری ممکن است عیوب خطرناکی مانند ترک ایجاد شود. ایجاد ترک قابلیت جوشکاری و جوش‌پذیری مواد تحت تاثیر قرار می‌دهد. ترک‌ها با توجه به درجه حرارتی که در آن به وجود می‌آیند به دو گروه ترک‌های گرم و ترک‌های سرد تقسیم‌بندی می‌شوند. ترک گرم به دلیل ناپایداری فلز جوش تحت کرنش، در حین انجماد در یک محدوده دمایی بحرانی ایجاد می‌شود. در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 تحت تاثیر کرنش قرار گرفت، سپس تاثیر پارامترهای جوشکاری تیگ بر تشکیل ترک در آن ارزیابی شد. جهت اعمال کرنش روی نمونه‌های در حال جوشکاری از آزمون وارسترینت استفاده شد. برای این منظور چهار بلوک با شعاع‌های مختلف جهت اعمال کرنش‌های مختلف ساخته شد. جهت مشاهده ترک‌ها و بازرسی عیوب جوش از آزمایشات رادیوگرافی و مایعات نافذ استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان دادند که در نمونه‌ها تحت کرنش‌های کمتر از ۱ درصد با تغییر پارامترهای جوشکاری و افزایش گرمای ورودی ترک گرم ایجاد نشد. با اعمال کرنش ۳/۵ درصد، ترک گرم در نمونه‌ها با پارامترهای مختلف جوشکاری ایجاد شد. این نتیجه نشان داد که برای آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 کرنش نسبت به گرمای ورودی در ایجاد ترک گرم تاثیر بیشتری دارد. همچنین نتایج نشان داد که طول ترک‌های گرم با افزایش سرعت جوشکاری، کاهش یافت. در برخی از نمونه‌های جوشکاری شده ترک ستاره ای مشاهده شد که علت اصلی ایجاد آن قطع قوس پیش از پر شدن چاله جوش بود. این مساله باعث شد لبه‌های بیرونی نسبت به داخل چاله زودتر سرد شوند در نتیجه تنش کافی برای تشکیل ترک ستاره ای ایجاد شود.

واژه‌های کلیدی

آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، جوشکاری قوس تنگستن، ترک گرم، ترک ستاره ای، پارامترهای جوشکاری، کرنش.

۱-استادیار، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

*نویسنده مسئول: sr.anvari@daneshpajooahan.ac.ir

۲-استادیار، پژوهشکده مواد و انرژی پژوهشگاه فضایی ایران

۳-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مواد، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

۱- مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ معمولاً در صنایع هواپیماسازی استفاده می‌شود که دلیل آن نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خزش و خستگی و قابلیت ماشین‌کاری خوب و همچنین استحکام بالا در دمای پایین است (Liu) (et al. 2022, Gea et al. 2022). قابلیت ماشین‌کاری خوب ورق آلومینیوم ۲۰۲۴ امکان ساخت قطعه در ابعاد دقیق را فراهم می‌کند. همچنین ماشین‌کاری با سرعت بالا همراه با دقت بالای ابعادی قابل حصول است.

جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستنی و گاز خنثی (تیگ) بر روی آلومینیوم و آلیاژهای آن بسیار متداول است. قوس الکتریکی بین الکتروود غیرمصرفی تنگستن و سطح کار ایجاد می‌شود. نوک الکتروود، حوضچه مذاب و منطقه گرم اطراف آن توسط گاز خنثی (آرگون، هلیم یا مخلوط آنها) که از اطراف الکتروود خارج شده محافظت می‌شود. فلز جوش عموماً از فلز قطعه کار و در بعضی موارد آمیزه‌ای از فلز و مفتول پرکننده است (Mathers 2002).

از آنجا که در میان عیوب جوش، ترک خطرناک‌ترین عیب است و ایجاد ترک بر قابلیت جوشکاری و جوش‌پذیری مواد بسیار موثر است. به همین دلیل تحقیقات فراوانی در زمینه ارتباط پارامترهای فرایند جوشکاری و ایجاد ترک در آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است (Wang et al. 2020, Li et al. 2022).

ترک گرم به صورت موضوعی جدی در جوشکاری در تحقیقات مختلف مطرح شده است (Wang et al. 2022, Li et al. 2022). ترک گرم در طول انجماد، به صورت ترکیبی از رفتار متالورژیکی به هنگام سرمایش و شرایط ترمومکانیکی در طول جوشکاری مطرح می‌شود. ترک‌های گرم به دو دسته ترک‌های ذوبی و انجمادی تقسیم می‌شوند (Duley 1999).

پارامترهای جوشکاری می‌توانند اثر قابل توجهی بر امکان تشکیل ترک گرم در آلیاژهای آلومینیوم داشته باشند. بنابراین می‌بایست هنگام انجام آزمایشات جوش‌پذیری لحاظ شوند.

در این تحقیق جهت بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری بر امکان ایجاد ترک از آزمون وارسترنیت استفاده شده است. در طی این آزمون نمونه‌ها تحت اعمال کرنش مشخصی قرار می‌گیرند و سپس فرایند جوشکاری روی آنها انجام می‌شود. (Idowu et al. 2007). در این آزمون نمونه بر روی بلوکی قرار می‌گیرد که سطح بالایی آن دارای انحنا است و نمونه از دو طرف تحت بار قرار می‌گیرد، نیرو اعمال می‌شود و نمونه را خم می‌کند تا کاملاً بر بلوک خمیده شده و با شعاع انحنای مشخص منطبق گردد سپس نمونه مدت زمان محدودی در همان موقعیت خمیده نگهداری می‌شود. این امر باعث اعمال یک کرنش طولی بر روی سطح نمونه می‌شود که مقدار این کرنش توسط رابطه (۱) به دست می‌آید (Coniglio and Cross 2016).

$$\varepsilon = t/2r \quad (1)$$

که در آن ε کرنش اعمالی، t ضخامت نمونه استفاده شده و r شعاع بلوک فلزی است (Coniglio and Cross 2016). برای اعمال مقادیر مختلف کرنش می‌توان شعاع بلوک فلزی را تغییر داد و از بلوک‌های فلزی با شعاع‌های گوناگون استفاده نمود. از این‌رو می‌توان نمونه‌ها را تحت کرنش‌های مختلف و همچنین پارامترهای مختلف جوشکاری مورد ارزیابی قرار داد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ تحت کرنش‌های مختلف با استفاده از پارامترهای مختلف جوشکاری جوشکاری شد. ورق‌های نورد سرد شده آلومینیوم 2024-T3 به ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده

شدت های ۲۰۳، ۲۹۳ و ۳۳۵ آمپر و با سرعت‌های جوشکاری بین ۱۰ تا ۱۶ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. جهت مقایسه پارامترهای جوشکاری برای نمونه‌ها تحت کرنش اعمالی ۳/۵ درصد دو حالت بررسی شد. در حالت اول سرعت‌های جوشکاری تقریباً برابر و شدت جریان‌ها متغیر و در حالت دیگر، شدت جریان‌ها برابر و سرعت‌ها متفاوت در نظر گرفته شد. این شدت جریان ها ۱۵۰ و ۱۸۵ آمپر و سرعت جوشکاری بین ۲/۵ تا ۷ میلیمتر بر ثانیه بود.

جهت بررسی ترک های سطحی از آزمون مایع نافذ استفاده شد. این آزمون مطابق استاندارد *ASTM E165* (2018) با استفاده از مایع نافذ قابل مشاهده و رنگی و تحت نور مرئی بر روی نمونه‌ها انجام شد.

جهت بررسی تشکیل ترک‌ها، محاسبه مجموع طول ترک‌های و تعیین طول بزرگترین ترک، آزمون رادیوگرافی بر روی نمونه‌ها انجام شد.

این آزمون با تیوب اشعه X به فاصله ۶۰ سانتی‌متر نسبت به نمونه، شدت اشعه (KV) ۱۷۰ و مدت زمان تشعشع ۰/۲ دقیقه انجام شده است.

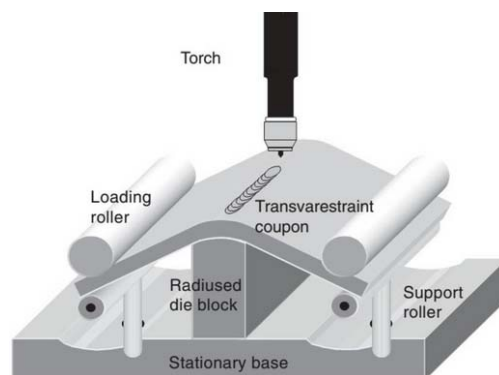
شدند. ترکیب شیمیایی ورق آزمایش با استفاده از آنالیز شیمیایی به روش طیف‌سنج نشری مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) ترکیب عناصر شیمیایی ورق آلومینیوم ۲۰۲۴ ارائه شده است.

در این تحقیق چهار کرنش ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۳/۵ درصد در نظر گرفته شد و براساس آن تعداد چهار بلوک با شعاع‌های مختلف ساخته شده است. شعاع بلوک‌های مورد استفاده در دستگاه آزمون وارسترینت جهت اعمال کرنش‌های مدنظر این تحقیق براساس رابطه $[\varepsilon = t/2r]$ محاسبه شد. در شکل (۱) شماتیکی از انجام این آزمون مشاهده می‌شود.

برای ساخت بلوک‌ها از دستگاه های تراش و فرز CNC استفاده شد. نحوه قرار گرفتن و بستن نمونه روی بلوک در شکل (۲) ارایه شده است. در این تحقیق از جریان‌های AC و DC جهت جوشکاری استفاده شد در هر مرحله با تعیین پارامترهای مورد نظر و تنظیم دستگاه، جوشکاری برای حالت‌های مختلف کرنش، انجام شد. برای نمونه‌ها تحت کرنش‌های اعمالی ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد، جریان DC برابر با ۱۸۵ آمپر و سرعت جوشکاری ۱۲ میلیمتر بر ثانیه و همچنین جریان AC با

جدول (۱). ترکیب شیمیایی ارائه شده ورق آلومینیوم ۲۰۲۴ توسط دستگاه طیف‌سنج نشری

حالت	عناصر (درصد وزنی)										آلیاژ
	Ti	Ni	Cr	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Al	
T3	۰/۰۳۸۷	۰/۰۲۸۹	۰/۰۳۵۶	۰/۱۶۴	۱/۲۵	۰/۴۷۵	۳/۶۷	۰/۰۸۲۷	۰/۱۰۱	۹۴	۲۰۲۴

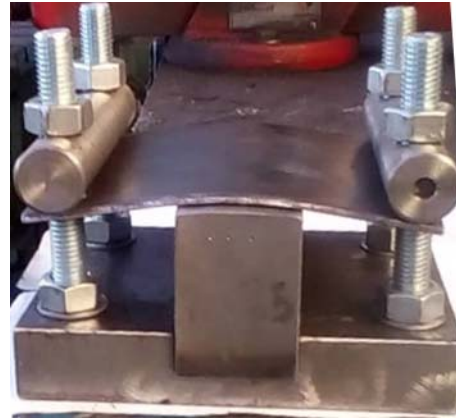


شکل (۱). شماتیک آزمون وارسترینت (Wang et al. 2016)

استفاده، مطابق جدول ۲ نام‌گذاری شدند. گرمای ورودی برای هر نمونه محاسبه و در جدول ۲ ارائه شد. لازم به ذکر است طبق اعلام شرکت سازنده، مقدار ولتاژ برابر با $[20 + (0.04 \times \text{جریان})]$ است.

۳-۱- بررسی ظاهری نمونه‌های جوشکاری

ظاهر نمونه های جوشکاری شده توسط بازدید چشمی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های ۳ و ۴ و نمونه‌های جوشکاری شده با کدهای ۰/۵-۱۶-۳۳۵ و ۰/۵-۶-۱۸۵-۳/۴ را نشان می دهند. بررسی های چشمی نشان داد در کرنش‌های اعمالی ۰/۲، ۰/۵ و ۱ با تغییر پارامترهای جوشکاری و همچنین افزایش گرمای ورودی هیچ گونه ترک ظاهری مشاهده نشد.



شکل (۲). نحوه قرار گرفتن نمونه روی بلوک

۳-نتایج و بحث

نمونه‌های جوشکاری شده بر اساس مقدار کرنش اعمالی، متوسط سرعت جوشکاری و شدت جریان مورد

جدول (۲). نام‌گذاری نمونه‌های جوشکاری شده

کد نمونه	گرمای ورودی (KJ/cm)	نوع جریان	شدت جریان (A)	متوسط سرعت جوشکاری (mm/s)	درصد کرنش اعمالی
۰/۲-۱۲-۱۸۵	۲/۹۶	DC	۱۸۵	۱۲	۰/۲
۰/۵-۱۲-۱۸۵	۲/۹۶	DC	۱۸۵	۱۲	۰/۵
۱-۱۲-۱۸۵	۲/۹۶	DC	۱۸۵	۱۲	۱
۰/۲-۱۰-۲۰۳	۳/۹۹	AC	۲۰۳	۱۰	۰/۲
۰/۵-۱۰-۲۰۳	۳/۹۹	AC	۲۰۳	۱۰	۰/۵
۱-۱۰-۲۰۳	۳/۹۹	AC	۲۰۳	۱۰	۱
۰/۲-۱۶-۳۳۵	۴/۸۹	AC	۳۳۵	۱۶	۰/۲
۰/۵-۱۶-۳۳۵	۴/۸۹	AC	۳۳۵	۱۶	۰/۵
۱-۱۶-۳۳۵	۴/۸۹	AC	۳۳۵	۱۶	۱
۰/۲-۱۳-۲۹۳	۵	AC	۲۹۳	۱۳	۰/۲
۰/۵-۱۳-۲۹۳	۵	AC	۲۹۳	۱۳	۰/۵
۱-۱۳-۲۹۳	۵	AC	۲۹۳	۱۳	۱
۳/۵-۶/۸-۱۸۵	۵/۲۳	AC	۱۸۵	۶/۸	۳/۵
۳/۵-۴/۵-۱۵۰	۶/۰۱	AC	۱۵۰	۴/۵	۳/۵
۳/۵-۴/۶-۱۸۵	۷/۷۱	AC	۱۸۵	۴/۶	۳/۵
۳/۵-۲/۶-۱۵۰	۱۰/۵۷	AC	۱۵۰	۲/۶	۳/۵

۳-۲- نتایج آزمون مایعات نافذ

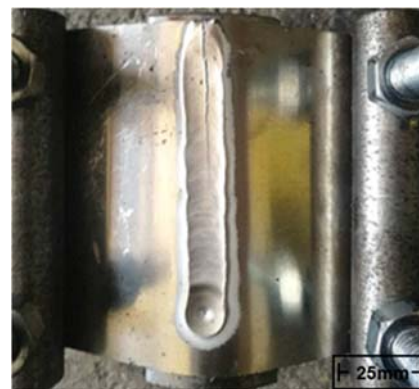
بررسی نتایج آزمون مایعات نافذ نشان می‌دهد در بعضی از نمونه‌ها ترک ستاره‌ای (*crater pipe*) وجود دارد. علت اصلی ایجاد این عیب، قطع قوس پیش از پر شدن چاله جوش است. این مساله باعث شد لبه‌های بیرونی نسبت به داخل چاله زودتر سرد شوند در نتیجه تنش کافی برای تشکیل ترک ستاره‌ای ایجاد شود. طبق جدول ۳ که در آن نتایج حاصل از آزمایش مایع نافذ جمع‌بندی شده است، نمی‌توان ارتباط مشخصی بین این عیب و هیچ یک از پارامترهای جوشکاری پیدا کرد. اگرچه ترک ستاره‌ای یک عیب ناشی از انقباض حوضچه جوش در پایان انجماد است ولی به نظر می‌رسد کرنش اعمال‌شده به این نمونه‌ها تاثیری بر وقوع این عیب نداشته است.

آلومینیوم ۲۰۲۴ یک آلیاژ حاوی عنصر مس است. طبق دیاگرام فازی حضور این عنصر باعث ایجاد منطقه خمیری وسیع در آلیاژ شده است. منطقه خمیری وسیع یکی از شرایط اولیه برای وقوع ترک در حین انجماد است. هرچه وسعت منطقه خمیری بیشتر باشد مقدار کرنش موثر آن در حین انجماد بیشتر است. از طرفی وجود عنصر مس باعث می‌شود انقباض ذاتی این آلیاژ نسبت به آلیاژهای دیگر بیشتر شود. وجود ترک ستاره‌ای در انتهای جوش خود تائیدی بر این موضوع است یعنی تمامی شرایط متالورژیکی برای وقوع ترک در این نمونه‌ها وجود داشته است ولی مقدار کرنش اعمال شده بر آن‌ها نتوانسته باعث پارگی دندریته‌ها در حوضچه جوش شود و از طرفی تنش‌های ذاتی خود قطعه، ناشی از گرم شدن ورق نیز نتوانسته باعث ایجاد ترک شود.

شکل ۵ نمونه‌ای از نتیجه آزمون مایع نافذ را نشان می‌دهد که مربوط است به نمونه با کد ۲۰۳-۱۰-۱. وقتی عیوب ناشی از جوشکاری به سطح جوش ختم



شکل (۳). نمونه جوشکاری شده با کد ۰/۵-۱۶-۳۳۵



شکل (۴). نمونه جوشکاری شده با کد ۳/۴-۵/۱۸۵-۶، طول ترک ۴۸/۸ میلی‌متر

با افزایش کرنش و اعمال کرنش ۳/۵ درصد، ترک‌هایی در سطح نمونه مشاهده شد. اندازه‌گیری‌های به‌عمل آمده در مورد طول ترک‌ها نشان می‌دهد، در یک کرنش ثابت (۳/۵ درصد) هرچه مقدار گرمای ورودی افزایش یابد، طول ترک نیز افزایش می‌یابد. بیشترین طول ترک مشاهده شده در نمونه ۱۵۰-۲/۶-۳/۵ و حدود ۷۴/۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. گرمای ورودی جوشکاری این نمونه برابر ۱۰/۵۷ کیلوژول بر سانتی متر است. طبق محاسبات انجام شده این نمونه بیشترین گرمای ورودی در بین نمونه‌ها با کرنش اعمالی ۳/۵ درصد را تحمل کرده است. جهت بررسی دقیق ترک‌های ایجاد شده از آزمون‌های مایع نافذ و رادیوگرافی استفاده شد که در ادامه نتایج آن‌ها ارائه شده است.

نشوند آزمون مایعات نافذ نمی تواند آن ها را مشخص
 بنا بر این جهت بررسی دقیق تر عیوب، از آزمون
 رادیوگرافی نیز استفاده شد که نتایج آن در ادامه ارائه
 شده است.

جدول (۳). نتایج آزمون مایعات نافذ

کد نمونه	نتیجه آزمون مایعات نافذ
۱-۱۲-۱۸۵	هیچ ترکی مشاهده نشد
۱-۱۰-۲۰۳	ترک ستاره ای مشاهده شد
۰/۲-۱۶-۳۳۵	ترک ستاره ای مشاهده شد
۱-۱۶-۳۳۵	هیچ ترکی مشاهده نشد
۱-۱۳-۲۹۳	ترک ستاره ای مشاهده شد

جدول (۴). نتیجه آزمایش مایع نافذ نمونه با کد ۱-۱۲-۱۸۵

Revision number : 0		Radiographic test report							Reference code/standard : --				
Thickness (mm)	No. of film	Film Size (cm)	Visible IQI	Repair	Reject	Accept	Segment /Weld No.	Type of defect(s) / location / Dimension					
3 to 3	1	10*12	Wire 13	---		*	---	Crater crack (1)cm , Linear porosity (8)cm					
Source Type	Source size (mm*mm)	Total film length(cm)	IQI Type	Film type	Screen Type	Exposure Technique	Ug (mm)	Sensitivity %	Density	SFD (cm)	Exposure Time (minute)	Source Strength(Kv)	
X-RAY	2*2	12	10-16 AL	Kodak MX125	Lead	SWSI	≤ 0.51	1-2	1.8-4	60	0.2	170	
Abbreviation				Type of Weld Defects			Technique			Other			
				LOP: Lack of Penetration			SWSI: Single Wall Single Image			SFD: Source To Film Distance			
				LOF: Lack of Fusion			DWSI: Double Wall Single Image			IQI: Image Quality Indicator			
				TI: Tungsten Inclusion			DWDI: Double Wall Double Image			No.: Number			
*REMARK: - Test result shall be considered by the customer.													

- یک مورد ترک ستاره ای مشاهده شد به طول ۲.۴ میلی متر

آزمون مایعات نافذ است و همان طور که بیان شد دلیل
 ترک های ستاره ای انقباض ذاتی آلیاژ است و ارتباطی به
 مقدار کرنش اعمالی به نمونه ها ندارد. نتایج رادیوگرافی
 در این نمونه ها تایید می کند که هیچ گونه ترکی در
 ناحیه ذوب جزئی (PMZ) جوش ها ایجاد نشده است.
 از آن جایی که معمولا ترک های ناحیه جوش مشهودتر
 هستند این احتمال وجود داشت که ترک هایی در ناحیه
 PMZ جوش و در عمق هر نمونه ایجاد شده است.
 نتایج رادیوگرافی نمونه هایی که تحت کرنش ۳/۵
 درصد جوشکاری شدند، نشان داد در تمامی این نمونه ها

- Partial melted zone

۳-۳- نتایج آزمون رادیوگرافی

به منظور بررسی دقیق تر ترک های ایجاد شده، از
 آزمون رادیوگرافی به عنوان یک آزمون تکمیلی بر روی
 تمام نمونه ها استفاده شد. نمونه ای از نتایج ارائه شده
 توسط آزمایشگاه در جدول ۵ برای نمونه با کد ۱۵۰-
 ۳/۲-۵/۶ ارائه شده است. نتایج حاصل برای تمام
 نمونه ها در جدول ۶ به صورت خلاصه ارائه شده است.
 بررسی این نتایج نشان می دهد در نمونه ها تحت کرنش
 اعمالی ۰/۲، ۰/۵ و ۱ ترک گرم ایجاد نشده است و فقط
 وجود ترک های ستاره ای در پایان خط جوش وجود
 داشته است. این نتایج دقیقا مشابه نتایج به دست آمده از

تحقیقی که بر روی آلیاژهای گروه ۶××× انجام شده بود، نشان داد در جوشکاری با حرارت ورودی کمتر از ۱۱ کیلوژول بر سانتی متر و کرنش تا ۳/۲ درصد، ترک گرم ایجاد نشده است. در صورتی که در کرنش‌های بالاتر ترک مشاهده شد.

با بررسی تحقیقات انجام شده، تصمیم بر این شد که از کرنش بالاتری به اندازه ۳/۵ درصد، جهت بررسی احتمال ایجاد ترک گرم بر روی نمونه‌ها استفاده شود. در حرارت ورودی بالاتر از ۱۱ کیلوژول بر سانتی متر و کرنش ۳/۵ درصد، نمونه تحت جوشکاری کاملاً ذوب شد به همین دلیل با استفاده از تغییر جریان، حرارت ورودی کاهش داده شد. دلیل ذوب شدن نمونه ضخامت پایین آن بود (۳ میلیمتر) در حالی که ضخامت نمونه عنوان شده در تحقیق مورد نظر ۶ میلی متر بود.

علاوه بر ترک‌های ستاره‌ای، ترک‌های طولی که نشان از ترک گرم است، وجود دارد و به نوعی کرنش ۳/۵ درصد، کرنش آستانه (*Threshold strain*) برای این نمونه‌ها بوده است. در نمونه‌ها یک روند افزایشی بین گرمای اعمالی به هر نمونه و مجموع طول ترک‌ها مشاهده شده است به گونه‌ای که در نمونه ۱۵۰-۲/۶-۳/۵ که بیشترین گرما را در بین نمونه‌های تحت کرنش ۳/۵ درصد دریافت کرده است، بیشترین طول ترک، برابر با ۷۴/۴ میلی‌متر به دست آمده است.

مطابق نتایج به دست آمده در نمونه‌هایی که بر آن‌ها کرنش ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد اعمال شد حتی با افزایش حرارت ورودی و تغییرات زیاد در پارامترهای جوشکاری، هیچ ترک گرمی ایجاد نشد. با بررسی و مطالعه پژوهش‌های پیشین بر عوامل ایجاد ترک گرم روی آلیاژهای مختلف مشخص شد که، در نمونه‌هایی با اعمال کرنش بالاتر، ترک گرم ایجاد شده است. نتایج

جدول (۵). نتیجه آزمایش رادیوگرافی نمونه با کد ۱۵۰-۲/۶-۳/۵

Revision number : 0		Radiographic test report							Reference code/standard : —			
Thickness (mm)	No. of film	Film Size (cm)	Visible IQI	Repair	Reject	Accept	Segment /Weld No.	Type of defect(s) / location / Dimension				
—	1	10*12	Wire 13	—		*	—	Crack**				
Source Type	Source size (mm*mm)	Total film length(cm)	IQI Type	Film type	Screen Type	Exposure Technique	Ug (mm)	Sensitivity %	Density	SFD (cm)	Exposure Time (minute)	Source Strength(Kv)
X-RAY	2*2	12	10-16 Al	Kodak MX 125	Lead	SWSI	≤ 0.51	1-2	1.8-4	60	0.2	170
Abbreviation	Type of Weld Defects				Technique			Other				
	LOP: Lack of Penetration				SWSI: Single Wall Single Image			SFD: Source To Film Distance				
	LOF: Lack of Fusion				DWSI: Double Wall Single Image			IQI: Image Quality Indicator				
	TI: Tungsten Inclusion				DWDI: Double Wall Double Image			No.: Number				
*REMARK: Test result shall be considered by the customer.												
** تعداد ترک های گرم: 2 عدد طول بزرگترین ترک گرم: 39.8 میلی متر مجموع طول ترک های گرم: 74.4 میلی متر تعداد ترک های ستاره ای: 3 عدد طول بزرگترین ترک ستاره ای: 3.4 میلی متر												

جدول (۶). نتایج آزمون رادیوگرافی

کد نمونه	نتیجه آزمون رادیوگرافی
۰/۲-۱۲-۱۸۵	ترکی مشاهده نشد
۰/۵-۱۲-۱۸۵	دو مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۱/۴ میلی‌متر مشاهده شد
۱-۱۲-۱۸۵	یک مورد ترک ستاره‌ای به طول کمتر از ۲/۴ میلی‌متر مشاهده شد
۰/۲-۱۰-۲۰۳	سه مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۱/۲ میلی‌متر مشاهده شد
۰/۵-۱۰-۲۰۳	ترکی مشاهده نشد
۱-۱۰-۲۰۳	سه مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۲/۴ میلی‌متر مشاهده شد
۰/۲-۱۶-۳۳۵	پنج مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۳/۷ میلی‌متر مشاهده شد
۰/۵-۱۶-۳۳۵	دو مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۳/۸ میلی‌متر مشاهده شد
۱-۱۶-۳۳۵	ترکی مشاهده نشد
۰/۲-۱۳-۲۹۳	پانزده مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۲/۴ میلی‌متر مشاهده شد
۰/۵-۱۳-۲۹۳	شش مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۳/۲ میلی‌متر مشاهده شد
۱-۱۳-۲۹۳	دو مورد ترک ستاره‌ای هر یک به طول کمتر از ۵/۱ میلی‌متر مشاهده شد
۳/۵-۶/۸-۱۸۵	یک مورد ترک گرم با طول ۷/۲۰ میلی‌متر مشاهده شد. یک مورد ترک ستاره‌ای به طول کمتر از ۲/۳ میلی‌متر مشاهده شد.
۳/۵-۴/۵-۱۵۰	یک مورد ترک گرم با طول ۲۰/۹ میلی‌متر مشاهده شد. ترک ستاره‌ای مشاهده نشد.
۳/۵-۴/۶-۱۸۵	یک مورد ترک گرم با طول ۴۸/۸ میلی‌متر مشاهده شد. چهار مورد ترک ستاره‌ای به طول کمتر از ۴/۳ میلی‌متر مشاهده شد.
۳/۵-۲/۶-۱۵۰	دو مورد ترک گرم مشاهده شد که طول بزرگترین ترک گرم ۳۹/۸ میلی‌متر است. مجموع طول ترک‌های گرم برابر ۷۴/۴ میلی‌متر است. سه مورد ترک ستاره‌ای به طول کمتر از ۳/۴ میلی‌متر مشاهده شد.

جوشکاری برابر است با کاهش جریان از ۱۸۵ آمپر به ۱۵۰ آمپر، طول ترک تا حدی کاهش می‌یابد.

شکل ۵ طول ترک‌ها را برای نمونه‌های جوشکاری مختلف تحت کرنش ۳/۵ درصد نشان می‌دهد. جهت بررسی دقیق‌تر ارتباط میان پارامترهای جوشکاری و طول ترک‌های گرم ایجاد شده منحنی مجموع طول ترک‌ها بر حسب حرارت ورودی رسم شد که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق شکل ۶ رابطه مجموع طول ترک‌ها با حرارت ورودی یک رابطه خطی است که با تطبیق دادن بهترین خط بر روی آن رابطه (۲) بدست می‌آید.

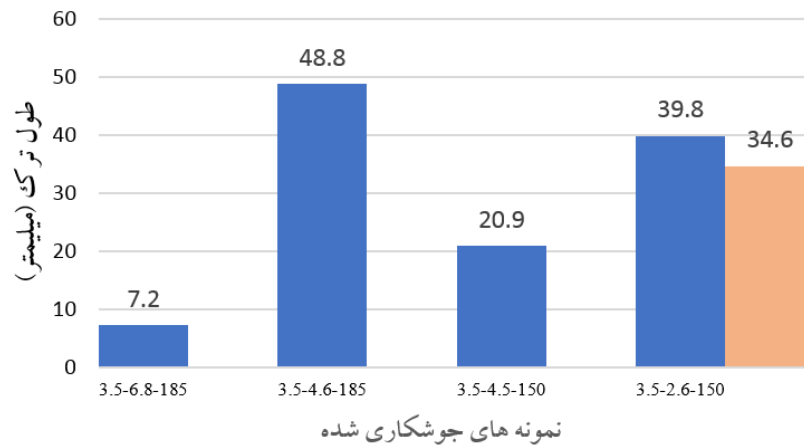
$$L = 12.472Q - 54.215 \quad (2)$$

نتایج نشان داد با اعمال کرنش ۳/۵ درصد، جریان‌های ۱۵۰ و ۱۸۰ آمپر و سرعت جوشکاری بین ۲/۵ تا ۷ میلی‌متر بر ثانیه در نمونه‌های جوشکاری شده، ترک گرم ایجاد شد. این نتایج نشان می‌دهد که میزان کرنش اعمالی جهت ایجاد ترک گرم، بسیار موثر است به گونه‌ای که در کرنش‌های اعمالی پایین، حتی تحت تغییرات زیاد پارامترهای جوشکاری، ترک گرمی در قطعه‌ها ایجاد نشد. نتایج جوشکاری با کرنش اعمالی ۳/۵ درصد نشان می‌دهد در حالت جوشکاری با جریان ۱۸۵ آمپر، با افزایش سرعت جوشکاری طول ترک کاهش می‌یابد. همچنین در حالت جوشکاری با جریان ۱۵۰ آمپر با افزایش سرعت جوشکاری، طول و تعداد ترک کاهش می‌یابد. در حالتی که سرعت‌های

میلی متر و کرنش اعمالی ۳/۵ درصد ترک گرم ایجاد نشود.

البته بررسی‌های انجام شده توسط دیگر محققین نشان داده است که نه تنها حرارت ورودی بر ایجاد ترک گرم در حین جوشکاری موثر است بلکه در یک حرارت ورودی یکسان، تغییر پارامترهای جوشکاری نیز تاثیرگذار هستند. بررسی‌هایی که *singh* و همکارانش در این زمینه بر روی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۴ انجام دادند، نشان داد که با تغییر جریان و سرعت جوشکاری در حالی که حرارت ورودی ثابت بماند محل تشکیل ترک تغییر کرده است (*Singh et al. 2018*).

در این رابطه L نشان‌دهنده مجموع طول ترک‌های گرم برای هر نمونه و Q حرارت ورودی بر حسب کیلوژول بر سانتی متر است. تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین نیز نتایج مشابهی نشان داده است، به این صورت که مجموع طول ترک‌ها در هر نمونه جوشکاری شده با حرارت ورودی رابطه خطی داشته است (*Kato and Kerr 1987*). از این رابطه می‌توان پیش‌بینی کرد که کمترین میزان حرارت ورودی برای ایجاد ترک گرم، حدود ۴/۳۴ کیلوژول بر سانتی متر است. به عبارتی انتظار می‌رود در حرارت‌های ورودی کمتر از ۴/۳۴ کیلوژول بر سانتی متر برای ورق‌های آلومینیوم آلیاژی 2024-T3 با ضخامت ۳



شکل (۵). نمودار طول ترک‌های گرم در نمونه‌های جوشکاری شده تحت کرنش ۳/۵٪



شکل (۶). نمودار مجموع طول ترک‌های گرم بر حسب حرارت ورودی

۳-۴- رابطه میان شکل ترک و شکل دانه‌های منطقه جوش

بررسی‌های انجام شده توسط محققین نشان می‌دهد نوسان مغناطیسی قوس در آلیاژهای آلومینیوم باعث کاهش ایجاد ترک گرم گردیده است (Tseng and Savage 1971, Kou and Le 1985).

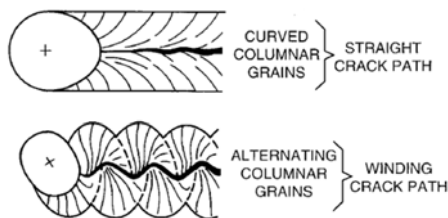
کو^۲ و لی^۳ نیز اثر نوسان مغناطیسی قوس بر ساختار دانه و ترک خوردن گرم جوش آلیاژهای

آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد نوسان عرضی قوس در فرکانس‌های پایین می‌تواند باعث ایجاد دانه‌های ستونی به صورت تناوبی گردد (Kou and Le 1985).

شکل ۷ نشان می‌دهد این نوع ساختار می‌تواند در کاهش ترک خوردن انجمادی موثر باشد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است دانه‌های ستونی که جهت گیری خود را در فواصل مشخصی تغییر می‌دهند، ترک را مجبور کرده تا جهت خود را به‌طور تناوبی تغییر دهد و در نتیجه این امر باعث دشوار شدن انتشار ترک می‌شود (Kou and Le 1985).

از آنجا که در این پژوهش ترک‌های گرم ایجاد شده به صورت طولی هستند، می‌توان بیان نمود که

دانه‌های منطقه جوش به شکل ستونی انحنادار بوده و فرکانس نوسان قوس منجر به ایجاد دانه‌های ستونی تناوبی نشده است.



شکل (۷). اثر نوسان قوس بر ترک خوردن انجمادی (Kou and Le 1985)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، استعداد آلومینیوم آلیاژی ۲۰۲۴ به تشکیل ترک گرم در حین فرآیند جوشکاری با الکتروود تنگستن (تیگ) مورد بررسی قرار گرفت تا تاثیر پارامترهای جوشکاری بر تشکیل ترک گرم ارزیابی شود. نتایج به‌دست آمده عبارتند از:

۱- در نمونه‌های جوشکاری شده تحت کرنش‌های ۰/۲، ۰/۵ و ۱ با افزایش مقدار گرمای ورودی به نمونه‌ها، پس از ارزیابی چشمی، آزمون مایعات نافذ و رادیوگرافی هیچ ترکی مشاهده نشد. پس می‌توان نتیجه گرفت افزایش گرمای ورودی به‌تنهایی در صورتی می‌تواند منجر به ترک شود که کرنش آستانه به نمونه اعمال شود.

۲- کرنش ۳/۵٪ بیشتر از مقدار کرنش آستانه بود. در تمام سرعت‌های جوشکاری بین ۲/۵ تا ۷ میلی‌متر بر ثانیه ترک گرم ایجاد شده است. نتیجه این که نقش کرنش پرننگ‌تر از نقش گرمای ورودی است.

۳- پس از رسیدن به کرنش آستانه هرچه گرمای ورودی افزایش یافت، جوش‌پذیری نمونه کمتر شده است و به نوعی مجموع طول ترک افزایش یافته است به گونه‌ای که از ۷/۲ میلی‌متر در نمونه ۱۸۵-۶/۸-۳/۵ به ۷۴/۴ میلی‌متر در نمونه ۱۵۰-۲/۶-۳/۵ رسیده است.

۴- تقریباً در تمامی نمونه‌ها عیب ترک ستاره‌ای در انتهای مسیر جوشکاری دیده شد و توسط آزمون‌های مایع نافذ و رادیوگرافی تایید شد. این موضوع دلیلی بر انقباض نسبتاً زیاد ذاتی در این آلیاژ است که منجر به افزایش استعداد به ترک شده است. اما کنترل پارامترها در این تحقیق توانسته است مانع از ترک گرم در نمونه‌ها شود.

*Kou

*Le

مراجع

- Liu A. Z. W., Z. Xu, X. Liang, and S. Wang 2022. An evaluation on high cycle fatigue fracture characteristics of 2024-T351 Al alloy with different surface defects, *Mechanics of Materials* 164: 104-133.
- Mathers G., 2002. *The welding of aluminium and its alloys*, Woodhead publishing.
- Singh S., K. Hurtig, and J. Andersson 2018. Investigation on effect of welding parameters on solidification cracking of austenitic stainless steel 314. *Procedia Manufacturing*. 25: 351-357.
- Tseng C., and W. F. Savage 1971. Effect of arc oscillation, *Journal of welding* 50: 777-786.
- Wang Z., J. Shen, Sh. Hu, T. Wang, and X. Bu 2020. Investigation of welding crack in laser welding-brazing welded TC4/6061 and TC4/2024 dissimilar butt joints, *Journal of Manufacturing Processes* 60: 54-60.
- Wang Y., X. Zhang, D. Wang, J. Chen, Ch. Yu, J. Chen, J. Xu, P. Zhu, and H. Lu 2022. A comprehensive analysis of ultrasonic pulse current reducing hot cracking in Inconel 718 welds, *Materials Characterization* 187:111840.
- Wang D., K. Kadoi, K. Shinozaki, and M. Yamamoto 2016. Evaluation for Solidification Cracking Susceptibility of Type 310S Stainless Steel using Laser Trans-Varestraint Test and Prediction of Solidification Microstructure using Multi-Phase Field Modeling 56, 11: 2022-2028.
- Coniglio N., and C. E. Cross 2016. Towards Establishment of Weldability Testing Standards for Solidification Cracking. In *Cracking Phenomena in Welds IV*: 37-66.
- Duley W., 1999. *Laser Welding*, John Wiley & Sons.
- Gea J., T. Feista, A. Elmorea, R. Rejia, B. M. Laughlina, Y. Yan Jina, and D. Sun 2022. Open hole surface integrity and its impact on fatigue performance of Al 2024-T3/Ti-6Al-4V stacks, 6th CIRP Conference on Surface Integrity, *Procedia CIRP* 108: 234–239.
- Idowu O. A., O. A. Ojo, and M.C. Chaturvedi 2007. Effect of heat input on heat affected zone cracking in laser welded ATI Allvac 718Plus superalloy. *Materials Science and Engineering: A* 454: 389-397.
- Katoh M., and W. H. Kerr 1987. Investigation of heat-affected zone cracking of gta weld of Al-Mg-Si alloys using the varestraint test. *welding research supplement*: 360-368.
- Kou S., and Y. Le 1985. Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy, *Metallurgical Transaction A*, 1887: 1345–1352
- Li H., W. Yan, Zh. Li, B.Mariusz , J. Senkara, and Zh. Yu 2022. Numerical and experimental study of the hot cracking phenomena in 6061/7075 dissimilar aluminum alloy resistance spot welding *Journal of Manufacturing Processes* 77: 794-808.

Received:25/12/2021

Accepted:11/4/2022

Design and Study the Possibility of Constructing A Crawling Mechanism for Mobile Robot inside the Pipe with Pneumatic Actuator

Maryam Alizadeh¹, Mohammad Gohari^{2,*}, Majid Rajaei³

Abstract

Pipes are widely used in industry. Therefore, they are made in different dimensions and materials. Over time, these pipes are subject to sedimentation, corrosion, leakage, fracture, and so on. These factors reduce efficiency and impose significant costs. Therefore, inspection is necessary. In this research, the possibility of constructing a robotic crawling motion mechanism inside a pipe with a pneumatic actuator is designed experimentally and theoretically. First, the robot system is designed and motion equations are extracted. Then, according to the initial simulation in Solidworks software, robot body is made. In this study, the movement mechanism of the robot inside the pipe is designed in the form of crawling and pneumatics so that the robot can move inside the pipe and easily pass through the elbows. Adaptability to the physical condition of the pipe leads to an increase in its usability, such as entering toxic and sometimes narrow and tortuous pipes. The equation governing the motion of the robot is extracted. The robot is evaluated in the laboratory in transparent horizontal, sloping and elongated pipes. The results are obtained from changes in pressure on the stroke and speed robot. In order to validate the results, theoretical and experimental results were compared and a good agreement was observed. The results show that increasing the pressure increases the stroke and speed robot (displacement). In addition, the proposed robot has the ability to move in vertical and sloping pipes and can easily pass through the elbows. The elongation module also has the ability to bend when passing bends and elbows.

Keywords

Pipe Inspection Robot, Crawling Motion, Robot with Pneumatic Actuator, Pneumatic Motion

1- M.Sc. of Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak.

2-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak.

*Corresponding Author: Moh-gohari@arakut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak.

Received:11/1/2022

Accepted:16/4/2022

Effect of Ni Doping Element to Lead Free Solders on Intermetallic Compound with Immersion Silver Finish

Safoura Oshaghi¹, Sayed Mohammad Reza Loghmanian²

Abstract

Basically, the reliability of solder bonds depends on the thickness and morphology of the intermetallic layers formed between solder joints. These intermetallic compounds are formed during the soldering process and then grow by aging process, which is why the study of the morphology of intermetallic compounds is of great importance. Doping of lead-free solders is achieved by adding a small amount of elements such as Ni, Bi, Zn, which plays a significant role in the growth of intermetallic compounds. This solder bond is soldered during the soldering process between the SAC lead free lead and the base surface. This study evaluates the effect of adding a small amount of nickel (0.05% Ni, 0.1% Ni) on the formation of the middle phase during solder soldering SAC305. The alloy solder in this study is SAC305, SAC (0.05Ni), and SAC (0.1Ni), which is used at a temperature of 250 ° C during the soldering process. The aging process lasted for 150 hours for 2000 hours. The results show that, after the soldering, only the products of this reaction are Cu_6Sn_5 / (Cu, Ni) $_6Sn_5$ intermetallic. The most important effect of Ni doping on the growth rate and thickness of Cu_3Sn was observed. The effect of adding 0.05Ni to the SAC305 was 0.1% less than 0.1% nickel, which was less effective, but the growth of the Cu_3Sn phase continued. Also, with increasing aging time during this process, the thickness of the intermetallic compounds increased as well as the microstructures has been observed smaller and has been become finer intermetallic compounds.

Keywords

Lead-free solder, immersion silver, intermetallic compound, soldering, surface finish

¹Lecturer, Daneshpajoohan Higher Education Institute, Esfahan, Iran.

* Corresponding Author: Soshaghi@yahoo.com

² Assistant Professor, Islamic Azad University (Khorasgan) Branch, Esfahan, Iran.

Received:29/1/2022

Accepted:30/4/2022

Investigating the Effect of Casimir Force on Microbeam Behavior Using Optimized Homotopy Method

Ali Tajmiri^{1*}, Mohammadreza Moghoomi²

Abstract

Microbeams and nanobeams are among the issues that are discussed and investigated in engineering design topics. Micro and nanobeams with different boundary conditions, such as one-headed and double-headed beams, have a special place in engineering analysis. Two boundary condition states (the first state of a single-ended beam and the second state of a double-ended beam) are investigated to study the behavior of the nanobeam under the effect of the Casimir force. In these investigations, microbeams under electric loads are analyzed statically and dynamically, and different methods of nonlinear models and theoretical methods are used on beam deflection.

In this article, while introducing the Casimir force and the research related to the measurement of the effect of this force, the solution of the differential equations related to the nanobeam under the effect of Casimir absorption by the homotopy method has been discussed. The obtained results show that in the Adomian solution method, the difference in the results is about 10%. On the other hand, the difference between the critical values of α in the homotopy method is also 10%, which is an acceptable number.

Keywords

Differential Equations, Homotopy, Nanobeam, Casimir Force, Microbeam

¹ PhD student, Faculty of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, South Branch of Tehran, Iran.

*Corresponding Author :alitajmiri@gmail.com

² Faculty Member of Daneshpajooan Higher Education Institute, Esfahan, Iran.

Received:7/2/2022
Accepted:17/5/2022

Investigating the Role of Motor Acceleration and Gravity in the Theory of Motion Equations of Satellite Multi-Stage Missiles

Mohammadreza Moghoomi^{*}, Abtin Shomeili[‡], Mahmood Mohammadkhani[‡], Nesa Zamani Bakhtiarvand[‡]

Abstract

Accurate mathematical computations and their simulation by using applied software with satisfied precision are required in order to design, calculate and construct space missiles. Satellite missiles are divided into several parameters including fuel, solid, liquid, chemical, and hybrid rockets, based on fuel type. Moreover, they can be designed in one, two or three stage construction, respectively. In this paper, the role of motion acceleration and gravity of the Earth in satellite rocket application equations has been investigated due to the mathematical relations governing particle dynamics. Consequently, these equations include: the size of the movement, the forces applied to the missiles, the speed equations from the start to the separation from the gravitational field, the special impact and the acceleration of the spacecraft. Furthermore, in the present study, in addition to examine the ruling relations, critical points of designing and computing missiles are noted.

Keywords

Space Missiles, Fuel Type, Special Impact, Motion Acceleration

1- Faculty member of Daneshpajooohan Higher Education Institute, Esfahan, Iran.

*Corresponding Author: moghoomi@yahoo.com

2- M.Sc. Student, Sooreh University, Art Department, Tehran, Iran.

3- B.Sc. of Daneshpajooohan Higher Education Institute, Mechanical Engineering Department, Esfahan, Iran.

4- M.Sc. Student, Isfahan University of Technology, Metallurgy Department, Esfahan, Iran.

Received:21/2/2022

Accepted:30/5/2022

Dynamic Modelling of Climbing Robot for Sandblasting

Mohammad Gohari ^{1,*}, Mohadese Ramazi², Nima Hamta³

Abstract

Current paper aims to design and analysis of climbing robot to cleaning surfaces via sandblast operation. This robot utilizes of magnetic wheels to move on the metal walls. The process of design and modelling by Solidworks Software is stated, and steps of fabrication of prototype, mechanical structure, sandblast nozzle are discussed. The static and dynamic analyses are conducted, and performance of robot via experimental study is investigated by various surface tilt angles and different nozzle pressures.

Keywords

Dynamic modeling, climbing robot, Wall-climbing robot, Sandblasting robot, Wheeled robot, Permanent magnetic adhesion mechanism

¹ - Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak

*Corresponding Author: Moh-gohari@arakut.ac.ir

² - M.Sc. of Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak

³ - Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak

Received:5/3/2022
Accepted:15/6/2022

Investigation of the Effect of TIG Welding Parameters on Formation of Hot Crack in Aluminum 2024 Alloy

Sayede Razieh Anvari^{1,*}, Mohamad Reza Nasr Esfahani², Saeid Ahmadi³

Abstract

Tungsten arc welding (TIG), is the most widely used welding method in various various industries. This method has many advantages such as high quality, no spark and can be used in all industries. Despite the many advantages, this process, like other welding processes, can cause dangerous defects such as cracks. Cracking affects the welding and weldability of the material. Cracks can be divided into hot and cold cracks. Hot cracking occurs due to the instability of the weld metal under strain during solidification in a critical temperature range. In this research, 2024-T3 aluminum alloy was affected by strain, then the effect of TIG welding parameters on crack formation was evaluated. Vareststraint test was used to apply strain to the welded specimens. For this purpose, four blocks with different radius were made to apply different strains. Radiographic and liquid penetration tests were used to observe cracks and inspect weld defects. The experimental results showed that in samples under strains less than 1%, by changing the welding parameters and increasing the input heat, no hot cracks were created. By applying a strain of 3.5%, hot cracks were created in the samples with different welding parameters. This result showed that for 2024-T3 aluminum alloy, strain has a greater effect than input heat on formation of hot cracking. The results also showed that the length of hot cracks decreased with increasing welding speed. In some of the welded specimens, a crater crack was observed, the main cause was the cutting of the arc before the welding hole was filled. This caused the outer edges to cool faster than the inside of the hole, resulting in enough stress to form crater cracks.

Keywords

2024 Aluminum Alloy, Tungsten Arc Welding, Hot Cracking, Crater Cracking, Welding Parameters, Strain

1- Assistant Professor, Daneshpajoohan Higher Education Institute, Esfahan

2- Assistant Professor, Materials and Energy Research Institute of Iran Space Research Institute, Esfahan

3- M.Sc. of Daneshpajoohan Higher Education Institute, Material Engineering Department, Esfahan

*Corresponding Author: sr.anvari@daneshpajoohan.ac.ir

TABLE OF CONTENT

Design and Study the Possibility of Constructing A Crawling Mechanism for Mobile Robot inside the Pipe with Pneumatic Actuator	1
Maryam Alizadeh, Mohammad Gohari, Majid Rajaei	
Effect of Ni Doping Element to Lead Free Solders on Intermetallic Compound with Immersion Silver Finish	13
Safoura Oshaghi, Sayed Mohammad Reza Loghmanian	
Investigating the Effect of Casimir Force on Microbeam Behavior Using Optimized Homotopy Method	21
Ali Tajmiri, Mohammadreza Moghoomi	
Investigating the Role of Motor Acceleration and Gravity in the Theory of Motion Equations of Satellite Multi-Stage Missiles	33
Mohammadreza Moghoomi, Abtin Shomeili, Mahmood Mohammadkhani, Nesa Zamani Bakhtiarvand	
Dynamic Modelling of Climbing Robot for Sandblasting	41
Mohammad Gohari, Mohadese Ramazi, Nima Hamta	
Investigation of the Effect of TIG Welding Parameters on Formation of Hot Crack in Aluminum 2024 Alloy	55
Sayede Raziheh Anvari, Mohamad Reza Nasr Esfahani, Saeid Ahmadi	

ENGLISH ABSTRACTS



Journal of Sustainable Industry

Vol. 1, No. 1, Summer 2022

License Holder: Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute

Director-in-Charge: Dr. Sayede Razieh Anvari

Editor-in-Chief: Dr. Sayed Mahmood Monir Vaghefi

Editorial Board (in alphabetic order)

Dr. Majid Elyasi, Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology

Dr. Sayede Razieh Anvari, Assistant Professor, Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute

Dr. Ali Zeinal Hamedani, Professor, Isfahan University of Technology

Dr. Fathalah Karimzade, Professor, Isfahan University of Technology

Dr. Mohamad Ali Golozar, Professor, Isfahan University of Technology

Dr. Shahram Lenjan Nejadian, Assistant Professor Isfahan University

Dr. Behrooz Movahedi, Associate Professor, Isfahan University

Reviewers (in alphabetical order)

Dr. Farshid Aghadavoodi

Dr. Mostafa Aboyi

Dr. Majid Elyasi

Dr. Sayede Razieh Anvari

Dr. Sayede Zahra Anvari

Dr. Mohamad Taghi Rezvan

Dr. Mahdi Safari

Dr. Mohsen Abbasi

Eng. Safora Oshaghi

Dr. Mohamad Reza Loghmanian

Eng. Mohamad Reza Moghomi

Dr. Mohamad Monsan

Executive Director: Eng. Maryam Taefnia

Layout: Fateme Mohamadi

Publishing Coordinator: Mohamad Reza Moghomi

Persian Editor: Dr. Sayede Razieh Anvari, Eng. Mohamad Reza Moghomi

English Editor: Dr. Sayede Razieh Anvari

Address: Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute, Mofateh Intersection,
Keshavarz Boulevard, Esfahan, Iran.

Tel: (+98) 31 37779914-EXT:307

Fax: (+98) 31 37753248

Website: daneshpajooan.ac.ir

Email: suinjournal@daneshpajooan.ac.ir

Instruction to Contributions

- The quarterly Journal of Sustainable Industry publishes scientific papers in research area of engineering and technology.
- Submitted articles should have neither been previously published nor be under consideration elsewhere.
- Articles should be written in Persian and in compliance with the principles and punctuation of the language.
- The editorial board reserve the right to accept or reject any article after reviewed by reviewers.
- The responsibility of the statements expressed in the article remains with the author(s).
- The journal has the right in publishing, accepting, rejecting or editing the content of articles. Received articles will not be returned.
- Papers must be the original results of author(s) research (Research Paper).
- Papers should contain title, authors information, abstract, keywords, introduction, material and methods, results and discussion, conclusions and references. The acknowledgment section is optional.
- The first page should include the name of the author(s), affiliation, address, telephone and e-mail of authors. This page also should include title, abstract and keywords in Persian.
- The title should be short, clear and relevant to the text.
- Four to six keywords related to the text and the title of the article should be written immediately after the abstract.
- Papers should have Persian and English abstract. The abstract should include problem statement, purpose, research methods, research subjects, important findings and results. This section should alone represent the whole article and especially the results. The Persian and English abstracts should be less than 300 words.
- To type the text body of a paper and subtitles, the Bzar font in size of 12 should be used.
- In the absence of comprehensive Persian equivalent for foreign words, it should be written in Persian and the original English word brought as endnote in the Times New Roman font, size 10.
- Number of pages of each paper should be about 15 (with inserting page number), with 1 cm line spacing, and the margin of pages should be of the top 3 cm, bottom 2 cm and 2.5 cm for each side.
- Papers have to be prepared in a two-column format.
- Conclusion of writing must be logical and useful for highlighting discussions and presenting findings.
- In the acknowledgment section, the author may thank to guidance and contribution of others. Footnotes (terms, equivalent words, description and etc.) should be numbered sequentially in the text and brought at the end of the same page. The number of the footnotes on each page should start from 1.
- If the paper has more than one author, the authors must define a person as representative as corresponding author to the journal office.

Attention:

- The file of Instructions to Contributors is available at daneshpajooan.ac.ir; furthermore, authors can communicate via the suinjournal@daneshpajooan.ac.ir, for more information

IN THE NAME OF GOD



- **Design and Study the Possibility of Constructing a Crawling Mechanism for Mobile Robot inside the Pipe with Pneumatic Actuator**
Maryam Alizadeh, Mohammad Gohari, Majid Rajae
- **Effect of Ni Doping Element to Lead Free Solders on Intermetallic Compound with Immersion Silver Finish**
Safoura Oshaghi, Sayed Mohammad Reza Loghmanian
- **Investigating the Effect of Casimir Force on Microbeam Behavior Using Optimized Homotopy Method**
Ali Tajmiri, Mohammadreza Moghoomi
- **Investigating the Role of Motor Acceleration and Gravity in the Theory of Motion Equations of Satellite Multi-Stage Missiles**
Mohammadreza Moghoomi, Abtin Shomeili, Mahmood Mohammadkhani, Nesa Zamani Bakhtiarvand
- **Dynamic Modelling of Climbing Robot for Sandblasting**
Mohammad Gohari, Mohadese Ramazi, Nima Hamta
- **Investigation of the Effect of TIG Welding Parameters on Formation of Hot Crack in Aluminum 2024 Alloy**
Sayede Razieh Anvari, Mohamad Reza Nasr Esfahani, Saeid Ahmadi