



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران



مومنتم

نشریه علمی تخصصی انجمن‌های علمی دانشجویان مهندسی مکانیک ایران

M
O
M
E
N
T
U
M
5

هوشمندسازی ساختمان

کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز

کنترل فازی ربات موازی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



شناسنامه:

صاحب امتیاز: اتحادیه انجمن‌های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک کشور

شماره مجوز: ۸/۸۱/۱۹۸۷۰۵

استاد مشاور: جناب آقای دکتر سیدفرامرز رنجبر

مدیر مسئول: مهندس زهرا قبادپور Ghobadpour.zahra@gmail.com

سر دبیر: مهندس حسین رشیدی قلعه Hosseinrashidighaleh@gmail.com

مدیر داخلی: مهندس آرش نوربخش سعداباد A_nourbakhsh@tabrizu.ac.ir

ویراستار و ناظر کیفی: مهندس سیدامیررضا عبداللہی S.a.abdollahi@yahoo.com

طراح و صفحه آرا: مهندس سینا جداری خوشباف، مهندس سینا شفاعت پناهی

هیئت تحریریه:

دکتر سید فرامرز رنجبر، دکتر حسن اسدی گیلاکجانی، دکتر شهاب صحرایی،
دکتر حامی تورجی زاده، دکتر محمدتقی شروانی تبار، زهرا قبادپور، آرش
نوربخش سعداباد، امیر حسابی، سید امیررضا عبداللہی، محمد حسین
خاوری دانشور، محمد حسین زاده پوستی، محمد خورسندی، اویس غلامی،
امیررضا ترابی پوده، مهدی نامی خلیله ده، سعید میرزایی، محمد امین
رحیمی جعفری، بهزاد مهدوی.

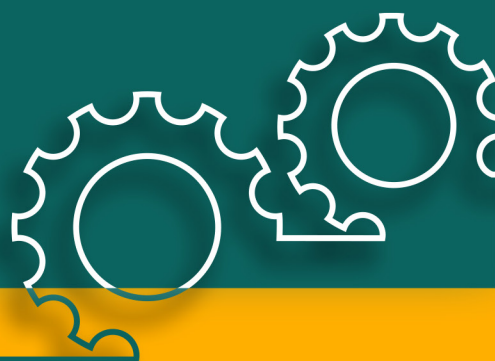
راه‌های ارتباطی:

۱- ایمیل نشریه و اتحادیه انجمن‌های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران
sumeif6.official@gmail.com

۲- دبیرخانه نشریه: دانشگاه تبریز، مرکز رشد و فناوری دانشگاه، ساختمان
رشد فناوری، طبقه ۲، واحد اس ۵

فهرست |

کنترل فازی ربات موازی PRS۳ به منظور تعقیب مسیر در حضور اغتشاش اولیه	۲۱	سخن مدیر مسئول	۵
نگاهی به کامپوزیت ها	۲۵	سخن سردبیر	۶
تازه های فناوری	۲۸	اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک در دور ششم	۷
مروری بر کتاب پالایشگاه زیستی	۲۹	کارهای عملی در مهندسی مکانیک	۹
توربین های بادی بدون پره	۳۱	استفاده از انرژی خورشیدی به منظور تولید سوخت هیدروژنی	۱۱
هوشمند سازی ساختمان	۳۲	بررسی تأثیر هندسه و استفاده از مواد تابعی هدفمند	۱۴
مروری بر کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز	۳۴	پیشرفت خارق العاده ایران در صنعت دفاعی	۱۸



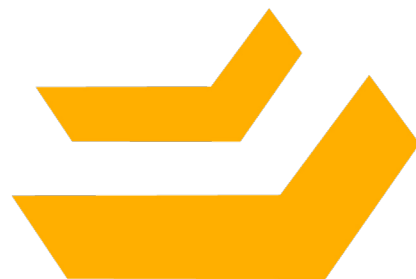
سخن مدیر مسئول

هوالخلاق العليم

مالي كه ز تو كس نستاند، علم است
جز علم طلب مكن تو اندر عالم
حرزى كه تو را به حق رساند، علم است
چيزى كه تو را ز غم رهاند، علم است

سلام و درود خدمت همراهان گرانقدر نشریه مومنتوم؛
به همت دانشجویان عزیز از سراسر کشور و کوشش خستگی ناپذیر هیئت تحریریه، فرصتی دیگر یافتیم تا شماره پنجم از نشریه مومنتوم را نیز در همین دوره از اتحادیه تقدیم نگاه پر مهرتان کنیم.
در طول این مدت تلاش همگی ما بر فعال کردن روحیه پرنشاط دانشجویی بوده که تا حد خوبی به این مهم دست یافتیم اما همچنان از تمامی دانشجویان عزیز مهندسی مکانیک و سایر رشته-گرایش ها مرتبط از سراسر ایران عزیزمان خواهشمندیم تا با ارسال آثار و مقالات خود به منظور داشتن مسیری ممتد و مداوم برای این نشریه همراهان باشند.
امید است که مطالب این شماره نیز مورد توجهتان قرار بگیرد و مثمر ثمر واقع شود. همچون شماره پیشین هیئت تحریریه مومنتوم مشتاقانه در انتظار دریافت نظرها و پیشنهاد های ارزنده شما مخاطبان گرانقدر خواهد بود.

مهندس زهرا قبادپور
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان



**قال امیرالمومنین (علیه السلام):
الْعِلْمُ سُلْطَانٌ؛ مَنْ وَجَدَهُ صَالِحًا بِهِ، وَمَنْ لَمْ يَجِدْهُ صَیْلًا عَلَيْهِ.
دانش، نابودکننده نادانی است.**

دانش سلطنت، قدرت و اقتدار است؛ هرکه آن (قدرت) را بیابد با آن یورش برد (غلبه پیدا کند تحکم یابد) و هرکه آن را نیافت بر او غلبه پیدا خواهد شد.

با عرض سلام و ادب و احترام خدمت همه همراهان اتحادیه انجمن های علمی مهندسی مکانیک ایران و نشریه علمی تخصصی مومنتوم.

بنده حسین رشیدی قلعه دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی قم، بازرس اتحادیه و سردبیر نشریه مومنتوم هستم و به یاری خداوند دومین شماره از سری جدید نشریه را با شما پژوهشگران و علاقمندان به اشتراک می گذارم. علم نیاز بشر است و دانستن، برنامه اوست.

در دوره و زمان پیش رو اهمیت علم و دانش برکسی پوشیده نیست و این در نایاب و گوهر گرانقدر همواره در حال توسعه و پیشرفت هست و خواهد بود؛ در این شماره ما با موضوعاتی چون پیشرفت های خارق العاده ایران در صنعت دفاعی، تازه های فناوری، ساختمان هوشمند و توربین های بادی بدون پره! و در کنار این موارد مقالات و پژوهش هایی در زمینه های کامپوزیت ها، پدیده کاویتاسیون و بررسی تاثیر هندسه و استفاده از مواد تابعی هدفمند بر توزیع تنش در ایمپلنت های دندان کنترل فازی ربات موازی PRS۳ و همچنین خلاصه یک کتاب با نام پالایشگاه زیستی با شما همراه خواهیم بود. در نهایت ضمن تشکر از شما همراهان و به صورت ویژه از هیئت تحریریه، توجه شما را به متن انتهایی که چکیده ای از بیانات رهبر معظم انقلاب در مورد دانش و مرتبط با موضوع حدیث این شماره است جلب می کنم و برای همه عزیزان از خداوند متعال سلامتی و شادکامی را آرزو مندم.

بدون شک علم پایه تمدن است. ۲۲ اردیبهشت ۸۲

ما باید علم را با همه معنای کامل آن به عنوان یک جهاد دنبال کنیم. ۱۴ فروردین ۸۵

علم، پایه پیشرفت همه جانبه یک کشور است. ۱۴ بهمن ۹۰

علم برای یک ملت مهم ترین ابزار آبرو و پیشرفت و اقتدار است. ۲۰ آبان ۹۴

هدف پژوهش دو چیز است: یکی رسیدن به مرجعیت علمی و حضور در جمع سرآمدان علم و فناوری، دوم حل مسائل کنونی و آینده کشور ۲۰ خرداد ۹۷
و قص علی هذا...

حسین رشیدی قلعه

دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی دانشگاه صنعتی قم



زهرا قبادپور

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان

اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک در دور ششم

اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران که به اختصار آن را اتحادیه مکانیک می نامیم، از اتحادیه های پر افتخار در وزارت علوم تحقیقات و فناوری است که در حال حاضر دوره ششم خود را می گذراند. شورای مرکزی این دوره از اتحادیه طی مجمع عمومی اسفند سال ۱۴۰۱ انتخاب شدند و از آغاز، سعی ایشان بر استفاده از تجربیات اساتید و فعالان دانشجویی سراسر کشور از جمله دبیر دور پنجم اتحادیه بوده است. از همین رو پس از تقسیم وظایف شورای مرکزی و تعیین دبیرخانه مرکزی اتحادیه در محل مرکز رشد و نوآوری دانشگاه تبریز، علاوه بر تشکیل جلسات شورای مرکزی، جلساتی با جناب آقای قربانی (دبیر دور پنجم اتحادیه مکانیک) نیز داشته اند تا موارد باقیمانده دوره پیشین را با اهتمام مجدد پیگیری و تکمیل نمایند.

با توجه به کم رنگ شدن نسبی فعالیت های دانشجویی در دوران کرونا و تغییر دبیران انجمن ها و در نتیجه در دسترس نبودن اطلاعات انجمن های سراسر کشور، به منظور ایجاد بستر مناسب برای ارتباط و همکاری گسترده و مستمر، میان انجمن های علمی دانشجویی به پیگیری در جهت جمع آوری دبیران و طراحی مجدد پرسشنامه اطلاعات دبیران و فعالان مهندسی مکانیک ایران پرداختند. از دیگر فعالیت های انجام شده در این دوره، می توان به احیای مجوز نشریه و اهتمام به دریافت آثار دانشجویان میهن عزیزمان ایران و انتشار همین نشریه اشاره نمود.

نمایندگان این اتحادیه، بهار ۱۴۰۲ در پانزدهمین جشنواره بین المللی حرکت که در دانشگاه مازندران برگزار شد؛ به پرپایی غرفه و ارتباط گیری با دانشجویان و دبیران مهندسی مکانیک و نیز ارائه گزارشی از فعالیت های سالانه اتحادیه برای این جشنواره پرداختند. با تلاش های دبیران سراسر کشور در دوره های پنجم و ششم با افتخار، این اتحادیه موفق به کسب رتبه ی شایسته تقدیر جشنواره حرکت پانزدهم شد.



اتحادیه انجمن های علمی دانشجویی مهندسی مکانیک ایران در مسیر جریان سازی برای به نمایش گذاشتن ارتباط صنعت و دانشگاه، از حامیان تیم فرمول دانشجویی رهام در دانشگاه فردوسی مشهد نیز بوده است. این تیم در تابستان ۱۴۰۲ با شرکت در مسابقات فرمول دانشجویی ایتالیا ۲۰۲۳ و گذراندن تست های مختلف، موفق به حضور در رتبه بندی شد. با توجه به امتیازات کسب شده در آیتم های مختلف استاتیکی و دینامیکی و با رتبه بندی نهایی تیم ها، تیم رهام توانست رتبه ۱۳ را بالاتر از ۹ تیم از کشورهای قبرس، فرانسه، اسپانیا، یونان، ترکیه، انگلستان و ایتالیا کسب نماید.



در راستای گسترش فرهنگ مشارکت، همکاری، رقابت و توسعه فعالیت‌های علمی گروهی، بین دانشجویان و نیز زمینه سازی جهت رشد و توسعه انجمن‌های علمی دانشجویی، در این دوره از اتحادیه، حامی رویدادها و مسابقات مختلفی با همکاری دانشگاه‌های سراسر کشور بوده ایم. از جمله ی این رویداد ها می توان به مسابقه ملی ستون ماکارونی دانشگاه فردوسی مشهد، مسابقه عکاسی تپش دانشگاه تبریز، مسابقه ملی نجات تخم مرغ دانشگاه محقق اردبیلی، رویداد بین المللی هوش مصنوعی و رباتیک راینو دانشگاه نوشیروانی بابل، جایزه بزرگ کشوری نجات تخم مرغ دانشگاه تربت حیدریه، رویداد عصر مهندسين خلاق در دانشگاه خلیج فارس و مسابقه بین المللی ارائه در ۲۰۰ ثانیه دانشگاه علم و صنعت ایران اشاره کرد.

امید است با همکاری تمامی دانشجویان و انجمن های علمی سراسر کشور و نیز حمایت های وزارت محترم علوم، تحقیقات و فناوری این روال، رو به رشد و بهبود ادامه یابد.





کارهای عملی در مهندسی مکانیک، دانشجوی دکتری از آمریکای گوید

آرش نوربخش سعد اباد، دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز

-خب امیر جان لطفا خودت را برای ما به کم معرفی بکن. در مورد تحصیلات بگو و اینکه در حوزه مکانیک چه تخصص هایی داری را برای خواندگانمون بگو.

-امیرحسابی هستم. الان دانشجوی دکترا در آمریکا و ایالت آلاباما و دانشگاه یوچا هستم. من فارغ التحصیل رشته مهندسی مکانیک در کارشناسی ارشد از دانشگاه تبریز هستم. سال نود و پنج در واقع ارشد شروع کردم و سال نود و هفت فارغ التحصیل شدم و برای ادامه ی تسهیلات سال هزار چهارصد به دانشگاه کلمسون تونستم ادمیشن (قبولی) بگیرم. بعد از یک سال و نیم حدودا کار کردن تو کایمبسون، به این نتیجه رسیدم که رشته ای که الان داریم کار می کنیم زیاد ناولتی و جذابیت خودش را نداشته و بنابراین من تصمیم گرفتم که ترنسفر بزنم و الان در یوایچ کار عددی می کنم.

-توی ایران بودی کار اکسپریمنتال انجام دادی؟

-بله من دوره ی ارشد که بودم یعنی تو رشته ی همین سیالات که بودیم کار تجربی داشتیم و اکسپریمنتال بود که روی ورتکس بود. اینکه چطور میشه به حالت کاویتاسیون به بهینه سازی خودش رسوند و بتونیم که در واقع از یک پمپ بیشترین بازده و کمترین کاویتاسیون را ببینیم.

-خب یکم در مورد این برامون میگی که چه کار کردید؟ به صورت تجربی از چه دستگاه هایی استفاده کردی؟ ستاپتون چطور بود؟

-برای اینکه یه پمپ پره ای را ما بتونیم شبیه سازی بکنیم اومدیم از یه کانالی که از پلکسی گلس بود استفاده کردیم. این کار شامل دو تا کانال جداگانه بود که بهش میگفتیم کانال یک، کانال دو و سه، که یک درواقع دقیقا ساکشن پمپ را شبیه سازی می کرد. کانال دو کانال دیسچارج پمپ را شبیه سازی می کرد و کانال سه خروجی گازهای ورودی به داخل کانال دو بود. در این اکسپریمنتال ستاپی که ما خودمون طراحی کرده بودیم و خودمونم ساختیم، در واقع اومده بودیم که همینطور که عرض کردم می خواستیم کاویتاسیون در داخل پمپ را بررسی بکنیم. کاویتاسیونی که در داخل پمپ تشکیل میشه به ازای ورتکسی که بعد از این پره پمپ به وجود میاد و کاویتاسیونی که شما می بینید به دلیل فشار معکوسی هست که بعد پره پمپ اتفاق میفته و یه حالت خلا به وجود میاد که باعث میشه که جریانی که می خواد از پمپ رد بشه به صورت مکشی برگرده به روی پره و باعث خوردگی بشه. ما تو این آزمایش اومدیم سه مدل مختلف را بررسی کردیم. تو این سه مدل مختلف ما سه مدل لقی پره را در نظر گرفتیم با ابعاد مختلف که در واقع دو میلی متر، چهار میلی متر و شیش میلی متر بود. این دو میلی متر و چهار میلی متر و شیش که گفتم درواقع لقی بین پره و پوسته پمپه که در همه ی پمپ ها می تونیم ببینیم. حالا ما اومدیم تو آزمایش اینو بررسی کردیم که در چه حالتی ورتکس هایی که بعد پره ایجاد میشه به کمترین میزان خودش می رسه و کمترین مدت خودش را داره و درواقع ما کمترین کاویتاسیون می توانیم داشته باشیم. خب آزمایشات تجربی و استفاده از نرم افزارهای پردازش تصویر به این نتیجه رسیدیم که قدرت ورتکسی که بعد پره ایجاد میشه، درواقع برای لقی دو میلی متر کمترین قدرت خودش داشت و برای لقی ۶ میلی متر بالاترین قدرت خودش را داشت. این نشون میده که هر چقدر در یک پمپ سازی ما بتونیم ابعاد را با کالیبراسیون دقیق تر بتونیم این پمپ طراحی بکنیم، کاویتاسیونی که در اثر تیپ ورتکس ایجاد میشه میاد پایین تر.

-در مورد ایمپج پروسسینگ صحبت کردی. در پروژه ی شما چطور بود؟ از ابزارهایی استفاده کردین؟

-خب چیزی که مربوط به اون کار ما بود ما باید حتما به عکس یا ویدیویی دو بعدی از دستگاه داشتیم ولی چون دستگاه ما به صورت سه بعدی بود، از طرف بالا ما می تونستیم که اون لقی و جریان عبوری را ببینیم، همینطور از سمت چپ یا راست میدیدیم. ما اومدیم از دو تا دوربین سرعت بالا استفاده کردیم که یکی از سمت راست دستگاه بود یکی از سمت بالا. از سمت بالا ما اومدیم این ایستبیلیتی هایی که بعد از پره ایجاد می شد را بررسی کردیم و از سمت راست، ما اومدیم به صورت پردازش تصویر، قدرت ورتکس ها کاملا مشخص میشد، دقیقا چجوری اند و بعد اندازه شون چیه، قطر شون چیه؟ و همه ی اینها را از طریق پردازش تصویر در آوردیم. من خودم از متلب استفاده کردم. تو متلب خودش یه چند تا ماژول مختلفی داره که می تونید از هر کدام استفاده بکنید. ولی اون چیزی که به درد من می خورد درواقع متد کنی و ادج دیتکشن بود.





حالا توضیح مختصری من درباره‌ی این متد بدم. موقعی که ما به عکسی را مثلا به عنوان به سمپل برمی داریم، مطمئنا ما اونجا برای اینکه نورپردازی مناسبی داشته باشیم و واسه این که در واقع ببینیم داخل دستگاه و داخل اون کانال ما چه اتفاقی میفته، اینتنسیتی رنگ‌های مختلفی را داریم. اولین مرحله‌ای که باید انجام داده بشه اینه که ما بتونیم اینتنسیتی هارو، بالاترین شدت رنگ و پایین‌ترین شدت رنگ را به صورت باینری دربیاریم یعنی سفید و سیاه در بیاریم. تو این حالت ما می‌تونیم ورتکس یا اون چیزی که پررنگ هست، مثلا با پیکسل سفید و اون چیزی که کم‌رنگ با پیکسل سیاه یا مشکی بتونیم در عکس ویزولایز بکنیم. این کار باعث میشه که ما به راحتی بتونیم اون لبه‌های ورتکس را کاملا به صورت واضح ببینیم. به ما کمک می‌کنه که ما می‌تونیم قطر ورتکس را بر اساس گاورنرینگ اکوایشین هایی که داشتیم و بعد اومدیم رسیدیم به یه نتیجه‌ای که می‌تونیم چطوری قدرت ورتکس را از سیرکیولاسیون بدست بیاریم. یکی از پارامترهای مهمی که ما داشتیم قطر کاویتاسیون بود.

-قطرهاو چطور محاسبه کردین؟

-یک عکس سمپلی برمیداشتیم، مثلا در عرض ده ثانیه ما از کانالمون ویدیو برداشت میکردیم. این ویدیوها تبدیل به عکس می‌شدن با هر فریمی که برای دوربین مشخص کرده بودیم. دوربین صد و بیست فریم در ثانیه بود. ما این عکس را از روی ویدیوها اکسترکت میکردیم. اینا را وارد نرم‌افزار متلب می‌کردیم و نرم‌افزارهای متلب اون کدی که خودمون توسعه داده بودیم و نوشته بودیم که برای هر اجد دیتکشنی که برای هر ورتکسی به وجود اومده اون را واسه ما معرفی می‌کرد. ما می‌دیدیم که پیکسل‌های سفید دور به محفظه‌ی مشکی رنگی به وجود اومده، یعنی اون پیکسل‌ها در واقع اینتنسیتی اون رنگی بود که ما از روی فیلم برداشتیم. حال چطوری ما می‌تونستیم بین این رنگ‌ها کانترست ایجاد بکنیم، یا با نورپردازی باید این کار می‌کردیم یا باید با گازهای مختلف و گازهای رنگی استفاده می‌کردیم که این تشکیل بشه. در واقع از روی گازهای مختلفی که با رنگ‌های مختلف ما استفاده کرده بودیم به وجود اومد. خیلی هم عالی در اومد تو متلب یعنی تمام کانالمون مشکی رنگ شد و اون گاز رنگی که از لبه رد می‌شد و می‌ومد و ما عکس گرفته بودیم کاملا زرد رنگ و تبدیل شد به پیکسل‌های سفید. در نتیجه ما اومدیم به مطلب یک کدی اضافه کردیم و گفتیم که ما تو این بازه این عکسی که ما به عنوان سمپل داریم باید شما به ROI به مطلب ارایه بدید که متلب بدونه که کدوم منطقه را شما می‌خواهین در واقع رجین اف اینترست را مشخص میکردیم. مطلب زوم می‌کرد به همون نقطه از عکسمون و تو اون عکس اون پیکسل‌های سفید را از سمت راست می‌شمرد. اولین پیکسل سفید را دیتکت میکرد و دوباره همین مدل ادامه می‌داد تا آخرین پیکسل سفید را شناسایی کنه و در واقع اون می‌شد قطر ورتکس ما. اینا کمک میکرد که بتونیم قدرت ورتکس را بدست بیاریم. در نتیجه نتایج بعدی که همون اول عرض کردم که که قدرت ورتکس هرچه قدر بیشتر باشه، کاویتاسیون بیشتر خواهد بود.

- از ویژگی‌های متلب بهمون میگید؟ چه چیز متلب برای تو جالب بود که ترغیب شدی از اون استفاده کنی؟

-مطلب یعنی اتوماسیون کردن پروسه. در واقع شما بدون مطلب می‌خواستین این کار را انجام بدی شما برای ده ثانیه فیلمبرداری که عرض کردم شما واسه هر ثانیه، صد و بیست فریم داشتی، ببینید چقدر باید کار انجام میدادی. اگر شما می‌خواستین این کار برای هر هزارو دویست عکسی که از اکسپریمنت به دست اومده بود به صورت دستی با نرم‌افزار فتوشاپ انجام بدی که این امکان البته هست و ما برای ولیدیشن همین کارم برای چند فریم انجام دادیم. ما از نرم‌افزار فتوشاپ استفاده کردیم به صورت دستی برای چند تا که دیدیم که متلب به درستی به ما نتایج را میده. این پروسه روی نرم‌افزار فتوشاپ برای مثلا چهار تا عکس شاید به روز زمان ببره که شما بتونید عکس آپلود کنید. باید روی آن کار کنید و ابعادش را درست کنید. بعد مطلب این را برای هزار و دویست عکس در عرض شاید به دقیقه انجام میده.

-کارهای عددی را روی چه نرم‌افزاری انجام میدی؟

-الان کارم روی احتراق هست و روی نرم‌افزار FDS است. بر اساس پایه سی اف دی کار میکنه. ما میتونیم روی سورس کدها براساس شرایط خود مسئله‌ای که داریم و فیزیک مسئله‌ای که می‌خواهیم ایجاد بکنیم تغییراتی بدیم و این تغییرات باعث میشه که ما به اون موضوعی که می‌خواستیم برسیم. در واقع اف‌دی‌اس کمک می‌کنه که ما هم بتونیم ریزالت هایی که از یه ریکشن یا کامباسشن بدست بیاریم، و دیتاهایی که به ما میده باعث میشه که ما بتونیم از نرم‌افزارهای پست پراسسینگ مثل اسموک ویو استفاده کنیم تا ببینیم که پروسه‌ای که ما روش کار کردیم به صورت شبیه‌سازی و سیمولیشن سه بعدی، در چه حالتی هست؟

- به نظرت یه نرم‌افزار مکانیکی تو حوزه‌ی ما چه ویژگی‌هایی باید داشته باشه؟

-به نظر من، نرم‌افزارهایی که من خودم کار کردم اولین ویژگی که این نرم‌افزار باید داشته باشه و همه به نظرم باهاش موافق باشن، باید حتما یوزر فرندلی باشه. که بتونیم حداقل مثلا میگم اون پروسه‌ی اول یا استارت کارمون بر حسب اینکه داریم شروع می‌کنیم و حالا مثلا مراجع مختلفی داشته باشه، بتونیم ازش یاد بگیریم و بدونیم که ماژول چیکار میکنه. و به نسبت مساله‌ی خودمون یا حالا فیزیک خودمون چطوری می‌تونیم نرم‌افزار را مطابقت بدیم این خودش یه ویژگی خیلی مهم از نظر من است. و دومین ویژگی که می‌تونه به چشم میاد حالا من پیشنهاد می‌کنم که هرکسی که حالا می‌خواد بره دنبال یه پروژه‌ای باید حتما یاد بگیره که چیکار باید بکنه رو اون پروژه و با کدوم نرم‌افزار به جلو بره، اینه که ما بتونیم برحسب اون فیزیک مساله باید نرم‌افزار را انتخاب بکنیم. شما باید بر حسب موضوع خودتون ببینید که کدومشون با کاری که می‌خواهین انجام بدیم مطابقت داره. این دو ویژگی از نظر من ویژگی‌های مهمی هست که باید حتما در نظر گرفت.

- خیلی ممنون لطف کردی.

-تشکرو ممنون





استفاده از انرژی خورشیدی به منظور تولید سوخت هیدروژنی

سید امیررضا عبداللہی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده
مهندسی مکانیک، تبریز، ایران

سید فرامرز نجیر

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده:

این مقاله مقدمه ای بر انرژی هیدروژنی و تولید آن را خلاصه می‌کند. تولید هیدروژن روش‌های مختلفی دارد که هم اکنون از بسیاری از روش‌های مخرب محیط زیست (مانند استفاده از سوخت‌های فسیلی) استفاده می‌شود. ما در پژوهش کنونی، به بررسی پاک ترین روش تولید سوخت هیدروژنی پرداخته ایم. همچنین در خلال پژوهش، به معرفی و بررسی پژوهش‌ها و فعالیت‌های صنعتی سایر محققان، شرکت‌ها، تصمیمات و کارهای آنها در مورد تولید هیدروژن توسط انرژی خورشیدی پرداخته شد و سپس به بحث فیزیک، اصول، مواد و سیستم‌های تولید هیدروژن به عنوان سوخت پرداخته شد. در این بین، نکاتی مربوط به مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی و هزینه انواع روش‌های تولید هیدروژن ذکر و مقایسه شد. در پایان جمع بندی کلی و جزئی برای حال و آینده این سوخت و روش تولید آن از نظر مهندسی و سیاسی صورت گرفت.

واژه‌های کلیدی: انرژی هیدروژنی، انرژی پاک، انرژی خورشیدی، تولید هیدروژن، سلول‌های خورشیدی

۱- مقدمه:

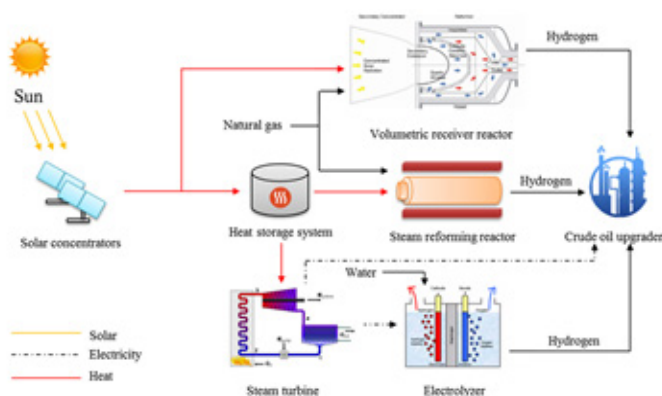
به همین دلیل، به عنوان حامل اصلی انرژی برای تولید هیدروژن سبز در نظر گرفته می‌شود. در حالی که روش‌های دیگری برای تولید هیدروژن خورشیدی مانند واکنش‌های فوتوکاتالیستی [۶] و تقسیم آب فوتوالکتروشیمیایی مستقیم [۷]، [۸] وجود دارد، فناوری امروزی تنها برای سیستم‌های الکترولیز (PV-E (PV-E در دسترس است.

هیدروژن سبز (GH₂ یا GH₂) هیدروژنی است که توسط انرژی‌های تجدیدپذیر [۱] یا از انرژی با تولید کم کربن [۲] بدست می‌آید. هیدروژن سبز به طور قابل توجهی انتشار کربن کمتری نسبت به هیدروژن خاکستری دارد، که با اصلاح بخار گاز طبیعی تولید می‌شود که بخش عمده ای از بازار هیدروژن را تشکیل می‌دهد. هیدروژن سبز تولید شده توسط الکترولیز آب کمتر از ۰٫۱ درصد کل تولید هیدروژن است [۳]. ممکن است برای کربن زدایی بخش‌هایی که به سختی برق رسانی می‌شوند، مانند تولید فولاد و سیمان، و در نتیجه به محدود کردن تغییرات آب و هوایی کمک کند.

بیش از ۱۲۵ سال پیش، ژول ورن درباره هیدروژن سبز به ما گفت. او در زمان جزیره اسرارآمیز خود به آن اشاره کرده است... «و به جای زغال سنگ چه چیزی می‌سوزانند؟... آب!... آبی که توسط الکتریسیته به عناصر اولیه خود تجزیه می‌شود... روزی به عنوان سوخت استفاده می‌شود» [۳].

هیدروژن مولکولی به عنوان یک حامل انرژی به کربن زدایی سیستم انرژی ما به منظور دستیابی به اهداف کاهش انتشار کربن کمک می‌کند، به عنوان مثال همانطور که در توافقنامه پاریس بیان شده است. برای ایجاد تفاوت معنادار و دستیابی به انتشار خالص صفر، هیدروژن باید از طریق تقسیم آب با استفاده از برق تجدیدپذیر تولید شود.

فوتولتائیک خورشیدی (PV) یکی از ارزان‌ترین و پرکاربردترین منابع برق تجدیدپذیر با بیش از ۵۲۰ گیگاوات ظرفیت نصب شده تجمعی در سراسر جهان تا سال ۲۰۱۸ است [۴]، [۵].

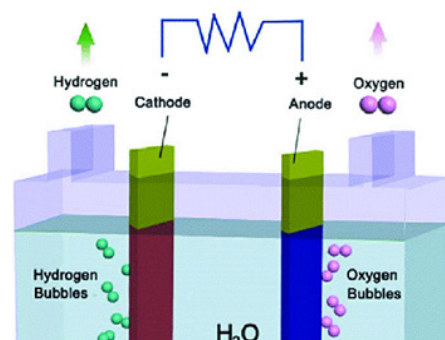


شکل ۱- شماتیک مراحل تولید هیدروژن با استفاده از انرژی خورشیدی



۲- مواد و روش‌ها

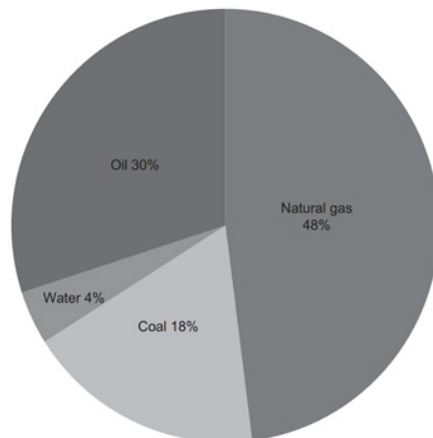
سلول‌های PV مبتنی بر سیلیکون با حدود ۹۵٪ سهم از تولید فعلی بازار را تحت سلطه خود دارند و در چند سال اخیر شاهد کاهش قابل توجه هزینه آنها بوده‌اند. با این وجود، هزینه تخمینی هیدروژن سبز از PV-E مبتنی بر سیلیکون هنوز برای تولید پایدار بسیار بالا است. البته این امر بسته به ماهیت و سطح مطالعات بسیار متفاوت است: ۱۶-۱۲۴ \$/kg، ۱۰-۱۲۴ \$/kg، ۱۱-۱۶۱ \$/kg، ۱۲-۱۳۳ \$/kg. هزینه هیدروژن سبز تولید شده به عوامل متعددی مانند هزینه‌های تجهیزات، هزینه الکترولیز، هزینه سیستم (BOS) و هزینه کارخانه (BOP)، هزینه عملیات و نگهداری (O & M) و کارایی سیستم بستگی دارد. [۱۱]، [۱۴]، [۱۵] از بین تمامی این عوامل، راندمان سیستم یا به عبارت دیگر نسبت راندمان خورشیدی به هیدروژن تولیدی (STH) مستقیماً بر سایر عوامل تأثیر می‌گذارد و می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه اندازه نیروگاه‌های PV و الکترولیز شود. [۱۶] سلول‌های PV سیلیکونی نزدیک به رسیدن به بازده تئوری خود در حدود ۳۰٪ هستند که به این معنی است که دامنه زیادی برای افزایش کارایی STH با PV سیلیکونی وجود ندارد [۱۷]. برخلاف PV سیلیکونی، سلول‌های فتوولتائیک متمرکز (CPV) مبتنی بر عناصر گروه III-V قبلاً به راندمان بسیار بالاتری در حدود ۴۷٪ (سلول ۴) رسیده‌اند و از نظر تئوری می‌توانند به راندمان بیش از ۸۰٪ برسند [۱۸]، [۱۹]. در سطح مازولار، ۴۳٪/۱۸ و ۴۳٪/۲۰ مازول‌های CPV کارآمد با بازده مدولار پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۳۵ ۴۷٪ نشان داده شده‌اند [۹]. علاوه بر این، آنها می‌توانند در شدت‌های بالای نور (بیش از ۱۰۰۰ سان) عمل کنند که تا حد زیادی هزینه تولید بالاتر را جبران می‌کند [۲۱].



شکل ۲- دیاگرام شماتیک الکترولیز

راندمان بالای سلول‌های CPV محققان را تشویق کرده است تا در سال‌های اخیر پارامترهای CPV-E (electrolysis) را بررسی کنند. به عنوان مثال، چانگ و همکارانش با استفاده از یک سلول PV GaAs تک اتصالی که با یک مبدل DC-DC به الکترولیز مبدل پروتون (PEM) متصل شده است، بازده STH را حدود ۲۰٫۶٪ گزارش کردند [۲۲]. ناکامورا و همکارانش با استفاده از یک سیستم CPV-E، بدون استفاده از الکترونیک قدرت، راندمان STH ۲۴٫۴٪ را گزارش کردند [۲۳]. تطبیق توان با بهینه‌سازی نسبت تعداد الکترولیزرها به سلول‌های CPV انجام

شد. بالاترین راندمان STH (۳۱٪) در مقیاس آزمایشگاهی از طریق جفت مستقیم دو الکترولیزر PEM با یک سلول CPV، که در ۴۲ سان کار می‌کنند، گزارش شد [۲۴]. تمام این گزارش‌های قبلی سلول‌های CPV را با الکترولیزهای PEM که با هزینه‌ها و BOP بالا هستند همراه کردند [۱۰].



شکل ۳- فراوانی توزیع روش‌های تولید هیدروژن در جهان

انتخاب مواد فوتوالکتروود مهمترین جنبه طراحی سیستم‌های PEC است زیرا تقسیم آب کارآمد به یک نیمه هادی مناسب برای تبدیل انرژی فوتون به هیدروژن نیاز دارد. برای تولید هیدروژن مبتنی بر PEC کارآمد، تمیز و مقرون به صرفه، یک فوتوالکتروود نیمه هادی باید حداقل شرایط زیر را برآورده کند:

- بازده تبدیل: ۱۰٪
 - چگالی جریان (j_{sc}): ۱۰-۱۵ mA/cm²
 - دوام ماده: < ۲۰۰۰ ساعت
 - مقرون به صرفه بودن
- از آنجایی که عملکرد تولید هیدروژن یک سیستم PEC تا حد زیادی تحت تأثیر نوع فوتوالکتروود نیمه هادی است، مطالعات زیادی بر روی طراحی، آماده سازی، پردازش و اصلاح نیمه هادی‌های فوتوآکتیو متمرکز شده است. فرآیند انتقال الکترون، انرژی شکاف طیفی و ساختار طیفی نیمه هادی‌ها عواملی هستند که به طور قابل توجهی بر کارایی یک فوتوالکتروود تأثیر می‌گذارند [۱۱]. فوتوالکتروودهای موجود را می‌توان به صورت زیر تغییر داد:

- افزایش پاسخ آن‌ها به نور مرئی با تغییر شکاف باند
- افزایش نرخ انتقال الکترون
- تغییر در سطوح انرژی VB/CB
- برخی از تکنیک‌های موجود اصلاح فوتوالکتروود عبارتند از داپینگ، حساس سازی رنگ، تابش سریع یون‌های سنگین (SHI)، بارگذاری یون فلزی، رسوب گذاری الکتروود و... برخی از مزایای استفاده از فوتوالکتروودهای اصلاح شده به شرح زیر است:
- تولید و جداسازی کارآمد e⁻-h⁺
- جلوگیری از ترکیب مجدد e⁻-h⁺
- افزایش عمر مفید

۳- بحث و بررسی

انرژی هیدروژنی یک منبع پاک انرژی است که می

تواند نقش مهمی در برآوردن نیازهای انرژی آینده جهان به شیوه ای سازگار با محیط زیست داشته باشد. بنابراین، رویکردهای سازگار با محیط زیست اخیر برای تولید هیدروژن که می‌تواند یک انتقال آرام به هزینه‌های تولید هیدروژن را امکان پذیر سازد، در مقایسه با رویکردهای تولید هیدروژن مبتنی بر سوخت‌های فسیلی آلاینده، تحت تحقیقات فشرده برای امکان‌سنجی و مقرون به صرفه بودن قرار گرفته‌اند.

واضح است که تمام رویکردهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن نسبت به رویکردهای تولید هیدروژن مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با محیط زیست سازگارتر هستند. با این حال، هزینه تولید هیدروژن با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر باید بیشتر کاهش یابد تا در مقیاس بزرگ اعمال شود. در میان فناوری‌های تولید هیدروژن مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری تولید هیدروژن مبتنی بر زیست‌توده (بایومس) دارای مزایای خاصی نسبت به سایر فناوری‌ها از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی است. به طور خاص، تحت شرایط ارزیابی مشابه با مطالعات دیگر، تأثیر زیست‌محیطی تولید هیدروژن از طریق الکترولیز زیست‌توده کوچک‌تر از روش‌های دیگر است و آن را به یک نامزد بالقوه برای یک تکنیک تولید انرژی هیدروژن دوست‌دار محیط‌زیست با مصرف انرژی کم تبدیل می‌کند. بسیاری از کارهای تجربی نشان می‌دهند که با بهینه‌سازی پیکربندی سلول‌های CPV (۷۰٪، ۷۰ درصد کارآمد) و الکترولیزهای قلیایی موجود (۷۰ درصد کارآمد) می‌توان یک سیستم پایدار با راندمان STH ۲۸٪ به دست آورد. تجزیه و تحلیل دقیق TEA نشان داد که با وجود هزینه بالای این سلول‌های LCOH، CPV با فارم‌های خورشیدی CPV، امروزه می‌تواند به آنچه با استفاده از فارم‌های خورشیدی Si-c به دست می‌آید نزدیک شود. از آنجا که سلول‌های خورشیدی تجاری Si-c به حد اشباع نزدیک شده‌اند، ما تجزیه و تحلیل حساسیت عوامل متعددی را انجام داده‌ایم که بر سیستم‌های CPV و الکترولیز قلیایی تأثیر می‌گذارند. اینها شامل راندمان مازول CPV، ظرفیت نصب شده، طول عمر اجزای دستگاه الکترولیز و چگالی جریان عملیاتی است. نتایج نشان می‌دهد که وقتی ظرفیت نصب شده فناوری CPV با سیلیکون مطابقت دارد و وقتی چگالی جریان عملیاتی الکترولیز به حدود ۰٫۷ A/cm² می‌رسد، هزینه سطح‌سازی شده H₂ از سیستم‌های CPV-الکترولیز می‌تواند به کمتر از ۲ دلار به ازای هر کیلوگرم کاهش یابد. هزینه جداسازی CO₂ بین ۱٫۲ تا ۲٫۸ دلار در هر کیلوگرم تا ۱٫۶ دلار است.

هیدروژن را می‌توان از آب با راندمان و نرخ تولید بالا تولید کرد. افزایش قابل توجه راندمان همانطور که در این کار مشاهده می‌شود راندمان STH را با سایر موتورهای کاربردی در صنعت هم‌تراز می‌کند. مانند هر فناوری دیگری، فناوری ارائه شده در اینجا با گذشت زمان و مانند هر فناوری دیگر، هزینه آن کاهش می‌یابد و تنها با



انگیزه های قوی می توان آن را زنده کرد. در سال های اخیر، صنعت PV سیلیکون افت قیمتی بیش از ۸۰ درصدی را تجربه کرد که عمدتاً ناشی از صنایع یارانه ای بود که می توانستند محصولات را با سود کم یا بدون سود بفروشند. از سوی دیگر، CPV از فقدان یک زنجیره تامین اختصاصی رنج می برد که بسیاری از شرکت ها را مجبور کرده است که بیشتر قطعات (ردیاب ها، ماژول ها و...) را خودشان توسعه داده و تولید کنند. ما امیدواریم که این نتایج و تجزیه و تحلیل هزینه، محققان، دولت ها و شرکت ها را تشویق کند تا الکترولیز CPV برای تولید تجاری H₂ را بررسی کنند. انگیزه اصلی، در کوتاه مدت، ممکن است ثروت نباشد، بلکه محیط زیست باشد. و این امر به مرور زمان مواد لازم برای پیشرفت و شکوفایی را به همراه خواهد داشت.

۴- نتیجه گیری

مزایا و معایب مختلف از نظر بازده انرژی، عامل پایداری و کارایی اقتصادی مقایسه می شوند. اگرچه شاید اصلاح بخار هیدروکربن ها دارای مزایای اضافی باشد، با این حال به دلیل ویژگی انرژی فسیلی تجدید ناپذیر و اثرات زیست محیطی آنها محدود می مانند. الکترولیز آب برای کشورهای گرمسیری با پتانسیل تابش خورشیدی قوی یک گزینه جالب است که توسعه زیادی را با تجاری سازی الکترولیزهای دمای بالا در نظر می گیرد. راندمان تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته محدودیت اصلی در بهبود بازده کلی تولید هیدروژن است. در مقایسه، فناوری های الکترولیز خورشیدی، فوتوالکتروشیمیایی و فتوشیمیایی می توانند برای ایستگاه های سوخت هیدروژن سودمندتر باشند، زیرا فرآیندهای کمتری مورد نیاز است، می توان از منابع انرژی خارجی اجتناب کرد و همچنین از سیستم های توزیع هیدروژن اضافی نیز جلوگیری کرد.

فرآیندهای دمای بالا نیاز به توسعه مواد بیشتری دارند که بر روی غشاهای دمای بالا و مبدل های حرارتی برای فرآیندهای حرارتی خورشیدی تمرکز دارد. بنابراین سیستم های استفاده از هیدروژن خورشیدی جهان عمدتاً از سیستم های هیدروژن فتوولتائیک برای حمل و نقل و کاربردهای ثابت تشکیل شده است.

تولید هیدروژن سازگار با محیط زیست از طریق خورشید برای حفظ محیط زیست بسیار مهم است زیرا در حین تولید هیچ گونه گاز گلخانه ای منتشر نمی کند.

در حال حاضر این یک کار چالش برانگیز برای محققان و دانشمندان است زیرا راندمان انرژی آرایه های PV و از این رو، بازده کلی انرژی یک سیستم هیدروژنی خورشیدی پایین است.

بسیاری از انرژی های تجدیدپذیر دغدغه های مجامع سایسی، اجتماعی یا زیست محیطی دارند که باید بر آن ها غلبه کرد. با این حال، همه این موانع به شدت توسط دولت و صنعت مورد توجه قرار می گیرند، و باید در نظر گرفت که آیا مزایا سرمایه گذاری بیشتری را امروز تضمین می کنند یا خیر.

۵- مراجع

- [۱۸] Ozbilen A, Dincer I, Rosen M A (۲۰۱۳) Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. *Environmental Impact Assessment Review*, ۹-۴۲:۱
- [۱۹] Solli C, Stromman A H, Hertwich E G (۲۰۱۶) Fission or Fossil: Life Cycle Assessment of Hydrogen Production. *Proceedings of the IEEE*, -۱۷۸۵:(۱۰)۹۴ ۱۷۹۴
- [۲۰] Utgikar V, Thiesen T (۲۰۱۶) Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, ۹۴۴-۹۳۹:(۷)۳۱
- [۲۱] D. C. Bobela , L. Gedvilas , M. Woodhouse , K. A. Horowitz and P. A. Basore , Economic competitiveness of IIIIV on silicon tandem one-sun photovoltaic solar modules in favorable future scenarios, *Prog. Photovoltaics*, ۴۸— ۴۱ , ۲۵ , ۲۰۱۷
- [۲۲] J. E. Haysom, O. Jafarieh, H. Anis, K. Hinzer and D. Wright , Learning curve analysis of concentrated photovoltaic systems, *Prog. Photovoltaics*, , ۲۳ , ۲۰۱۵ ۱۶۸۱— ۱۶۷۸
- [۲۳] D. Stolten and B. Emonts , *Hydrogen Science and Engineering*, ۲ Volume Set: Materials, Processes, Systems, and Technology , John Wiley & Sons, ۲۰۱۶, vol. vol. ۱
- [۲۴] M. Steinberg and H. C. Cheng , Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels, *Int. J. Hydrogen Energy*, , ۱۴ , ۱۹۸۹ ۸۲— ۷۹۷
- Kowalczewski, "Silicon solar cells: toward the efficiency limits," *Adv. Phys.*, vol. ۲۰۹, ۴.
- [۱۱] D. I. Zamfirescu C, "Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production," *Sol. Energy*, ۲۰۱۴.
- [۱۲] Ding N, Azargohar R, Dalai A K, et al (۲۰۱۴) Catalytic gasification of cellulose and pinewood to H₂ in supercritical water. *Fuel*, ۴۲۵-۴۱۶ : (۱۳)۱۱۸
- [۱۳] Boudries, Rafika (۲۰۱۶) Techno-economic Assessment of Solar Hydrogen Production Using CPV-electrolysis Systems. *Energy Procedia*, -۹۳:۹۱ ۱۰۱
- [۱۴] Boudries, R (۲۰۱۷) Techno-economic study of hydrogen production using CSP technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, ۲۰۱۷:۵۰۳۶۶-۳۱۹۹۱۷۳۲۶۵۷
- [۱۵] Rami S, El-Emam, Hasan Özcan, (۲۰۱۹) Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, Volume ۲۲, Pages ۶۰۹-۵۹۳
- [۱۶] Lv P, Wu C, Ma L, et al (۲۰۱۸) A study on the economic efficiency of hydrogen production from biomass residues in China. *Renewable Energy*, ۱۸۷۹-۱۸۷۴:(۸)۳۳
- [۱۷] Reiter G, Lindorfer J (۲۰۱۵) Global warming potential of hydrogen and methane production from renewable electricity via power-to-gas technology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, ۴۸۹-۴۷۷:(۴)۲۰
- [۱] J. Magill, "Blue Vs. Green Hydrogen: Which Will The Market Choose?," ۲۰۲۱.
- [۲] R. Cho, "Why We Need Green Hydrogen," news. climate.columbia.edu, ۲۰۲۱.
- [۳] Activesustainability.com, "WHAT IS GREEN HYDROGEN?," www.activesustainability.com, ۲۰۱۹.
- [۴] H. A. and S. A. -Z. M. Taylor, P. Ralon, "Renewable power, generation cost," *Int. Renew. Energy Agency*, ۲۰۲۰.
- [۵] A. Jaeger-Waldau, "PV Status Report ۲۰۱۹," Publications Office of the European Union, ۲۰۱۹.
- [۶] H. Idriss, "Hydrogen production from water: past and present," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. ۲۹, pp. ۲۰۲ , ۸۴۷۴.
- [۷] N. W. and H. I. M. Khan, I. Shankiti , A. Ziani, "A Stable Integrated Photoelectrochemical Reactor for H₂ Production from Water Attains a Solar-to-Hydrogen Efficiency of ۱۸٪ at ۱۵ Suns and ۱۳٪ at ۲۷ Suns," *Angew. Chem.*, vol. ۵۹, pp. ۲۰۲ , ۱۴۸۰-۸۱۴۸۰۲.
- [۸] M. A. K. and H. I. A. Ziani , I. Al-Shankiti, "Integrated Photo-Electrocatalytic (PEC) Systems for Water Splitting to Hydrogen and Oxygen under Concentrated Sunlight: Effect of Internal Parameters on Performance," *Energy Fuels*, vol. ۳۴, pp. ۲۰۲ , ۱۳۱۸۵۱۳۱۷۹.
- [۹] K. H. and S. K. M. Wiesenfarth , S. Philipps , A. Bett, "Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology," *Fraunhofer Inst. Sol. Energy Syst.*, ۲۰۱۷.
- [۱۰] M. L. and L. R. L. C. Andreani , A. Bozzola , P.



بررسی تأثیر هندسه و استفاده از مواد تابعی هدفمند بر توزیع تنش در ایمپلنت های دندانی

محمد حسین خاوری دانشور^۱، محمد حسین زاده پوستی^۲، حسن اسدی گیلانجانی^۳، شهاب صحرایی^۴، محمد خورسندی^{۵*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

۵- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان



چکیده

مواد هدفمند تابعی بخاطر قابلیت های بسیار زیاد در ساخت ایمپلنت های دندانی با موفقیت چشمگیری روبرو شده اند. از این رو، در تحقیق حاضر رفتار مکانیکی ایمپلنت های تابعی هدفمند ساخته شده از تیتانیوم و هیدروکسی آپوتایت مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با ایمپلنت های تیتانیومی مقایسه شده است. همچنین، تأثیر هندسه ای ایمپلنت های دندانی بر توزیع تنش اطراف آن مورد بررسی قرار گرفته است. بنابر این، با مدل سازی ایمپلنت دندانی با دو هندسه متفاوت بر روی قطعی از استخوان فک در نرم افزار سالیدورکس، جهت تحلیل در نرم افزار آباکوس، با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب و نزدیک به واقعیت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده تأثیر شگرف مواد تابعی هدفمند را بر توزیع بهتر تنش در استخوان اسفنجی نسبت به ایمپلنت های تیتانیومی نشان داده است.

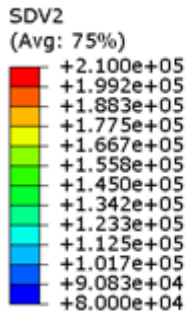
کلیدواژگان: ایمپلنت دندانی، توزیع تنش، مواد تابعی هدفمند، روش اجزای محدود

مقدمه

بهترین روش برای جبران دندان های از دست رفته ایمپلنت دندانی است که به لحاظ زیبایی و درمانی نسبت به دندان های مصنوعی ثابت و متحرک از مزایای بسیاری برخوردار است. کیفیت استخوان و ابعاد ایمپلنت از عوامل مؤثر در کاشت ایمپلنت دندانی می باشند. البته در برخی موارد هم کاشت ایمپلنت ناموفق است. از دلایل این عدم موفقیت در کاشت می توان به تغییر شکل در استخوان های مجاور ایمپلنت که منجر به عدم ثبات ایمپلنت دندانی می شود اشاره نمود. پیوند ایمپلنت و استخوان در زمان کاشت، از اهمیت زیادی برخوردار است. در دندان های طبیعی، لیگامان پریدونتال باعث جذب تنش شده یا به دندان ها اجازه حرکت می دهد اما، در ایمپلنت به دلیل عدم وجود این لیگامان، نیروهایی نظیر نیروی ناشی از جویدن، مستقیماً به استخوان اطراف ایمپلنت منتقل شده در نتیجه، باعث ظهور مشکلاتی مانند شکست ایمپلنت یا شل شدن خواهند شد. موفقیت کاشت ایمپلنت به عواملی نظیر کیفیت استخوان، پایداری اولیه و پارامترهای طراحی از جمله جنس، طول، گام و شکل رزوه بستگی دارد.

مدل سازی

ناهمگن از خواص مکانیکی است که در اثر تغییر درصد حجمی مواد تشکیل دهنده، دائم در حال تغییر است. بنابر این، در تحقیق حاضر برای تعریف ماده‌ی هدفمند تابعی برای ایمپلنت، با استفاده از کد فرتن، یک سابروتین UMAT در نرم افزار آباکوس بر روی ایمپلنت دندانی ایجاد گردید سپس، نتایج حاصل از آن با نتایج ایمپلنت تیتانیومی که مشخصات هندسی یکسانی داشت مقایسه شد.



شکل ۲: مدل الاستیسیته متغیر در ایمپلنت با مواد تابعی هدفمند

همانطور که در بالا گفته شد براساس قوانین ترکیب، جزء حجمی ماده (V_m) و جزء حجمی سرامیک (V_c) بر اساس رابطه‌ی (۱) در امتداد طول ایمپلنت توزیع می‌شوند:

$$V_m = \left(\frac{V}{h}\right)^n \quad (1)$$

$$V_c = 1 - V_m$$

همچنین، ضریب الاستیسیته^۱ و ضریب یواآسون^۲ این ماده‌ی مرکب نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = E_c \left[\frac{E_c - (E_c - E_m)V_m^{\frac{2}{3}}}{E_c - (E_c - E_m)(V_m^{\frac{2}{3}} - V_m)} \right] \quad (2)$$

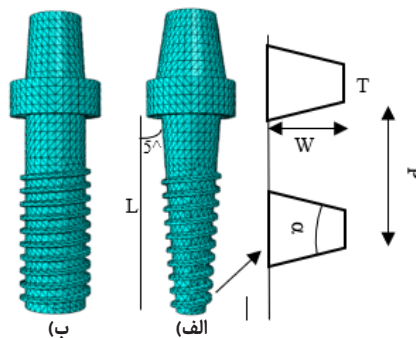
$$\nu = \nu_m V_m + \nu_c V_c$$

که در آن، y و h به ترتیب موقعیت در راستای عمودی و ارتفاع پیچ و m و c به ترتیب فلز و سرامیک و همچنین توان n میزان توزیع ترکیبی را نشان می‌دهند. زمانی که $n = 1$ است، تغییر ترکیب از فلز به سرامیک خطی می‌باشد و برای $n > 1$ ، ایمپلنت از فلز غنی‌تر، و برعکس زمانی که $n < 1$ ایمپلنت از سرامیک غنی‌تر خواهد شد که در این تحقیق، حالت $n = 1$ یا حالت خطی ترکیب، در نظر گرفته شده است.

شبیه سازی و تحلیل

در تحقیق حاضر، شبیه سازی با روش اجزای محدود و با المان‌های C3D10 (المان هرمی درجه ۲) انجام گرفته است. همچنین، برای تحلیل از ۱۷۸۱۱ المان و ۲۷۵۷۸ گره در ایمپلنت، ۲۴۰۸۰ المان و ۳۴۸۳۰ گره در استخوان اسفنجی و ۷۳۸۳ المان و ۱۲۶۱۲ گره در استخوان متراکم در محاسبات استفاده شده که در مدل شبکه بندی ترکیبی یا مونتاژ شده‌ی شکل ۴ قابل مشاهده است.

تحلیل اجزای محدود روشی است که امروزه در محاسبات بیومکانیک کاربرد وسیعی داشته و پژوهشگران بسیاری از این روش برای بدست آوردن تنش و کرنش بافت‌ها و درمان‌های پزشکی بهره برده‌اند. در این تحقیق، برای مدل سازی در نرم افزار سالیدورکس قطعه‌ی سه بعدی از ایمپلنت (در دو مدل استخوان‌های و مخروطی) نظیر شکل ۱ و قطعی از استخوان فک، متشکل از استخوان متراکم و استخوان اسفنجی مانند شکل ۳ طراحی گردید. سپس، شبیه سازی و تحلیل مدل‌ها با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی و شرایط مرزی هر قسمت در نرم افزار آباکوس انجام گرفت.



شکل ۱: الف) ایمپلنت استخوان‌های و ب) ایمپلنت مخروطی

بارگذاری و شرایط مرزی

شرایط مرزی این تحلیل این گونه است که استخوان فک ثابت در نظر گرفته شده و در تمام جهات مقید گردیده است. همچنین، برای شبیه سازی، بار ۱۵۰ نیوتون به صورت عمودی در راستای آکسوزال مطابق شکل ۳ به مرکز ایمپلنت وارد شده است.

ایمپلنت‌ها از لحاظ شکل ظاهری، گام و شکل روزه‌ای بسیار متنوع هستند اما، در میان آنها برای تحقیق حاضر، از ایمپلنت‌هایی با طرح استخوان‌های و مخروطی به طول ۱۱/۵ میلی‌متر و قطر ۴ میلی‌متر با پروفیل روزه از نوع دوزنقه‌ای V-۳ و گام ۰/۸ میلی‌متر که با مشخصات ابعادی روزه مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

W(mm)	T(mm)	α (Deg)
۰/۳۵	۰/۲	۳۰

که در آن، α زاویه‌ی روزه، T ضخامت نوک روزه و W ارتفاع روزه شکل ۱ را نشان می‌دهند.

خواص مواد

پیش‌تر گفته شد هدف این تحقیق این است که در ابتدا، رفتار مکانیکی ایمپلنت‌های هدفمند ساخته شده از تیتانیوم و هیدروکسی آپوتایت مورد ارزیابی قرار گیرد سپس، نتایج آن با نتایج ایمپلنت‌های تیتانیومی مقایسه گردد اما، همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود خواص مکانیکی یک ماده‌ی هدفمند تابعی برای یک ایمپلنت، در راستای محور طولی ثابت نیست و یک ماده‌ی هدفمند تابعی در واقع یک ترکیب

تحقیقات گسترده‌ای بر روی میزان تأثیر پارامترهای مختلف مذکور بر نحوه‌ی توزیع تنش در ایمپلنت‌های دندانی و بافت‌های مجاور صورت گرفته است که برخی از آنها در ذیل خواهند آمد. آمارام و همکاران با بررسی توزیع تنش بر روی ایمپلنت دندانی، میزان تأثیر پارامترهای الاستیک و هندسه‌ی ایمپلنت را مورد مطالعه قرار دادند [۷و۲]. حسین زاده و همکاران با بررسی تأثیر تغییر زاویه‌ی روزه بر نوسازی استخوان فک، نشان دادند که با کاهش زاویه‌ی روزه، تمرکز تنش کاهش یافته و سرعت تثبیت ایمپلنت افزایش می‌یابد [۳]. همچنین، در مقاله‌ای دیگر با مطالعه‌ی اثر کیفیت استخوان فک نشان دادند که موفقیت و ثبات ایمپلنت دندانی، رابطه‌ی مستقیمی با استخوان سازی اطراف ایمپلنت دارد [۴]. آبانگاه و همکاران با تحقیق بر روی اثر هندسه و ابعاد دندانه در توزیع تنش ایمپلنت دندانی دریافتند که با افزایش گام و ارتفاع دندانه‌ی ایمپلنت، بیشینه تنش ون میزز در ایمپلنت و بافت مجاور آن کاهش می‌یابد [۵].

در میان فلزات، فلز تیتانیوم به سبب زیست سازگاری خوب و مناسب، جزء مواد محبوب در دندانپزشکی و ارتوپدی محسوب می‌شود [۶] اما این فلز نمی‌تواند به طور مستقیم به استخوان متصل شود [۷و۸] از این رو، کاربرد بیومتریال‌های جدید در ایمپلنت‌های دندانی از چالش‌های اصلی در حوزه‌ی مهندسی پزشکی شده است. مواد تابعی هدفمند، نظیر هیدروکسی آپوتایت می‌توانند معیارهای مهمی نظیر پایداری اولیه، هدایت استخوانی و استحکام لازم را هنگام جویدن از خود نشان دهند. در مطالعه‌ای دیگر مشاهده شد که بافت استخوان اطراف ایمپلنت هیدروکسی آپوتایت، سریع‌تر از ایمپلنت تیتانیومی رشد می‌کند [۹]. همچنین در تحقیق واتاری و همکاران، از هیدروکسی آپوتایت و تیتانیوم برای ساخت ایمپلنت‌های تابعی هدفمند استفاده شده است. نتایج آنها نشان داد که این ترکیب، روشی مناسب در ساخت ایمپلنت‌های تابعی هدفمند است [۹] زیرا، با بکارگیری این ایمپلنت‌ها، تغییرات ۱۵ درصدی بیشینه تنش بر روی استخوان در مطالعات پیشین حاصل شده است [۱۰]. همچنین، در تحقیق حقیقی و همکاران، موفقیت بالینی دراز مدت استفاده از مواد تابعی هدفمند در مقایسه با فلز تیتانیوم بررسی شده است [۱۱].

تاکنون در پژوهش‌های انجام شده، سابروتین UMAT که قادر به تعریف ماده‌ی تابعی هدفمند جهت استفاده در اشکال هندسی مختلف ایمپلنت باشد ارائه نشده، از این رو در تحقیق حاضر، با طراحی سابروتین UMAT جدید با کد فرتن، به بررسی تحلیل تنش در دو ایمپلنت استخوان‌های و مخروطی فک دندان با مواد تابعی هدفمند تحت بارگذاری عمودی با روش اجزای محدود پرداخته شده است.



مزیت ایمپلنت مخروطی نسبت به ایمپلنت استوانه‌ای در پایداری استخوان‌های کم‌تراکم یا اسفنجی مطابقت دارد. همچنین در جداول ۳ و ۴ مقادیر بیشینه تنش بین دو مدل ایمپلنت استوانه‌ای و مخروطی بترتیب در ایمپلنت تیتانیومی و ایمپلنت تیتانیوم هیدروکسی آپوتایت (ایمپلنت با ماده‌ی تابعی هدفمند) برای مقایسه نشان داده شده است.

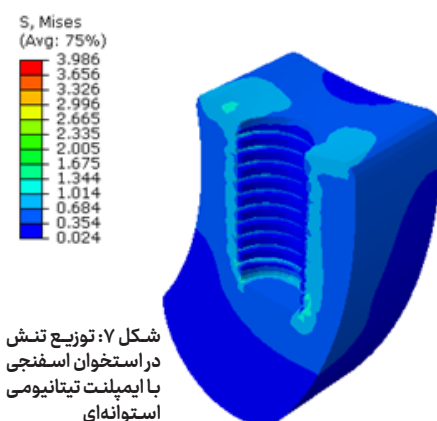
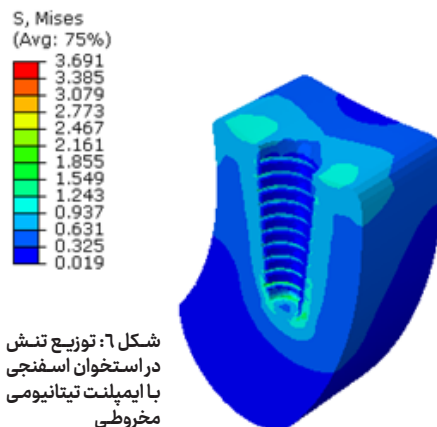
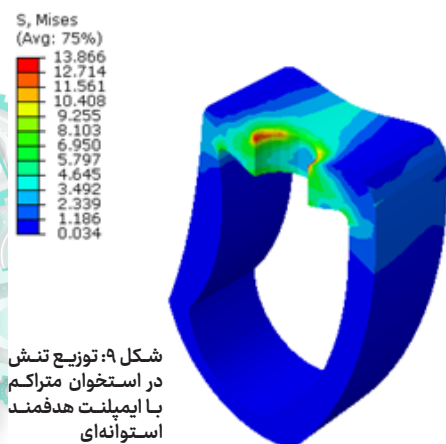
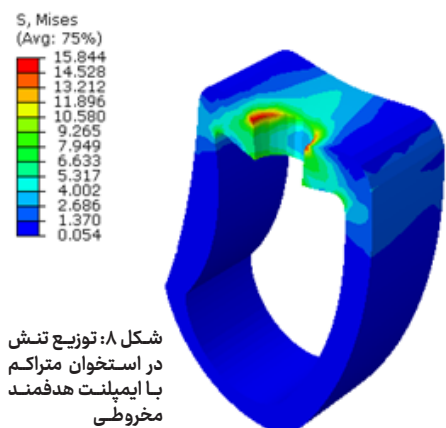
ردیف	شکل	تنش در استخوان اسفنجی	تنش در استخوان متراکم
۱	استوانه‌ای	۳,۹۸	۱۳,۸۱
۲	مخروطی	۳,۶۹	۱۵,۷۶

جدول ۳: بیشینه تنش‌های ایمپلنت تیتانیومی با بارگذاری عمودی

همچنین، برای مقایسه‌ی بهتر، نتایج در نمودارهای ۱۱ و ۱۰ نیز آورده شده که نشان می‌دهد ایمپلنت‌های مخروطی، همواره تنش کمتری به استخوان اسفنجی فک وارد کرده در نتیجه، باعث تضمین بیشتر پایداری و ثبات بالاتر ایمپلنت خواهند شد.

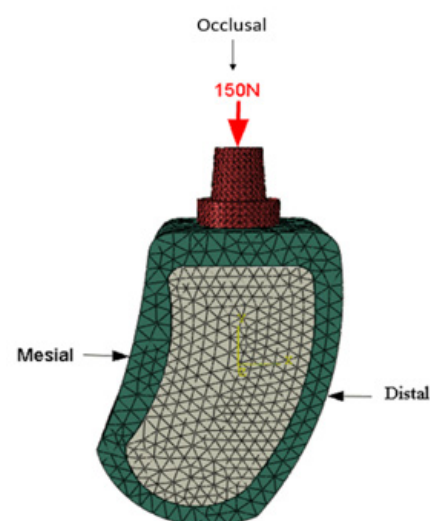
ردیف	شکل	تنش در استخوان اسفنجی	تنش در استخوان متراکم
۱	استوانه‌ای	۳,۶۵	۱۳,۸۷
۲	مخروطی	۳,۵۶	۱۵,۸۴

جدول ۴: بیشینه تنش‌های ایمپلنت هدفمند تابعی با بارگذاری عمودی



همانطور که در این اشکال مشاهده می‌شود بیشینه تنش بر روی استخوان متراکم در ایمپلنت با مواد تابعی هدفمند، بیش از ایمپلنت تیتانیومی ظاهر شده در حالی که، عکس این اتفاق در استخوان اسفنجی رخ داده است که علت آن، بخاطر پایین تر بودن ضریب الاستیک ایمپلنت تابعی هدفمند برای طول‌های کوچک است (زیرا در فاصله‌ی کوتاه محوری ضریب الاستیک آنچنان تغییر نکرده) و مطابق با تحقیق رضا پرتوی [۱۰] استفاده از ایمپلنت هدفمند را می‌توان معادل کاهش طول موثر ایمپلنت تیتانیومی دانست که کاملاً قابل توجیه است.

همچنین، بر اساس نتایج بیشینه تنش بدست آمده از توزیع تنش در استخوان اسفنجی اشکال ۵ و ۶ در ایمپلنت‌های تیتانیومی و اشکال ۹ و ۱۰ در ایمپلنت‌های هدفمند ملاحظه می‌شود که ایمپلنت مخروطی نسبت به ایمپلنت استوانه‌ای در ناحیه‌ی فیکسچر، کمترین بیشینه تنش را به استخوان اسفنجی وارد می‌کند و این مسئله بسیار با اهمیت است زیرا، احتمال شکست پیوند بین استخوان و ایمپلنت کمتر شده در نتیجه، پایداری ایمپلنت بیشتر خواهد شد. در حالی که، درست عکس این اتفاق در استخوان متراکم رخ داده است. بنابر این، هرچه به نواحی پایین ایمپلنت نزدیک می‌شویم با کاهش قطر، تنش بیشینه نیز کاهش می‌یابد که این مطلب با یافته‌های تحقیق مریم طاقت [۱۲] مبتنی بر

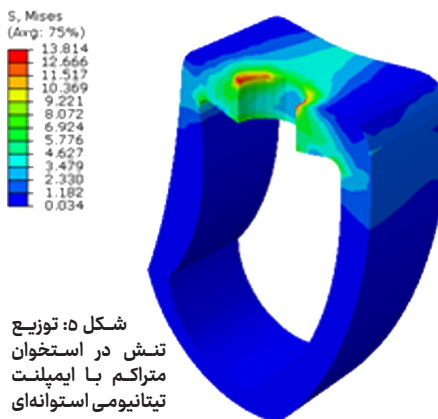
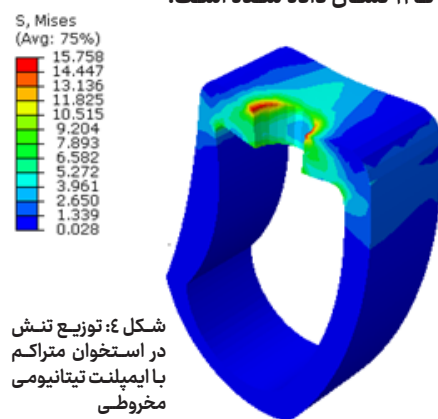


ردیف	ماده	مدول یانگی (MPa)	نسبت پواسون ν
۱	تیتانیوم	110000	0.3
۲	استخوان اسفنجی	950	0.3
۳	استخوان متراکم	13700	0.3

جدول ۲: مشخصات مکانیکی مواد

نتایج

پس از تحلیل تنش در دو مدل ایمپلنت مخروطی و استوانه‌ای، بیشینه تنش ون میزز در استخوان اسفنجی و استخوان متراکم برای ایمپلنت تیتانیومی و ایمپلنت با مواد هدفمند تابعی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۴ تا ۱۱ نشان داده شده است.



variation and pseudo periodontal ligament incorporation". Implantologist, ۱(۳), p. ۵۸. [۳] حسین زاده پوستی، محمد، اسدی، گیلاکجانی، حسن، ۱۴۰۰. "بررسی اثر تغییر زاویه رزوه‌های ایمپلنت بر میزان تنش و تراکم در نوسازی استخوان مندیولار"، بیست و نهمین همایش بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

[۴] نحوی نژاد، امیررضا، حسین‌زاده پوستی، محمد، ۱۴۰۰. "بررسی تأثیر کیفیت استخوان فک دندان و نوع بارگذاری بر میزان تنش‌های وارد بر سیستم ایمپلنت-استخوان"، بیست و هشتمین کنفرانس ملی و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی زیست پزشکی ایران دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

[۵] آبانگاه، سحر، ملاک‌زاده، محمدرضا، ۱۳۹۵. "بررسی تأثیر شکل و ابعاد دندانه در توزیع تنش ایمپلنت دندانی و بافت استخوانی مجاور در اثر بار استاتیکی"، اولین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مکانیک، مکترونیک و بیومکانیک، دانشگاه جامع علمی و کاربردی، تهران، ایران.

[۶] Gonzalez C.D., Propabilistic Finite Element of Analysis of the Uncemented Total Hip Replacement; PhD Thesis, University of Southampton, Southampton, ۲۰۰۹; England.

[۷] Chu C., Xue X., Zhu J., Yin Z., In Vivo Study on Biocompatibility and Bonding Strength of Ti/Ti₂N-vol.% HA/Ti₂N-vol.% HA Functionally Graded Biomaterial with Bone Tissues in the Rabbit; Material Science and Engineering A, ۲۴-۱۸; ۴۲۹; ۲۰۰۶.



استخوان متراکم
نمودار ۲: بیشینه تنش وارد بر استخوان متراکم

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تنش‌های ایجاد شده توسط ایمپلنت‌های استوانه‌ای و مخروطی بر استخوان فک می‌توان نتیجه گرفت که:

■ بیشینه تنش منتج از ایمپلنت مخروطی در استخوان اسفنجی از ایمپلنت استوانه‌ای کمتر است.

■ شکل فیکسچر نقش مهمی در تنش ایمپلنت و در نهایت پایداری ایمپلنت دارد.

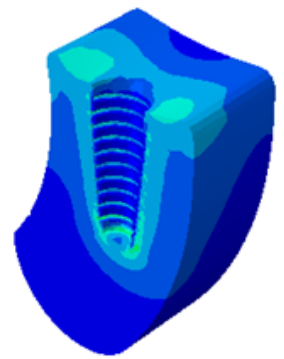
■ جنس ماده‌ی انتخابی و در نتیجه، خواص مکانیکی نقش به‌سزایی در تنش ایمپلنت دارد.

■ استفاده از ایمپلنت با مواد تابعی هدفمند با مدول الاستیسیته‌ی متغیر باعث کاهش تنش بیشینه در استخوان فک شده در نتیجه، ثبات و پایداری در ایمپلنت را افزایش می‌دهد.

مراجع:

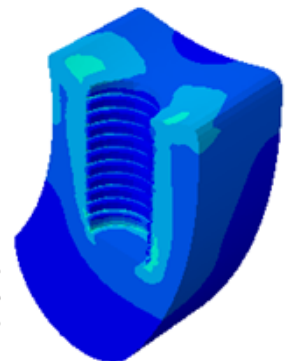
- [۱] Atmaram, G. and H. Mohammed, ۱۹۸۳. "Stress analysis of single-tooth implants. I. Effect of elastic parameters and geometry of implant". Implantologist, ۱(۳), p. ۲۴.
[۲] Atmaram, G. and H. Mohammed, ۱۹۸۳. "Stress analysis of single-tooth implants. II. Effect of implant root-length

S, Mises
(Avg: 75%)
3.566
3.271
2.977
2.682
2.388
2.093
1.799
1.504
1.209
0.915
0.620
0.326
0.031



شکل ۱۰: توزیع تنش در استخوان اسفنجی با ایمپلنت هدفمند مخروطی

S, Mises
(Avg: 75%)
3.653
3.350
3.048
2.745
2.443
2.141
1.838
1.536
1.233
0.931
0.628
0.326
0.023



شکل ۱۱: توزیع تنش در استخوان اسفنجی با ایمپلنت هدفمند استوانه‌ای



استخوان اسفنجی

نمودار ۱: بیشینه تنش وارد بر استخوان اسفنجی



پیشرفت خارق العاده ایران در صنعت دفاعی

ایران از همان ماه‌های اول پس از انقلاب اسلامی دچار تحریم‌های تسلیحاتی بود و برخلاف سایر تحریم‌ها که به مرور در این ۴ دهه علیه کشورمان اعمال شد، در حوزه تسلیحات نظامی از همان ابتدا تحریم بودیم و حتی در اوج حمله صدام به کشورمان نیز این تحریم ادامه داشت. سختی بیشتر آن جا بود که تا قبل از پیروزی انقلاب در حوزه تسلیحاتی وابستگی تقریباً صددرصدی به خارج کشور وجود داشت و هزاران مستشار غربی در کشورمان با هزینه این مردم ارتشی را فراهم ساختند که قرار بود ژاندارم منطقه شود. با این حال و در بزنگاه جنگ تحمیلی این مستشاران از کشور رفتند و ایران ماند و تسلیحاتی که حتی تعمیرشان را بلد نبود با این حال و در این ۴۴ سال ایران قبل از انقلاب که تنها قادر به تولید حدود ۳۰ خانواده از محصولات دفاعی بود امروز با رشدی عجیب و غریب به حدود ۸۰۰ خانواده رسیده است.



آرش نوربخش سعداباد، دکتری مکانیک، دانشگاه تبریز



این پیشرفت زمانی خارق العاده توصیف می‌شود که بدانیم در شرایط تحریم صددرصد و حتی ترور دانشمندی همچون شهید فخری زاده صورت گرفته و ایران امروز را در زمینه تولیدات دفاعی از موشک و سامانه‌های پدافند هوایی و پهپاد و تسلیحات سبک و سنگین گرفته تا ناوشک‌های چند هزار تنی و انواع جنگنده و زیردریایی به قدرت اول منطقه بدل کرده است. همین توان در تولید و استفاده از تسلیحات و تجهیزات رزمی باعث شده است تا جمهوری اسلامی ایران از سویی در تولید امنیت خود کاملاً بومی و درون زا باشد و از سوی دیگر به سطح بالایی از بازدارندگی دست یابد که بیش از سه دهه خیال خام تهاجم به ایران عزیز را از سردشمنان منطقه‌ای و فرمانطقه‌ای ما بیرون کرده است. به مناسبت چهل و چهارمین سالگرد فجر انقلاب اسلامی نگاهی داریم به دستاوردهای دفاعی انقلاب اسلامی که توانست با هزینه بسیار و جهادی عظیم معجزه‌ای را رقم بزند. گزارش پیش رو بخش کوچکی از این دستاوردهاست که سعی شده است به اجمال و در این روزهای پر خاطره تدوین شود.

این پیشرفت زمانی خارق العاده توصیف می‌شود که بدانیم در شرایط تحریم صددرصد و حتی ترور دانشمندی همچون شهید فخری زاده صورت گرفته و ایران امروز را در زمینه تولیدات دفاعی از موشک و سامانه‌های پدافند هوایی و پهپاد و تسلیحات سبک و سنگین گرفته تا ناوشک‌های چند هزار تنی و انواع جنگنده و زیردریایی به قدرت اول منطقه بدل کرده است. همین توان در تولید و استفاده از تسلیحات و تجهیزات رزمی باعث شده است تا جمهوری اسلامی ایران از سویی در تولید امنیت خود کاملاً بومی و درون زا باشد و از سوی دیگر به سطح بالایی از بازدارندگی دست یابد که بیش از سه دهه خیال خام تهاجم به ایران عزیز را از سردشمنان منطقه‌ای و فرمانطقه‌ای ما بیرون کرده است. به مناسبت چهل و چهارمین سالگرد فجر انقلاب اسلامی نگاهی داریم به دستاوردهای دفاعی انقلاب اسلامی که توانست با هزینه بسیار و جهادی عظیم معجزه‌ای را رقم بزند. گزارش پیش رو بخش کوچکی از این دستاوردهاست که سعی شده است به اجمال و در این روزهای پر خاطره تدوین شود.

خرمشهر؛ مهلک‌ترین موشک بالستیک

قطعا مهم‌ترین و راهبردی‌ترین حوزه پیشرفت تسلیحاتی ایران که توانسته سطح بالایی از بازدارندگی را به کشور بدهد، حوزه موشکی است. در حالی که پیش از انقلاب، غربی‌ها به ایران اجازه نمی‌دادند موشک بیش از برد ۱۰۰

این مهلک‌ترین موشک بالستیک ایران، در زمان رونمایی از سوی نشریه آمریکایی نیوزویک به عنوان یک «سیلی» به گوش ترامپ و نتانیاهو مطرح شد. دانشه‌های موشکی ایران تنها به موشک‌های بالستیک منحصر نشده و براساس یک اصل راهبردی کشورمان در صنعت دفاعی توانسته است طیف متنوعی از راکت‌ها و موشک‌های کروز را نیز تولید کند که شاید بتوان گفت گل سرسبد موشک‌های کروز ساخته شده در ایران «هویزه» نام دارد. امسال نیز از موشک صیاد ۴B رونمایی شد. موشکی با برد ۳۰۰ کیلومتر که برد انهدام سامانه باور ۳۷۳ را که تا پیش از این روی عدد ۱۵۲ بود به فراتر از ۳۰۰ کیلومتر ارتقا داد.

موشک‌های پرسونیک بالستیک

دوماه قبل بود که سردار امیرعلی حاجی‌زاده فرمانده هوافضای سپاه پاسداران خبر مهمی را اعلام کرد و از ساخت موشک هایپرسونیک بالستیک توسط ایران خبر داد. به گفته فرمانده هوافضای سپاه، این سامانه سرعت بسیار بالایی دارد و دارای قابلیت مانورپذیری در جو و بیرون جو است. سردار حاجی‌زاده یک روز پس از اعلام خبر ساخت موشک، از رونمایی موشک بالستیک هایپرسونیک این نیرو در آینده خبر داد. موشک‌های هایپرسونیک نسلی از موشک‌هاست که سرعتی بیش از ۵ برابر سرعت صوت دارند و به دلیل همین سرعت بالا، رهگیری‌شان با سامانه‌های پدافندی رایج تقریباً غیرممکن است. به غیر از روسیه، چین و آمریکا که در مراحل پیشرفته توسعه موشک‌های هایپرسونیک خود قرار دارند، کره شمالی، استرالیا و هند هم از ساخت یا خرید موشک هایپرسونیک گفته‌اند و حالا ایران هم با تولید موشک بالستیک هایپرسونیک به جمع معدود کشورهای جهان که دارای این فناوری پیشرفته نظامی هستند، پیوسته است.

پهپاد همچون سایه‌ای بر سر دشمن

علاوه بر موشک، موضوع پهپاد (پرنده هدایت پذیر از راه دور) از دیگر تولیدات جذاب و بسیار مهم صنعت دفاعی کشورمان در سال‌های پس از انقلاب اسلامی به شمار می‌رود. تجهیزاتی مهم و راهبردی که امروز در هراتش مدرنی جزو واجبات بوده و به مدد تلاش متخصصان دفاعی کشورمان می‌توانیم ادعا کنیم جزو ۳ کشور سازنده پهپادهای رزمی و شناسایی در دنیا هستیم. هفتم خرداد امسال بود که سرلشکر محمد باقری رئیس ستاد کل نیروهای مسلح از یکی از پایگاه‌های سری و زیرزمینی پهپادی ارتش جمهوری اسلامی ایران به نام پایگاه راهبردی پهپادی ۳۱۳ ارتش، بازدید کرد. با عملیاتی شدن این پایگاه سری که در عمق صدها متری زمین طراحی و ساخته شده جمهوری اسلامی ایران به قدرت برتر پهپادی در منطقه تبدیل شده است. همچنین در این بازدید دو دستاورد جدید برای نخستین بار به نمایش درآمد؛ نخستین دستاورد موشک کروز حیدر-۱ است که قابل حمل توسط پهپاد کمان-۲۲ نهاجا و فطرس معرفی شده است. این موشک ۲۰۰ کیلومتر برد دارد و سرعت آن در لحظه اصابت به هدف، هزار کیلومتر بر ساعت است. حیدر-۱ اولین موشک کروزی است که قابلیت شلیک از پهپاد را دارد. دومین دستاورد، پهپاد کروز حیدر-۲ است که یک پهپاد محمول بر بالگرد است. پیشرفت‌های خیره‌کننده جمهوری اسلامی ایران در زمینه ساخت انواع پهپاد به ویژه در حوزه دفاعی و نظامی، به خصوص در سال‌های اخیر، توجه جهان را به خود جلب کرده است. ۱۳ آذر ۱۳۹۰ ایران یک فروند هواپیمای بدون سرنشین جاسوسی فوق پیشرفته و رادار گریز آمریکا از نوع لاکهید مارتین آر کیو ۱۷۰ را که در شرق کشور در حال جاسوسی بود، تحت کنترل خود درآورد و آن را به زمین نشانند و اقدام به مهندسی معکوس روی آن کرد.

آسمانی امن باید افندی همیشه بیدار

اما مگر می‌شود کشوری بزرگ، با موقعیتی مهم و در یک منطقه حساس، در زمینه پدافند هوایی قدرتمند نباشد؟ شاید بزرگ‌ترین نقطه ضعف ما در دوران جنگ تحمیلی همین پدافند هوایی بود. امروز ایران جزو معدود کشورها در جهان است که با اتکا به توانمندی‌های داخلی پیشرفته‌ترین سامانه‌های دفاعی ضد موشکی را تولید کرده؛ سامانه‌هایی که به عنوان سپر دفاعی کشور دشمنان را از هرگونه تجاوز احتمالی پشیمان خواهد کرد. شاهکار این سامانه‌ها، باور ۳۷۳ نام دارد که از نمونه روسی اس ۳۰۰ ساخته شده، اما بسیار پیشرفته‌تر است و کار حراست از مهم‌ترین نقاط کشور از جمله برخی سایت‌های هسته‌ای را برعهده دارد. اس ۳۰۰ سامانه پدافندی پیشرفته روسی است که قرار بود در سال ۲۰۰۸ به ایران داده شود، اما تحریم‌های شورای امنیت و بدقولی روس‌ها این موضوع را به تعویق انداخت تا ایران خود به فکر ساخت پدافند بومی در سطح اس ۳۰۰ بیفتد. کشورمان طراحی و ساخت باور ۳۷۳ را با این شرایط شروع کرد و حتی زمانی که در سال ۹۶، چند گردان از سامانه اس ۳۰۰ از سوی روسیه به ایران داده شد باز هم کار ساخت باور ۳۷۳ را متوقف نکرد تا این که سال ۱۳۹۹ و با حضور رئیس‌جمهور وقت از این سامانه رونمایی شد. «باور ۳۷۳» را باید پیچیده‌ترین و مهم‌ترین سامانه پدافند هوایی موشکی ساخت داخل و حتی پیچیده‌ترین پروژه دفاعی تاریخ ایران به شمار آورد که کار طراحی، ساخت، تست و عملیاتی شدن آن در کمتر از یک دهه به دست متخصصان ایرانی در داخل کشور انجام شده است، اما ویژگی‌های این شاهکار صنعت دفاعی کشور که می‌تواند همچون گنبدی آهنین در کنار دیگر سامانه‌های بومی و غیر بومی پدافندی ایران به دفاع از حریم ایران بپردازد، چیست؟



به گزارش پایگاه اطلاع رسانی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، در سامانه سلاح باور ۳۷۳، دو رادار جست و جوگر و رهگیر وجود دارد که حداکثر برد رادار جست و جو و کشف بر اساس اطلاعات اعلام شده ۳۲۰ کیلومتر و حداکثر برد رادار رهگیری ۲۶۰ کیلومتر خواهد بود. رادار جست و جو و کشف سامانه باور ۳۷۳ قادر است ۳۰۰ هدف را به طور همزمان شناسایی کند؛ از سویی رادار رهگیر این سامانه نیز قادر به رهگیری ۶۰ هدف به طور همزمان است. از جمله ویژگی‌های بارز رادار رهگیر باور ۳۷۳، قابلیت کشف اهداف پنهان کار با سطح مقطع راداری بسیار کم است که با این توانایی، عملاً هدف پنهان کاری برای این سامانه وجود نخواهد داشت. از دیگر سامانه‌های مهم در پدافند هوایی کشور می‌توان به سامانه بومی سوم خرداد اشاره کرد که با انهدام پهپاد پیشرفته گلوبال هاوک آمریکایی در سال ۱۳۹۸ درخشید.

بزرگ‌ترین ناوگان بالگردی غرب آسیا

جمهوری اسلامی ایران با در اختیار داشتن بزرگ‌ترین صنایع بالگردی در منطقه، یکی از کشورهای پیشرو در عرصه طراحی و ساخت بالگردهای نظامی و تجاری است. ایران از سال ۱۳۷۶ و با ساخت بالگرد «شباویز» که نمونه‌ای مهندسی معکوس شده از بالگرد «بیل-۲۰۵» بود، به جرگه کشورهای سازنده بالگرد پیوست. پس از بالگرد شباویز، خانواده بالگردهای شاهد در سه مدل «شاهد-۲۷۴» و «شاهد-۲۷۸» و «شاهد-۲۸۵» تولید شد که برای نخستین بار در این خانواده، روند طراحی و ساخت کاملاً بومی صورت گرفت.

پیش‌تاز در ساخت تانک و ادوات زرهی

در جنگ‌های امروزی ادوات زرهی مثل تانک و نفربرها نقش زیادی در پیشبرد جنگ و همچنین حفظ جان سربازان دارد، از این رو کشورها سرمایه‌گذاری زیادی روی تانک‌ها و زره پوش‌ها می‌کنند. بر اساس آخرین آمار سایت گلوبال فایر پاور که سایت معتبری درباره تعداد و نوع تسلیحات در کشورهای مختلف است تعداد مجموع تانک‌ها و نفربرها و زره پوش‌های ایران ۲۹۳۱ عدد است. طبق این آمار، ایران در رتبه ۱۳ رده بندی کشورهای دارای بیشترین تانک قرار دارد. متخصصان کشورمان علاوه بر بهینه سازی تانک‌های خارجی که در نیروهای مسلح کشورمان به کار گرفته می‌شوند سعی کردند وارد حوزه ساخت تانک نیز بشوند. اولین و معروف‌ترین نمونه درخوردگر در این زمینه تانک ذوالفقار است، اما نسل جدید تانک‌های ایرانی کرار نام دارد. تانک کرار بهترین تانک ایران است که ۲۲ اسفند ۱۳۹۵ رونمایی و همزمان خط تولید انبوه در صنایع زرهی بنی هاشم درود در استان لرستان افتتاح شد. این تانک در مدت سه سال توسط متخصصان سازمان صنایع دفاعی ایران طراحی و ساخته شده است. تانک کرار از موتوری جدید با ساختار بهینه شده استفاده می‌کند که توانی بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ اسب بخار از آن انتظار می‌رود. سامانه کنترل آتش الکترواپتیکی، سامانه فاصله یاب لیزری، رایانه بالستیک و قابلیت شلیک به اهداف ثابت و متحرک در شب و روز، قابلیت شلیک موشک و هدایت لیزری بسیار دقیق و امکان شلیک توپچی و فرمانده از دو سایت موازی از ویژگی‌های تانک کرار است.

جولان شناورهای بومی در آب‌های جهان

یکی از پیچیده‌ترین بخش‌های صنعت دفاعی به شناورهای آبی ارتباط دارد. در این حوزه نیز عملکرد صنایع دفاعی ایران چشمگیر و درخشان بوده، از ناوچه‌ها و ناوشکن‌های کوچک و بزرگ گرفته تا زیردریایی‌های سبک و نیمه سنگین که اوج فناوری را در دستان هوشمند ایرانی به نمایش می‌گذارد. ناوشکن جماران نخستین ناوشکن ساخت ایران است که با دانش کامل ایرانی ساخته و در ۱۳۸۸ خورشیدی تحویل نیروی دریایی ارتش شده است. در جماران از پیشرفته‌ترین نمونه‌های راداری، سامانه‌های پدافندی و موشکی از جمله موشک‌های سطح به هوا و اژدرانداز استفاده شده بود. همچنین جماران نخستین ناوشکن ایرانی است که به باند فرود بالگرد مجهز شد. پس از جماران دومین ناوشکن کلاس موج به صورت کاملاً مشابه با جماران ساخته شد و دماوند نام گرفت. این ناوشکن متأسفانه بر اثر یک حادثه دریایی در بندر انزلی غرق شد. سهند و دنا نمونه‌های دیگر این کلاس بودند که در سال‌های اخیر ساخته شده‌اند و هم اکنون چند فروند دیگر هم در حال ساخت هستند. همچنین سال ۱۴۰۰ نیروی دریایی جمهوری اسلامی ایران توانست برای اولین بار در تاریخ نیروی دریایی کشورمان یک ناوگروه با حضور ناوشکن سهند و ناوبندر مکران به اقیانوس اطلس اعزام کند و هم اکنون ناوگروه دیگری از ایران در حال پیمایش دور دنیاست.

تصمیم برای ساخت زیردریایی در ایران، به اوایل دوران جنگ تحمیلی رژیم بعث عراق علیه ایران بازمی‌گردد. زیردریایی غدیر بر اساس یک طرح خارجی در خط تولید قرار گرفته و تعداد زیادی از آن به خدمت ارتش درآمد. در ادامه، متخصصان کشورمان برای رفع نیازهای بالاتر از دفاع ساحلی، طراحی زیردریایی بومی فاتح را در دستور کار قرار دادند. زیرسطحی ۵۲۷ تنی فاتح به عنوان یک زیردریایی نیمه سنگین تلقی می‌شود. این زیردریایی از نظر مشخصات عملیاتی بسیار برتر از غدیر است و توانایی حرکت در عمق ۲۰۰ متر را به صورت عادی دارد و می‌تواند به مدت ۳۵ روز دریاوردی کند. در ساخت زیردریایی فاتح بیش از ۴۱۲ هزار قطعه با دستیابی و بومی سازی ۷۶ عنوان فناوری روز دنیا به کار رفته است. شناور «شهید سلیمانی» عضو جدید نیروی دریایی سپاه پاسداران محسوب می‌شود که مجهز به نخستین سامانه پرتاب ترکیبی موشک‌های برد کوتاه و متوسط سطح به سطح است.



کنترل فازی ربات موازی PRS ۳ به منظور تعقیب مسیر در حضور اغتشاش اولیه

اویس غلامی^۱، حامی تورجی زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری دینامیک کنترل ارتعاشات دانشگاه گیلان
۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

چکیده

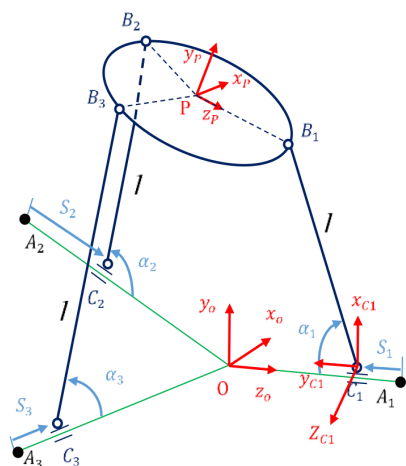
در این پژوهش، سینماتیک و دینامیک یک ربات موازی از نوع PRS ۳ مورد بررسی قرار گرفت. و با استفاده از منطق فازی برای آن کنترلر طراحی گردید. این کنترلر توانایی دفع اغتشاشات ناخواسته را برای دنبال کردن یک مسیر دلخواه دارد. این ربات، نوعی مکانیزم موازی فضایی با شش درجه آزادی است؛ که به وسیله سه مفصل لغزنده فعال و سه مفصل دورانی غیرفعال کنترل می‌شود؛ و در گروه مکانیزم‌های مقید طبقه بندی شده است. تحلیل سینماتیک ربات با استفاده از ماتریس‌های انتقال همگن و ماتریس ژاکوبین مربوطه انجام شد. در نتیجه، روابط موقعیت و سرعت بین فضای کاری و فضای مفاصل ربات، در هر دو مسیر مستقیم و معکوس استخراج شد؛ و مسیرهای متفاوت رسیدن به نقطه مقصد در پلتفرم تعیین گردید. معادلات دینامیکی حاکم بر مساله، به روش لاگرانژ، در فضای مفاصل و با در نظر گرفتن ضرایب لاگرانژ استخراج گردید. و در نهایت، به حذف این ضرایب با استفاده از ماتریس پوچی پرداخته شد. در نتیجه، حل سینتیک مستقیم و معکوس مکانیزم به دست آمد. در نهایت، با استفاده از منطق فازی برای آن کنترلر طراحی گردید. تمام مدل سازی ها با کمک نرم افزار MATLAB شبیه سازی گردید. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که، با استفاده از مدل ریاضی و کنترلر یاد شده، به سادگی می‌توان هر مسیر دلخواهی را در فضای کاری طی کرد؛ و این کنترلر توانایی دفع اغتشاشات محیطی را خواهد داشت.

کلمات کلیدی:

ربات موازی PRS ۳، مدل سازی، کنترل فازی.

۱- مقدمه

مکانیزم‌های موازی به دلیل سرعت، استحکام، دقت و قابلیت بارگذاری بالا، در پژوهش‌های گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته-اند. یکی از مکانیزم‌هایی که می‌توان آن را به نوعی مکانیزم استوارت [۱] شبیه دانست، مکانیزمی است با سه درجه آزادی و نام PRS ۳، که در این پژوهش بررسی می‌شود. مکانیزم PRS ۳ به دلیل وجود مفاصل لغزنده در راستای افقی، نسبت به مکانیزم استوارت از آزادی بیشتری برای حرکت در صفحه برخوردار است. صفحه متحرک این ربات با سه لینک به مفاصل لغزنده متصل بوده و مشکل تعدد لینک‌های مکانیزم استوارت (۶ لینک) را ندارد. آزادی عملکرد و دقت بالای مکانیزم PRS ۳ آن را برای کاربردهایی در ابعاد میکرو مناسب کرده است [۲]. از دیگر مصارف این ربات، می‌توان به کاربرد در سیستم تعلیق خودرو اشاره کرد [۳]. در سال ۲۰۰۵ لی و چو [۴] حل معادلات سینماتیک مکانیزم PRS ۳ را در مسیر معکوس، به روش دقیق و در مسیر مستقیم، به روش عددی یافتند. سپس معادلات دینامیک آن را به روش لاگرانژ و اصل کار مجازی، هر دو در مسیر معکوس، بررسی کردند. از کاستی‌های پژوهش یاد شده می‌توان به حل عددی سینماتیک مکانیزم در مسیر مستقیم اشاره کرد. در سال ۲۰۱۰ تی سای و یوان [۵] تحلیل دینامیک معکوس مکانیزم PRS ۳ را به روش تجزیه نیروهای عکس العملی وارد بر مفاصل انجام داده و آن را در مسیر کاری دایروی شبیه سازی کردند؛ و در سال ۲۰۱۱، [۶] حل دینامیک مستقیم آن را به روش یاد شده انجام داده و به کنترل آن پرداختند. سپس در سال ۲۰۱۴، [۷] دینامیک مستقیم آن را با روش یاد شده و لحاظ کردن نیروی اصطکاک محاسبه کردند. در سال ۲۰۱۲ لی و استایکو [۸] مکانیزم PRC ۳ را که شباهت بسیاری به PRS ۳ دارد، بررسی کردند. آنان پس از مدلسازی سینماتیک ربات به استخراج معادلات حرکت با استفاده از روش لاگرانژ و صحه گذاری بر آن از روش کار مجازی پرداختند؛ و در نهایت دینامیک معکوس آن را حل کردند. از کاستی‌های این نوشتار، می‌توان به عدم بررسی دینامیک مستقیم ربات اشاره کرد. در سال ۲۰۱۵ آلتوزارا و همکاران [۹] دینامیک معکوس مکانیزم PRS ۳ را به روش بولتزمن-هامل تحلیل کرده‌اند.



شکل ۱ شماتیک مکانیزم

که در آن e (فاصله بین محورهای z قدیم و z جدید در راستای محور x جدید)، β (زاویه بین محورهای z قدیم و z جدید حول محور x جدید)، d (فاصله عمودی بین مبدا دستگاه قدیم و فصل مشترک x قدیم و z قدیم) در راستای محور z قدیم، Θ (زاویه بین محورهای x قدیم و x جدید حول محور z قدیم) است. ماتریس انتقال همگن^۲ بر حسب پارامترهای جدول ۱ به صورت زیر است:

$$H_{C_1}^O = R_{z,\Theta} T_{z,d} T_{x,e} R_{x,\beta} \quad (۲)$$

که در آن $R_{z,\Theta}$ دوران حول محور z به اندازه Θ و $T_{z,d}$ انتقال در راستای محور z و به اندازه d است. جدول پارامترهای دنات هاتنبرگ در دو لینک دیگر نیز مانند لینک اول است؛ با این تفاوت که یک دوران اضافی حول محور y دارند.

$$\begin{cases} H_{C_2}^O = R_{y,-\frac{2\pi}{3}} R_{z,\Theta} T_{z,d} T_{x,e} R_{x,\beta} \\ H_{C_3}^O = R_{y,-\frac{2\pi}{3}} R_{z,\Theta} T_{z,d} T_{x,e} R_{x,\beta} \end{cases} \quad (۳)$$

مختصات نقطه B_i در دستگاه محلی متصل به مفصل C_i برابر است با:

$$B_i^{C_i} = \begin{bmatrix} l \sin \alpha_i \\ l \cos \alpha_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

که در آن l طول هر لینک و α_i زاویه لینک متصل به مفصل C_i با ریل حامل آن است. مختصات نقطه B_i در دستگاه مرجع متصل به نقطه O به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} B_i^O \\ 1 \end{bmatrix}_{(s_i, \alpha_i)} = H_{C_i}^O \begin{bmatrix} B_i^{C_i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (۵)$$

زوایای دوران صفحه متحرک حول محورهای مختصات دستگاه مرجع متصل به نقطه O به صورت یاء، پیچ و رول در نظر گرفته شده که ماتریس دوران نهایی به صورت زیر خواهد بود:

$$R_{\phi, \theta, \psi} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & -s\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi & c\phi s\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi \\ s\phi c\theta & c\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi & -c\phi s\theta s\psi & s\phi s\theta c\psi & -c\phi s\theta c\psi \\ -s\theta & c\theta & c\theta s\psi & -c\theta c\psi & s\theta s\psi & s\theta c\psi \end{bmatrix} \quad (۶)$$

با مشخص بودن مختصات نقطه $p = [x \ y \ z]^T$ داریم:

$$\begin{bmatrix} B_1^O & B_2^O & B_3^O \end{bmatrix}_{(x,y,z,\psi,\theta,\phi)} = p \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} + R_{\phi, \theta, \psi} \begin{bmatrix} 0 & \frac{b\sqrt{3}}{2} & -\frac{b\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ b & -b & -b \end{bmatrix} \quad (۷)$$

در نهایت، قیدهای سینماتیکی ربات، برای استفاده در مدل‌سازی دینامیک سیستم، از برابری روابط ۵ و ۷ به صورت زیر حاصل شد:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1^O \\ B_2^O \\ B_3^O \end{bmatrix}_{(x,y,z,\psi,\theta,\phi)} - \begin{bmatrix} B_1^O \\ B_2^O \\ B_3^O \end{bmatrix}_{(s_i, \alpha_i)} = 0 \quad (۸)$$

در سال ۲۰۱۶ رویز و همکاران [۱۰] به بررسی ربات ۳ PRS پرداختند؛ و یک روش برای طراحی سینماتیک آن ارائه کردند. آنان تمام شبیه سازی‌ها را براساس فرض کوچک بودن جابجایی‌ها انجام دادند. در این حالت می‌توان بسیاری از عوامل غیرخطی را ساده‌سازی کرد. پس از آن به طراحی براساس روش اجزای محدود پرداختند. در نهایت با صحنه گذاری آزمایشگاهی بر طراحی‌های انجام شده، درستی محاسبات خود را نشان دادند. پژوهشگران یاد شده، در سال ۲۰۱۷ تحلیل دینامیک آن را به روش بولتزمن-هامل انجام داده و به صحنه گذاری آزمایشگاهی بر آن پرداختند [۲]. آنان هدف از این پژوهش را دست یافتن به یک ابزار پنج درجه آزادی (سه درجه آزادی ربات و دو درجه آزادی برای تکیه‌گاه آن) برای جابجایی‌هایی با دقت یک میکرومتر بیان کردند. از کاستی‌های پژوهش آنان می‌توان به عدم بررسی دینامیک مستقیم ربات نام برد. آنان با به دست آوردن قید های میان مختصه های عمومی، سینماتیک را مدل‌سازی کرده اند؛ و بحثی پیرامون محاسبه پارامتری این مختصه ها، بر حسب یکدیگر در مسیر مستقیم و معکوس انجام ندادند. پس از آن، استایکو، مکانیزم ۳ PRS را مورد بررسی قرار داد [۱۱]. وی، به استخراج معادلات حرکت، با استفاده از روش لاگرانژ پرداخت؛ و آن را، در شکل ماتریسی بیان کرد. سپس، به صحنه گذاری بر آن، از روش کار مجازی، پرداخت. او، پاسخ دینامیک معکوس مکانیزم را یافت؛ و توان مورد نیاز برای هر عملگر فعال ربات را محاسبه کرد. سپس، لی و همکاران، به تحلیل ابعادی مکانیزم ۳ PRS، با بررسی ابعاد همگن ماتریس ژاکوبین تحلیلی، پرداختند [۱۲]. آنها، با بررسی سینماتیک، روشی برای طراحی بهینه‌ی ابعاد ربات، پیشنهاد کردند. اساس روش آنها، مبتنی بر تحلیل حساسیت سیستم، و معرفی یک شاخص بهینه سازی است.

نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و نظری بیانگر این واقعیت است که برای کنترل حرکت سیستم‌هایی که دارای دینامیک حرکتی پیچیده یا غیرخطی می‌باشند؛ استفاده از کنترلرهای فازی ابزار قدرتمندی [۱۳] هستند. علاوه بر این استفاده از این نوع کنترلرهای-تواند مقاومت سیستم در برابر تغییرات شرایط محیطی را نیز افزایش دهد [۱۴]. کنترل کننده فازی پیشنهادی با غلبه بر اغتشاشات به ردگیری مسیر دلخواه مد نظر پرداخته و سعی در قرار دادن عملگرها در آن مسیر دارد. در این راستا، کنترل فازی یک ربات موازی صفحه‌ای در مرجع [۱۵] انجام شد. نتایج حرکت این ربات بیانگر کنترل بسیار خوب ربات و سرعت حرکت قابل قبول آن می‌باشد.

در این پژوهش، تحلیل سینماتیک و دینامیک مکانیزم یاد شده انجام شد؛ و معادلات حرکت ربات از روش لاگرانژ به دست آمد. در نهایت، کنترل ربات بدون استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و تنها با استفاده از منطق فازی انجام شد. برای این منظور یک کنترلر فازی بر پایه روش تاکاگی-سوگنو طراحی گردید. با استفاده از مدل به دست آمده و کنترلر طراحی شده برای این ربات موازی، در فضای کاری هر مسیر دلخواه می‌توان به سادگی طی کرد؛ حتی اگر خطای اولیه ای در قرارگیری و حدس مکان عملگرها وجود داشته باشد.

در این نوشتار، ابتدا در بخش سینماتیک، روابط موقعیت مکانیزم در مسیر های مستقیم و معکوس استخراج شد. سپس در بخش دینامیک، با استفاده از رابطه لاگرانژ، معادلات دینامیکی ربات به دست آمد و پس از حذف ضرایب لاگرانژ، در شکل فضای حالت مدل گردید. پس از آن در بخش کنترل، کنترلر فازی بر پایه استلزام تاکاگی-سوگنو طراحی شد. در نهایت تمامی معادلات به دست آمده در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و کنترل گردید.

۲- مدل‌سازی سینماتیک

نقطه O مبدا مختصات مرجع و نقاط A_i به عنوان ابتدای ریل حرکت مفاصل لغزنده در نظر گرفته شد.

$$O = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} a\sqrt{3} \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} -a\sqrt{3} \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن a طول ریل مفاصل لغزنده است. برای انتخاب دستگاه های مختصات از روش دنات-هاتنبرگ^۱ استفاده شد و جدول پارامترهای معرف لینک ها مطابق مرجع [۱۶] استخراج گردید:

جدول ۱ پارامترهای معرف لینک‌ها				
لینک	Θ	d	β	e
OC1	90	$a - s_1$	-90	0

۳- مدل سازی دینامیک

صفحه متحرک ربات به شکل دایره است؛ و می توان تمام جرم آن در مرکز جرم فرض کرد. برای مدل سازی دینامیک سیستم از $[x, y, z, \psi, \theta, \phi, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, S_1, S_2, S_3]^T$ به عنوان دوازده مختصه تعمیم یافته استفاده شد. انرژی جنبشی مکانیزم مطابق مرجع [۱۷] برابر است با:

$$\begin{cases} T_p = \frac{1}{2}(\omega_p^T I_p \omega_p + M V_p^T V_p) \\ T_l = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (\omega_i^T I_{li} \omega_i + m V_i^T V_i) \end{cases}, T = T_p + T_l \quad (9)$$

T_p, M جرم و انرژی صفحه متحرک، T_l, m جرم و انرژی لینک ها است. I_p ممان اینرسی صفحه متحرک و I_{li} ممان اینرسی لینک i ام و هر دو نسبت به مختصات مرجع است. ممان اینرسی هر لینک در دستگاه $(xyz)_{li}$ نوشته شد؛ و برای انتقال آن به دستگاه مرجع از ماتریس دوران این دو دستگاه نسبت به هم کمک گرفته شد. همچنین ممان اینرسی صفحه متحرک نسبت به دستگاه $(xyz)_p$ نوشته شده و به دستگاه مرجع برده شد. محاسبه I_p و I_{li} می توان نوشت:

$$\begin{cases} I_p = \frac{1}{2} M b^2 R_{\phi, \theta, \psi} \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} R_{\phi, \theta, \psi}^T \\ I_{li} = \frac{1}{3} m l^2 R_{li}^o \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{li}^{oT} \end{cases} \quad (10)$$

تمامی سرعت ها در دستگاه مختصات مرجع نوشته شد:

$$\begin{cases} \omega_p = \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, v_p = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \\ \omega_i = R_{ci}^o \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{\alpha}_i \end{bmatrix}, v_i = \dot{S}_i \frac{\vec{A_i O}}{|A_i O|} \end{cases} \quad (11)$$

انرژی پتانسیل مکانیزم برابر است با:

$$U = Mgy + mg \sum_{i=1}^3 \frac{l}{2} \sin(\alpha_i) \quad (12)$$

گشتاب گرانش زمین است. معادلات حرکت لاگرانژ برابر است با:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_{k=1}^9 \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial q_i} = Q_i \\ L = T - U \\ q = [x; y; z; \psi; \theta; \phi; \alpha_1; \alpha_2; \alpha_3; S_1; S_2; S_3] \\ Q = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; F_1; F_2; F_3] \end{cases} \quad (13)$$

که در آن، Q بیانگر نیروهای تعمیم یافته است. در این پژوهش از نیروی اصطکاک کولمب صرف نظر شد. f_k روابط میان قیود است از معادله ۸ به دست آمد.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_j + \frac{\partial}{\partial q_j} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_j \\ \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = m_{ji}, \quad \frac{\partial}{\partial q_j} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = c_{ji} \\ \frac{\partial L}{\partial q_i} = g_i, \quad \frac{\partial f_k}{\partial q_i} = a_{ki} \end{cases} \quad (14)$$

در نهایت، معادله حرکت برابر خواهد بود با:

$$M \ddot{q} + C \dot{q} - G + A^T \lambda = Q \quad (15)$$

که در آن M ماتریس اینرسی، C ماتریس کوریولیس، G ماتریس گرانش، A ماتریس وزنی ضرایب لاگرانژ و Q بردار نیروهای تعمیم یافته است. برای حذف ضرایب لاگرانژ از معادله حرکت، ماتریس پوچی A از تعریف زیر حاصل شد [۱۸]:

$$\begin{cases} AS = 0, \\ \dot{v} = [\dot{S}_1; \dot{S}_2; \dot{S}_3], \\ \dot{q} = S \dot{v}, \\ \ddot{q} = \dot{S} \dot{v} + S \ddot{v}. \end{cases} \quad (16)$$

Defuzzification*

که در آن S ماتریس پوچی است. با ضرب کردن از سمت چپ S^T در معادله ۱۵ و جاگذاری مشتقات q از رابطه ۱۶ خواهیم داشت:

$$S^T M S \ddot{v} + S^T M \dot{S} \dot{v} + S^T C S \dot{v} - S^T G = S^T Q \quad (17)$$

که در آن $S^T Q = \vec{F} = [F_1; F_2; F_3]$ است. برای محاسبه مشتق ماتریس پوچی می توان نوشت:

$$\begin{cases} AS = 0 \rightarrow \dot{AS} + A\dot{S} = 0 \rightarrow \dot{S} = -A^{-1}\dot{AS} \\ A^{-1} = A^T(AA^T)^{-1} \end{cases} \quad (18)$$

با انتخاب $\vec{X}_{6 \times 1} = [S_1, S_2, S_3, v^T]^T$ به عنوان متغیرهای فضای حالت، صورت فضای حالت سیستم برابر است با:

$$\begin{cases} \dot{\vec{X}} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T M S)^{-1} \end{bmatrix} \vec{F}, \\ h = (S^T M S)^{-1} S^T (G - C S \dot{v} - M \dot{S} \dot{v}). \end{cases} \quad (19)$$

۴- طراحی کنترلر

کنترلرهای فازی در کنترل حرکت ربات های متحرک و نیز انجام مانورهای خاص درازای بازدهی و عملکرد قابل قبولی می باشند. یکی از روشهای طراحی کنترلر فازی، تجزیه رفتارهای پیچیده سیستم به چند حرکت در محدوده حرکتی ربات است. پس از طراحی الگوریتم کنترلی مناسب برای هربخش، اقدامات متناظر آنها را می توان با هم ترکیب نمود. در این مقاله کنترلر فازی به گونه ای طراحی می شود که بتواند با تعیین نیروی کنترلی مناسب، مسیر مد نظر را به خوبی ردگیری کند و از مقاومت خوبی نسبت به اغتشاشات اولیه برخوردار باشد. این کنترلر براساس قوانین اگر-آنگاه به فرم ذیل طراحی می گردد:

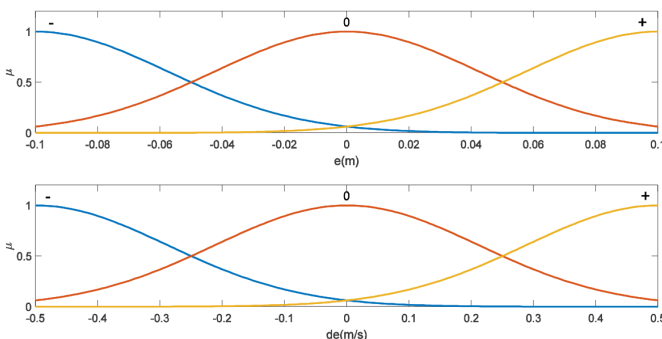
$$\text{If } S_i \text{ is A and } \dot{S}_i \text{ is B, then } u_i \text{ is C} \quad (20)$$

عملگرهای and و or به صورت زیر تعریف می شوند:

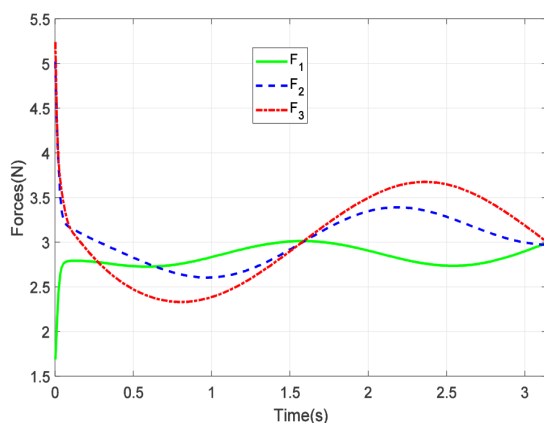
$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (21)$$

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (22)$$

در کنترلر پیشنهادی از منطق فازی تاکاگی - سوگنو همراه با روش فازی زدایی ۳ مرکز ثقل استفاده شد. در مرحله اول، کنترلر فازی پس از دریافت ورودی ها، فرایند فازی سازی را انجام می دهد، سپس براساس رابطه ۲۱ و استلزام تاکاگی-سوگنو با استفاده از عملگر فازی توابع عضویت ترکیب می گردد. در مرحله بعد، مقادیر توابع عضویت براساس رابطه ۲۲ با عملگر اجتماع ترکیب و خروجی ها فازی زدایی می شوند. ورودی سیستم فازی به صورت خطا و مشتق خطا از مقدار دلخواه در زمان معین انتخاب شد. توابع عضویت این ورودی ها به صورت توابعی گاوسی در نظر گرفته شد. خطای موقعیت و سرعت ربات به صورت سه تابع $[-0.5, 0.5]$ انتخاب گردید؛ که در آن، بازه ی تغییرات خطای موقعیت $[0.1, -0.1]$ و بازه تغییرات خطای سرعت $[0.5, -0.5]$ انتخاب شد. برای خروجی سیستم فازی که همان نیروی کنترلی مورد نیاز برای حرکت ربات در مسیر تعیین شده است، مطابق روش تاکاگی-سوگنو توابع ثابتی به صورت $[-4, -2, 0, 2, 4] = [-0.5, 0, 0.5]$ انتخاب گردید. نمایش توابع عضویت برای ورودی های سیستم فازی در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲ توابع عضویت ورودی سیستم فازی



شکل ۴ نیروی کنترلی اعمال شده توسط کنترلر فازی

همانطور که مشخص است، دامنه ی نیروی کنترلی در ابتدای مسیر بیشتر از سایر نقاط است. این امر به دلیل وجود اغتشاش اولیه است که به انحراف لغزنده ها از مسیر دلخواه منجر شده است. کنترلر فازی با اعمال نیروی بیشتر در ابتدای مسیر سعی در رساندن موقعیت و سرعت لغزنده ها به مقدار دلخواه دارد؛ نیروی کنترلی پس از زمان تقریبی ۰/۵ ثانیه به صورت یکنواخت و هموار اعمال شده است. همانطور که قبلا گفته شد، کنترلر طراحی شده در زمان ۰/۵ ثانیه با موفقیت اغتشاش اولیه را برطرف نموده است.

۶- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، تحلیل سینماتیک و دینامیک مکانیزم یاد شده انجام شد؛ و معادلات حرکت ربات از روش لاگرانژ به دست آمد. در نهایت، کنترلر ربات بدون استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و تنها با استفاده از منطق فازی انجام شد. برای این منظور یک کنترلر فازی بر پایه روش تاکاگی-سوگنو طراحی گردید. با استفاده از مدل به دست آمده و کنترلر طراحی شده برای این ربات موازی، در فضای کاری هر مسیر دلخواه را می توان به سادگی طی کرد؛ حتی اگر خطای اولیه ای در قرارگیری و حدس مکان عملگرها وجود داشته باشد.

مجموعه قوانین فازی برای استخراج نیروی کنترلی مناسب چنین انتخاب گردید:

1. If (e is -) and (de is -) then (output1 is ++)
2. If (e is -) and (de is 0) then (output1 is +)
3. If (e is -) and (de is +) then (output1 is 0)
4. If (e is 0) and (de is -) then (output1 is +)
5. If (e is 0) and (de is 0) then (output1 is 0)
6. If (e is 0) and (de is +) then (output1 is -)
7. If (e is +) and (de is -) then (output1 is 0)
8. If (e is +) and (de is 0) then (output1 is -)
9. If (e is +) and (de is +) then (output1 is --)

(۲۳)

در این پژوهش، پس از مدل سازی سینماتیک و دینامیک ربات ۳ PRS به اعمال کنترلر طراحی شده بر مدل دینامیکی پرداخته شد. برای این منظور از معادله ۱۹ به عنوان سیستم مورد کنترل استفاده گردید. برای شبیه سازی از مقادیر جدول ۲ استفاده شد.

جدول ۲ مقدار پارامترهای مکانیزم

پارامتر	علامت	واحد	مقدار
طول ریل	a	متر (m)	0.4
شعاع پلتفرم	b	متر (m)	0.2
طول لینک	l	متر (m)	0.6
جرم پلتفرم	M	کیلوگرم (kg)	1
جرم لینک	m	کیلوگرم (kg)	0.1
شتاب گرانش	g	متر بر مجذور ثانیه (m/s^2)	9.8

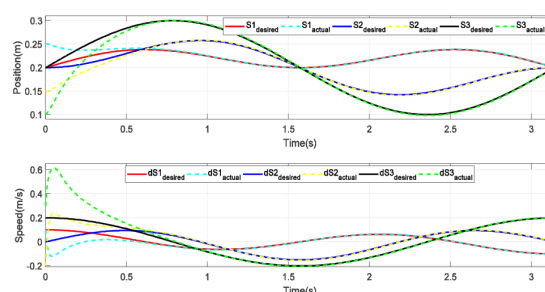
به منظور شبیه سازی عملکرد کنترلر فازی در عملیات ردگیری مسیر، یک مسیر دلخواه برای حرکت لغزنده های ربات به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\begin{cases} s_1 = 0.2 + 0.1 \sin(t) \cos(t)^2 \\ s_2 = 0.2 + 0.15 \sin(t)^2 \cos(t) \\ s_3 = 0.2 + 0.2 \sin(t) \cos(t) \end{cases} \quad (24)$$

در ادامه، برای سنجش میزان کارایی کنترلر فازی در برابر اغتشاشات اولیه، یک خطای موقعیت و سرعت در زمان صفر به صورت زیر انتخاب شد:

$$[s_1 \ s_2 \ s_3 \ \dot{s}_1 \ \dot{s}_2 \ \dot{s}_3]^T = [0.25 \ 0.15 \ 0.1 \ 0.1 \ -0.2 \ 0.3]^T \quad (25)$$

ورودی کنترلی با استفاده از سیستم فازی طراحی شده و اعمال قوانین موجود در رابطه ۲۳ به خطای موقعیت و سرعت از مسیر مد نظر، تعیین گردید؛ و به عملگرهای لغزنده ی ربات اعمال شد. موقعیت و سرعت این لغزنده ها در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳ موقعیت و سرعت لغزنده ها- مسیر دلخواه (desired)، مسیر طی شده توسط کنترلر (actual)

همانطور که در شکل بالا مشخص است، کنترلر طراحی شده در زمان تقریبی ۰/۵ ثانیه، بر اغتشاش اولیه غلبه کرده و خود را به مسیر مد نظر رسانده است. در ادامه حرکت، کنترلر فازی از پس ردگیری مسیر دلخواه برآمده و به خوبی آن را دنبال کرده است. نیروهای کنترلی اعمال شده بر هر لغزنده در شکل ۴ آمده است.

- [۱] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, vol. 180, no. 1, pp. 371-386, 1965.
- [۲] A. Ruiz, F. Campa, C. Roldán-Paraponiaris, and O. Altuzarra, "Dynamic Model of a Compliant 3PRS Parallel Mechanism for Micromilling," in *Microactuators and Micromechanisms*. Springer, 2017, pp. 153-164.
- [۳] F. Malvezzi and T. A. H. Coelho, "Singularity and Workspace Analyses of a 3-DOF Parallel Mechanism for Vehicle Suspensions," in *Mechanisms, Transmissions and Applications*. Springer, 2015, pp. 311-319.
- [۴] Y. Li and Q. Xu, "Kinematics and inverse dynamics analysis for a general 3-PRS spatial parallel mechanism," *Robotica*, vol. 23, no. 02, pp. 219-229, 2005.
- [۵] M.-S. Tsai and W.-H. Yuan, "Inverse dynamics analysis for a 3-PRS parallel mechanism based on a special decomposition of the reaction forces," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 11, pp. 1491-1508, 2010.
- [۶] M.-S. Tsai and W.-H. Yuan, "Dynamic modeling and decentralized control of a 3 PRS parallel mechanism based on constrained robotic analysis," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 63, no. 3-4, pp. 525-545, 2011.
- [۷] W.-H. Yuan and M.-S. Tsai, "A novel approach for forward dynamic analysis of 3-PRS parallel manipulator with consideration of friction effect," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 3, pp. 315-325, 2014.
- [۸] Y. Li and S. Staicu, "Inverse dynamics of a 3-PRC parallel kinematic machine," *Nonlinear Dynamics*, vol. 67, no. 2, pp. 1031-1041, 2012.
- [۹] O. Altuzarra, F. C. Gomez, C. Roldan-Paraponiaris, and C. Pinto, "Dynamic Simulation of a Tripod Based in Boltzmann-Hamel Equations," in *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2015, pp. V05CT08A022-V05CT08A022. American Society of Mechanical Engineers.
- [۱۰] A. Ruiz, F. Campa, C. Roldán-Paraponiaris, O. Altuzarra, and C. Pinto, "Experimental validation of the kinematic design of 3-PRS compliant parallel mechanisms," *Mechatronics*, vol. 39, pp. 77-88, 2016.
- [۱۱] S. Staicu, "Matrix modeling of inverse dynamics of spatial and planar parallel robots," *Multibody System Dynamics*, vol. 27, no. 2, pp. 239-265, 2012.
- [۱۲] Y. G. Li, L. X. Xu, and H. Wang, "Dimensional Synthesis of 3PRS Parallel Mechanism Based on a Dimensionally Homogeneous Analytical Jacobian," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 455, pp. 354-359. Trans Tech Publ.
- [۱۳] A. Derdiyok, B. Soysal, F. Arslan, Y. Ozoglu, and M. Garip, "An adaptive compensator for a vehicle driven by DC motors," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 342, no. 3, pp. 273-283, 2005.
- [۱۴] D. Chwa, "Fuzzy adaptive tracking control of wheeled mobile robots with state-dependent kinematic and dynamic disturbances," *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 587-593, 2011.
- [۱۵] L. Vermeiren, A. Dequidt, M. Afroun, and T.-M. Guerra, "Motion control of planar parallel robot using the fuzzy descriptor system approach," *ISA transactions*, vol. 51, no. 5, pp. 596-608, 2012.
- [۱۶] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, Inc., ISBN-100-471-649, 2005.
- [۱۷] R. N. Jazar, *Advanced dynamics: rigid body, multibody, and aerospace applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [۱۸] C. Liang and G. M. Lance, "A differentiable null space method for constrained dynamic analysis," *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, vol. 109, no. 3, pp. 405-411, 1987.

نگاهی به کامپوزیت‌ها

امیررضا ترابی پوده،

فارغ التحصیل مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

کامپوزیت به معنی ماده مرکب و مواد کامپوزیتی به معنی مواد مرکب می‌باشد. ماده مرکب از ترکیب چندین ماده با ویژگی‌ها و خصوصیات مختلف بوجود می‌آید. مطالعه تاریخ نشان می‌دهد که اولین باز ساخت مواد مرکب توسط بشر، در دوره پارسنگی می‌باشد و همچنین حدود ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در خاورمیانه از پلیمر برای قیراندود کردن قایق‌ها استفاده شده است. اما مهمترین تحولات در مواد مرکب بین سالهای ۱۸۴۷ تا ۱۹۴۶ اتفاق افتاد که دانشمندان مفهوم جدیدی از آن ارائه کردند [۱].

تا قبل از ورود کامپوزیت به صنعت، فلزات و آلیاژهای آن‌ها مورد توجه صنایع فضایی و دریایی بودند اما امروزه بخش مهمی از این صنایع به آن‌ها وابسته است. آلیاژها نمونه ای از مواد مرکب هستند منتها از ترکیب مواد در مقیاس میکروسکوپی بوجود می‌آیند، آلیاژهای فلزی در مقیاس ماکروسکوپی، بعنوان یک ماده هموزن فرض می‌شوند. مقیاس ماکروسکوپی یعنی هر کدام از مواد تشکیل دهنده ماده پس از ترکیب، با چشم غیر مسلح دیده می‌شوند. شکل (۱) ترکیب تقویت کننده و زمینه را نشان می‌دهد [۲].

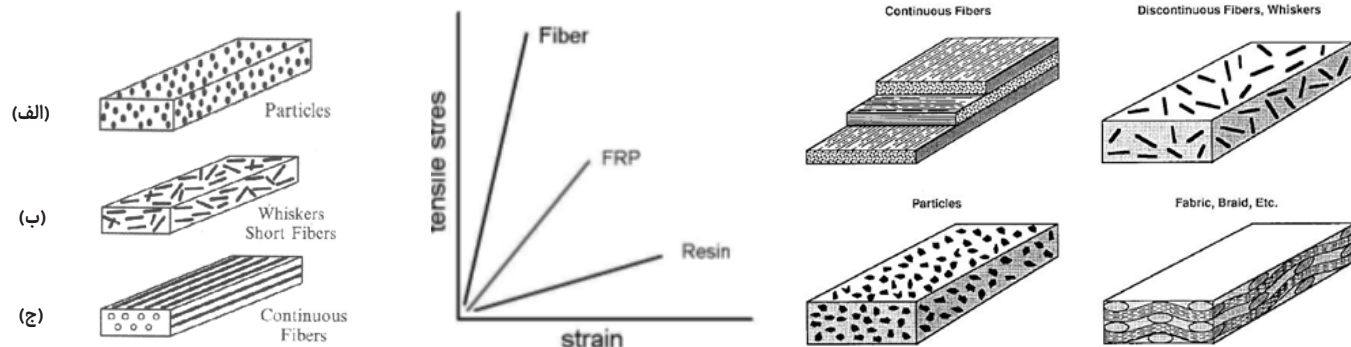
در صنایع مکانیک ماده کامپوزیت به مفهوم ترکیب دو جزء تقویت کننده و زمینه می‌باشد. هر جزء متحمل وظیفه ای است که جزء اصلی یا تقویت کننده، وظیفه تحمل نیرو را دارد و در واقع خصوصیات اصلی کامپوزیت به این جزء وابسته است. جزء دیگر، زمینه نام دارد که پایه کامپوزیت است و وظیفه اصلی آن انتقال و تقسیم نیرو می‌باشد [۲]. در شکل (۲) خصوصیات مکانیکی الیاف و رزین و ترکیب این دو ماده را نشان می‌دهد.

از خصوصیات مواد مرکب می‌توان به توانایی در انتخاب جنس و اجزای تشکیل دهنده اشاره کرد. مواد کامپوزیتی علاوه بر خصوصیت مذکور توانایی تقویت ماده در جهت دلخواه را دارند از طرفی دیگر خصوصیات مکانیکی ماده تقویت کننده و زمینه در کامپوزیت‌ها، خصوصیات ویژه‌ای را در اختیار طراح می‌گذارد که عبارتند از:

نسبت استحکام به وزن بالا	سختی متوسط
طول عمر زیاد	مقاوم در برابر حرارت
مقاوم در برابر خوردگی	مقاوم در برابر سایش

طبیعتاً تمام این خصوصیات به صورت بهینه در یک ماده مرکب یافت نمی‌شود چرا که گاهی بعضی از این خصوصیات اثراتی متقابل روی هم دارند. به هر حال بر اساس عملکرد یک سازه می‌توان خصوصیات را اولویت بندی و بهینه نمود [۲].

تقویت کننده‌ها بر اساس جنس و ساختار ظاهری تقسیم بندی می‌شوند. تقویت کننده‌ها بر اساس جنس به شیشه، گرافیت و آرامید دسته بندی می‌شوند و بر اساس ساختار ظاهری به دو گروه که می‌توان به کامپوزیت های تقویت شده با الیاف و کامپوزیت های تقویت شده با ذرات اشاره کرد. زمینه هم بر اساس جنس و نوع عملکرد به دسته بندی های گوناگونی طبقه بندی شده است. یک نمونه از گروه بندی مواد کامپوزیت در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۱- شکل‌های مختلف مواد مرکب [۳]

شکل ۲- خصوصیات مکانیکی کامپوزیت و اجزای تشکیل دهنده آن [۳]

انواع آرایش تقویت کننده در کامپوزیت [۳]. (الف) تقویت کننده ذره ای (ب) تقویت کننده با الیاف و ویسکوز (ج) تقویت کننده با الیاف پیوسته

پالایشگاه و کاربرد مخازن کامپوزیتی در صنایع دریایی و حمل نقل می‌باشد [۵]. شکل (۴) یک طرح کلی از تولید یک مخزن کامپوزیتی را نشان می‌دهد که عیوب ساخت در مراحل نصب و راه اندازی دستگاه و فرآیند رشته پیچی رخ می‌دهد.



شکل ۴- طرح کلی از تولید یک مخزن کامپوزیتی

فرآیند رشته پیچی

امروزه دستگاه‌های پیچش الیاف، سرعت و دقت در تولید محصولات کامپوزیتی را افزایش داده‌اند. هر دستگاه پیچش الیاف دارای یک تعداد محورها درجه آزادی مشخص است که هرچه تعداد این محورها بیشتر باشد، امکان تولید قطعات با شکل‌های پیچیده‌تر میسر خواهد شد. شکل (۵) دستگاه پیچش الیاف را نشان می‌دهد. این فرآیند نه تنها برای اشکال متقارن تک محوری بلکه برای مقاطع منشوری و حتی اشکال پیچیده نیز استفاده می‌شود. شکل (۶) نمونه‌ای از تولیدات دستگاه پیچش الیاف می‌باشد. رشته پیچی به دو صورت مرطوب و خشک انجام می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شود.

تعریف کامل تر از فرآیند رشته پیچی را اینگونه می‌توان مطرح کرد: پیچش الیاف به دور مندرل به صورت محیطی، مارپیچی، قطبی و طولی، که در هر بار چرخیدن، پوششی به اندازه ضخامت الیاف روی بدنه مندرل در جهت طولی ایجاد می‌شود. بعد از اتمام عمل پیچش الیاف، قطعه را جهت پخت در داخل کوره قرار می‌دهند.

در این پژوهش از الیاف شیشه پیوسته با زمینه اپوکسی استفاده شده است. از خصوصیات الیاف شیشه می‌توان به استحکام بالا، قیمت پایین، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایقی مناسب اشاره کرد. از معایب آن می‌توان به مدول الاستیک پایین، پیوند ضعیف به پلیمرها، وزن مخصوص بالا، حساسیت به سایش (که باعث کاهش استحکام کششی می‌شود) و مقاومت در برابر خستگی پایین اشاره نمود. الیاف شیشه انتخاب شده در این پژوهش از خانواده (E) انتخاب شده که این حرف معرف واژه الکتریکال به این دلیل ذکر می‌شود که این نوع الیاف برای کاربردهای الکتریکی طراحی شده است. البته مصارف دیگری مانند کاربردهای تزئینی و حتی سازه‌ای نیز دارد. با این وجود استحکام کششی مناسب الیاف شیشه باعث شده تا این الیاف در مخازن تحت فشار داخلی و خارجی، موشک و دیگر سازه‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد. ساخت الیاف شیشه معمولاً از سنگ شیشه و الیاف توسط ذوب کردن سنگ شیشه با کنترل دقیق درجه حرارت حاصل می‌شود [۴].

رزین اپوکسی نقش تقویت کننده را در نمونه‌های ساخته شده بر عهده دارد. رزین‌های اپوکسی، در دسته بندی زمینه‌های پلیمری قرار دارند که از سایر زمینه‌های پلیمری گران قیمت تر است ولی مشهورترین و پرکاربردترین نوع ماتریس‌ها در PMCها محسوب می‌شود. نزدیک به ۷۰ درصد ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده در صنایع هوافضا، از اپوکسی تشکیل شده‌اند. دلایل اصلی کاربرد فراوان این رزین‌ها در استحکام بالا، ویسکوزیته پایین، فراریت کم در طول فرآیند پخت و نرخ انقباض کم می‌باشد. از مزایای مهم آن‌ها نیز می‌توان به بهبود در خواص الکتریکی و شیمیایی اشاره کرد [۴].

خصوصیات	واحد	الیاف شیشه	رزین اپوکسی
گراناش مخصوص ^۱	-	۲,۵۴	۱,۲۸
مدول یانگ ^۲	GPa	۷۲,۴	۳,۷۹
استحکام کششی نهایی ^۳	MPa	۳۴۴۷	۸۲,۷۲

خواص الیاف شیشه و رزین اپوکسی [۴]

پوسته‌های کامپوزیتی

در بیان پوسته‌های کامپوزیتی باید گفت که هر ماده ای که استحکام بالا و خصوصیت مناسبی در برابر تنش‌های کششی داشته باشد مورد توجه صنایع لوله سازی و مخازن قرار گرفته می‌گیرد. سازمان ASME طبق استانداردهای خاص لیستی از بهترین مواد با محدودیت دما و فشار را برای تولید لوله و مخازن تحت فشار ارائه کرده، که نام کامپوزیت‌ها در این لیست به چشم می‌خورد. پوسته‌های کامپوزیتی را می‌توان بر اساس جنس، ابعاد و فرم ظاهری طبقه بندی نمود و همچنین نسبت‌های بین طول، قطر و ضخامت در طبقه بندی آن موثر است.

امروزه یکی از کاربردهای مهم پوسته‌های کامپوزیتی، در تولید لوله و مخازن تحت فشار خارجی است. این لوله‌ها و مخازن علاوه بر فشار داخلی سیال در برابر فشارهای خارجی، استحکام خوبی دارند و می‌توان از آن‌ها در فشار خارجی بالا استفاده کرد. کاربرد لوله‌های کامپوزیتی در خطوط انتقال نفت از سکوها به

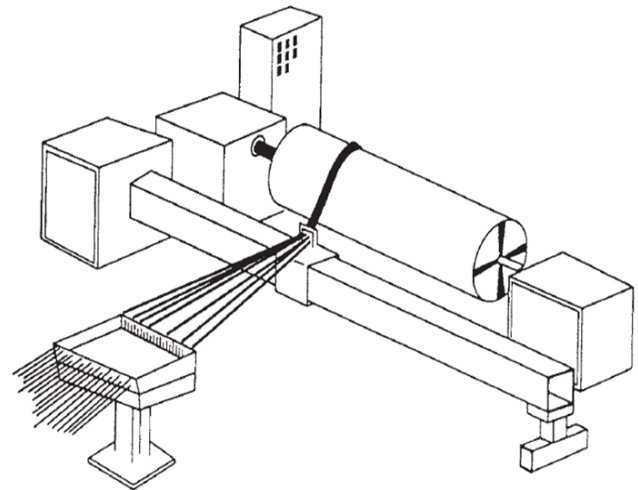
رشته‌پیچی به دو صورت مرطوب و خشک انجام می‌شود که هر کدام خصوصیات مربوط به خود را دارند. دستگاه‌های رشته‌پیچی شامل دو نوع افقی و عمودی هستند که بسته به نوع فرآیند تولید، انتخاب می‌شوند. بارزترین مزایا و معایب فرآیند رشته‌پیچی در جدول (۲) آورده شده است.

مزیت‌ها	محدودیت‌ها
تولید مخازن یکپارچه و بدون درز	تولید قطعات با شکل‌های محدب
توجیه اقتصادی در تولیدات بالا	الیاف نمی‌تواند به راحتی در جهت طولی قطعه خوابانده شود.
رزین اضافی در سازه داخل نمی‌شود	هزینه مندرل برای قطعات بزرگ بالاست.
بخاطر استفاده از رشته‌های زیاد الیاف، هزینه پارچه بافی اولیه حذف می‌شود	سطح خارجی، صافی سطح مناسبی ندارد.

مزایا و معایب فرآیند رشته‌پیچی [۶]

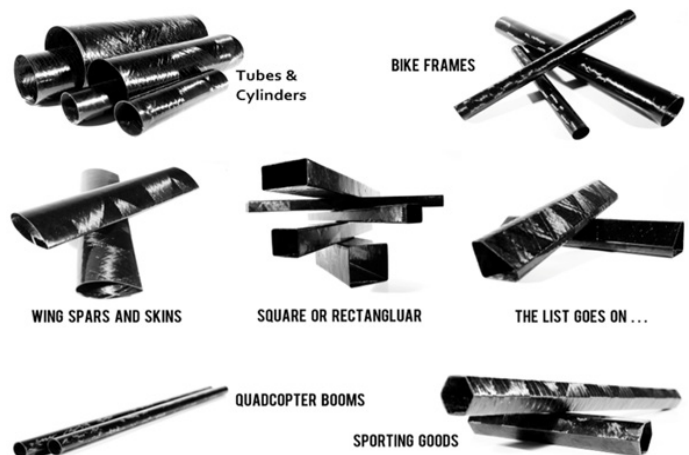
منابع

- [۱] م. محسنی شکیب؛ مکانیک سازه‌های مرکب؛ انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)؛ تهران؛ چاپ اول؛ ۱۳۸۵
- [۲] ا. رجبی، م. جمالی، م. کدیور؛ مفاهیم اساسی در مواد مرکب؛ انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ تهران؛ چاپ اول؛ ۱۳۸۵
- [۳] M. C. Y. Niu, Airframe Structural Design, Conmilit Press, ۱۹۸۸
- [۴] کاو، ا. باوی، م. صالحی، ن. باوی؛ مکانیک مواد مرکب؛ انتشارات عابد؛ تهران؛ چاپ دوم؛ ۱۳۹۲
- [۵] م. مشایخی؛ بررسی کمانش پوسته‌های متقارن و حل آن با روش اجزا محدود؛ دانشکده مکانیک؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ ۱۳۷۴
- [۶] S. V. Hoa, Principles of the Manufacturing of Composite Materials, DEStech publications, Inc, ۲۰۰۹
- [۷] <https://www.xwinder.com>



شکل ۵- دستگاه پیچش الیاف [۶]

مندرل‌ها از فلزات، پلاستیک‌ها، سرامیک‌ها و یا ترکیبی از این مواد ساخته می‌شوند. سطح خارجی آن‌ها باید صاف و سخت باشد. همچنین مندرل تحت فشار ناشی از کشش الیاف، نباید خراب شود یا تغییر فرم دهد. مندرل‌ها به دو قسمت جدا نشونده و جدا نشونده تقسیم می‌شوند. در مندرل‌های جدا نشونده، مانند مخازن استوانه‌ای، مندرل به عنوان یک لایه آب بندی عمل می‌کند. هدایت کننده‌های الیاف وظیفه کنترل نیروی کششی و نظم دهی به الیاف را به هنگام پیچیده شدن به دور مندرل دارند. بستر رزین قسمتی مهم در دستگاه پیچش الیاف است.



شکل ۶- انواع قطعات تولید شده با دستگاه پیچش الیاف [۷]



تازه‌های فناوری

مهدی نامی خلیله‌ده، دانشجوی دکتری تخصصی مکانیک، دانشگاه تبریز

عنوان فارسی	عنوان انگلیسی
موشک‌های هسته‌ای	Lockheed Martin to build
شلیک‌شونده از	more Trident II D5
زیردریایی	submarine-launched
D5	nuclear missiles

خلاصه فناوری:

موشک Trident II D5 یک موشک بالستیک سه مرحله‌ای است که توسط لاکهیدمارتین طراحی شده است [۱]. ۲۰ عدد از این موشک‌ها بر روی زیردریایی‌های کلاس اوهایو قرار می‌گیرند [۲]. این موشک‌ها هم‌چنین بر روی زیردریایی کلاس وانگارد بریتانیایی نصب می‌شوند که هر زیردریایی می‌تواند ۱۶ موشک را حمل کند [۳]. هر موشک D5 قادر به پیمودن مسافت بیش از ۴۰۰۰ مایل در سرعت‌های فراصوت است و پس از آن کلاهک‌های متعدد خود را با دقت بالا از خود جدا می‌کند [۲].



قرارداد پروژه:

قرارداد بین سازمان سیستم‌های استراتژیک نیروی دریایی ایالات متحده و واشنگتن و شرکت لاکهیدمارتین در کالیفرنیا به منظور تامین تدارکات جدید تولید موشک (Trident II D5) و پشتیبانی سیستم‌های مستقر شده D5 و به ارزش ۵۵۹٫۶ میلیارد دلار منعقد شده است [۴]. ساخت نمونه‌هایی از موشک انجام گرفته و این برنامه تا ۳۰ سپتامبر ۲۰۲۳ تکمیل نهایی می‌شود [۵]. هزینه ساخت هر موشک ۷۰٫۵ میلیون دلار برآورد شده است [۶].

زیر فناوری‌ها:

(۱) برای بهبود عملکرد موتور موشک، از سوخت جامد استفاده شده است. استفاده از سوخت جامد، باعث می‌شود که موشک بتواند مسافت بیشتری را با بار بیشتری نسبت به سوخت مایع پیماید [۸].

(۲) در این موشک به طور نوآورانه از سوخت پلی اتیلن گلیکول (PEG) استفاده شده است [۸]. این نوع از سوخت، از دسته سوخت‌های جامد کامپوزیتی انرژی بالا می‌باشد [۹].

(۳) بخش تجهیزات نشان داده شده در شکل ۱، تجهیزات الکترونیکی کنترل‌کننده‌ی هدایت و ناوبری را در بر دارد [۱۰].

(۴) این موشک، مجهز به کلاهک‌های هسته‌ای Mk4 یا Mk5 می‌باشد که در روی بخش تجهیزات نشان داده شده در شکل ۱ نصب می‌شوند [۱۰].

(۵) کلاهک هسته‌ای Mk5 دارای یک هسته کربنی

منابع:

- [۱]: <https://defence-blog.com/news/lockheed-martin-gets-559-m-for-trident-ii-d-5-missile.html>
- [۲]: <https://www.forbes.com/sites/lorenthompson/2019/05/05/five-reasons-the-navys-d-5-missile-is-the-most-important-weapon-in-the-u-s-arsenal/>
- [۳]: <http://www.spacewar.com/reports/Lockheed-awarded-5596M-for-Trident-II-D-5-missiles-system-support-999.html>
- [۴]: <https://www.militaryaerospace.com/articles/2019/trident-ii-d-5-submarine-launched-nuclear-missiles.html>
- [۵]: <https://www.govconwire.com/2019/lockheed-gets-56-m-modification-on-trident-ii-d-5-missile-production-support-contract/>
- [۶]: <https://www.nationalpriorities.org/analysis/2019/analysis-fiscal-year-2020-pentagon-spending-request/>
- [۷]: <http://bastion-karpenko.ru/trident-ii-d-5/>
- [۸]: <https://fas.org/nuke/guide/usa/slbm/do-5.htm>
- [۹]: Liu, Y., et al., A study on the microstructure of a nitrate ester plasticized polyether propellant dissolved in HCl and KOH solutions. ۷۷۵۰، ۲۰۱۰، p. ۹۹۶-۹۹۷.
- [۱۰]: <https://www.globalsecurity.org/wmd/systems/d-5-features.htm>
- [۱۱]: Peng, W., et al., Oxidation resistant zirconium diboride-silicon carbide coatings for silicon carbide coated graphite materials. ۶۲۹، ۲۰۱۵، p. ۱۳-۱۲۴.
- [۱۲]: <https://www.britannica.com/technology/Trident-missile>
- [۱۳]: <http://www.astronautix.com/t/tridentc-5.html>
- [۱۴]: <http://www.astronautix.com/t/tridentd-5.html>

اهمیت موشک [۲]:

زیردریایی‌های کلاس اوهایو مجهز به این موشک، مغروق بوده و در نتیجه از اهداف دشمن خارج می‌شوند. هر D5 که چندین کلاهک را حمل می‌کند، قادر است با دقت ۳۰۰ پایی به هدف برخورد کند. بنابراین زیردریایی کلاس اوهایو به تنهایی می‌تواند یک کشور را نابود کند. از این رو حدود ۷۰ درصد کل کلاهک‌های هسته‌ای سازمان سیستم‌های استراتژیک نیروی دریایی ایالات متحده در نهایت بر روی موشک‌های D5 قرار خواهند گرفت.

تفاوت TRIDENT I با TRIDENT II [۱۲]:

نام موشک	سری	طول	قطر	برد	کلاهک هسته‌ای
TRIDENT I	C4	۳۴ فوت	۶ فوت	۷۴۰۰ کیلومتر	۸ کلاهک Mk4 یا ۱۰۰ هزارتنی [۱۳]
TRIDENT II	D5	۴۴٫۶ فوت	۷ فوت	۱۲۰۰۰ کیلومتر	۸ کلاهک Mk4 یا Mk5 ۴۷۵ هزارتنی [۱۴]

مروری بر کتاب پالایشگاه زیستی

سعید میرزایی، کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی دانشگاه صنعتی شریف



محصولات براساس پیشرفت‌های اخیر در عملیات‌های بالادستی، میان دستی و پایین دستی به یک فرایند یکپارچه‌سازی شده زیست‌توده نیازمند است. طبق تعریف آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، یک پالایشگاه زیستی هم انرژی و هم محصولاتی غیر از انرژی را تولید می‌کند.

طبق نظر آزمایشگاه ملی انرژی ایالات متحده آمریکا یک پالایشگاه زیستی به این صورت تعریف می‌شود: «تأسیساتی که در آن فرایندهای تبدیل زیست‌توده به سوخت، انرژی و مواد شیمیایی با ارزش انجام می‌پذیرد» و «در یک مفهوم کلی انبارهای غذایی گیاهان و زیست‌توده تبدیل به طیف وسیعی از محصولات با ارزش می‌شوند».

پالایشگاه‌های زیستی بر چهار ستون یا جزء (خوراک، سکوها، محصولات و مسیرهای تبدیل) استوار است که به صورت سری و با زنجیره تأمین متوالی به یکدیگر مرتبط هستند. در فصل ۲، یک دیدگاه کلی از تمامی خوراک‌های زیستی و ترتیب طبقه‌بندی آن‌ها وجود دارد. سپس، به دلیل آن که خوراک ابتدا در سکوها و بعد از آن از طریق مسیرهای تبدیل مختلف به محصولات تبدیل می‌شوند، سکوها به صورت شفت‌های مفصلی در یک پالایشگاه زیستی نشان داده شده‌اند. در نهایت، محصولات اصلی پالایشگاه‌های زیستی بحث می‌شود و برخی از مثال‌ها ذکر می‌گردد. در یک روش مرسوم، خوراک را می‌توان به عنوان ماده اولیه برای تغذیه یا جایگزین کردن یک فرایند یا ماشین و به منظور تبدیل آن به کالا یا خدمات عرضه کرد. در زمینه فرایندها و پالایشگاه‌های زیستی، خوراک اصلی زیست‌توده می‌باشد که

کتاب پالایشگاه زیستی نوشته دکتر کارلوس آلزانه و همکاران است. این کاربرد با رویکرد طراحی و تجزیه و تحلیل پالایشگاه‌های زیستی نگاشته شده است. این کتاب با هدف ارائه یک طراحی سیستماتیک از پالایشگاه‌های زیستی، با مروری بر ارتباط و کاربردهایی که از طریق منشأ مواد اولیه، مسیرهای تحول و محصولات توضیح داده شده است. سپس، مفاهیمی به عنوان زنجیره تأمین، تعیین توالی و یکپارچه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، چارچوبی برای پالایشگاه‌های زیستی مبتنی بر جنبه‌های فنی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی با مثال‌هایی برای نشان دادن کاربردهای تحلیل شده است. سرانجام، برخی از شاخص‌های انرژی و اقتصادی برای ارزیابی پایداری پالایشگاه‌های زیستی و چالش‌های کلیدی برای توسعه آینده پالایشگاه‌های زیستی را بررسی کرده است.

فصل اول یک مرور کلی از تعاریف مربوط به پالایشگاه زیستی و تکامل مفهومی آن مستقل از سیستم‌های یکپارچه شناخته شده ارائه می‌دهد. همچنین بر روی نمونه‌هایی از پالایشگاه‌های زیستی در مراحل مختلف توسعه تمرکز می‌کند. مفهوم پالایشگاه زیستی دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد که منجر به تعاریف و مواضع مختلف می‌شود. هدف این بخش توصیف مختصر و برداشت‌های متفاوت در مورد مفهوم کلی پالایشگاه زیستی در مقالات است. مهم‌ترین تعاریف برای پالایشگاه‌های زیستی و تکامل آنها از فرایندهای مستقل یکپارچه در این بخش شرح داده شده است.

بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (EIA) یک پالایشگاه زیستی به صورت زیر تعریف می‌شود: «فراوری پایدار زیست‌توده به یک طیف از محصولات قابل فروش (مواد شیمیایی) و انرژی (سوخت، نیرو و گرما)». سیستم‌هایی که شامل یک پالایشگاه زیستی هستند را می‌توان به عنوان یک مرکز، یک خوشه، یک طیف و یک فرایند توصیف کرد. یک پالایشگاه زیستی برای دستیابی به طیف وسیعی از

می‌تواند تمامی مواد گیاهی موجود (گیاهان و جلبک‌ها) را شامل شود ولی در بیشتر موارد، شامل موادی مثل چربی‌ها که منشأ حیوانی دارند نیز می‌شود. مرکز بازده انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر دیارتان انرژی ایالات متحده خوراک زیست‌توده را به صورت «ماده‌ای تجدیدپذیر و بیولوژیکی که می‌توان آن را به صورت مستقیم به عنوان سوخت استفاده کرد یا به نوعی سوخت دیگر یا تولید انرژی تبدیل کرد» (این در حالی است که این تعریف فقط به انرژی مرتبط می‌باشد و امروزه کاملاً صحیح نیست. علاوه بر آن، خوراک‌های زیست‌توده را همچنین می‌توان جهت بدست آوردن غذا، پلیمرهای زیستی، مواد شیمیایی زیستی و فیلترهای زیستی استفاده کرد. آزمایشگاه بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، زیست‌توده را با تهیه یک طبقه‌بندی خلاصه و با توجه به منشأ آن دقیق‌تر توصیف می‌کند: «زیست‌توده شامل بریده‌هایی از انرژی جنگلی و گیاهی، غذای کشاورزی و خوراک، فضولات و پسماندهای کشاورزی، پسماندهای جنگلی، گیاهان آبی و مواد پسماند دیگر مثل برخی از پسماند-های شهری را شامل می‌شود. زیست‌توده یک منبع تجدیدپذیر خیلی ناهمگن است و از نظر شیمیایی پیچیده می‌باشد.»

در فصل سوم به بحث زنجیره تأمین و یکپارچه‌سازی پالایشگاه زیستی می‌پردازد. استراتژی طراحی پالایشگاه زیستی پایدار مبتنی بر یک رویکرد اکتشافی با استفاده از مفاهیم زنجیره تأمین، توالی و یکپارچه‌سازی با هدف ایجاد راه بهتر برای استفاده از انواع مختلف مواد خام و به‌دست آوردن محصولات با ارزش افزوده بالا می‌باشد. علاوه بر این، اجرای تکنولوژی‌های مختلف و ادغام بین خطوط پردازش، روشی برای افزایش بهره‌وری و امکان‌سنجی طرح پالایشگاه زیستی است. بنابراین، رویکرد بحث شده در این فصل، یک دستورالعمل با مثال‌هایی در مورد چگونگی ارائه یک طرح پالایشگاه زیستی ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، پایداری پالایشگاه زیستی به طور مستقیم با شاخص‌های فنی - اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین پتانسیل آن برای تأثیر بر جوامع در تمام سطوح مرتبط است.

فصل ۴ این کتاب به تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی پالایشگاه‌های زیستی می‌پردازد. این فصل روش‌شناسی مورد استفاده برای طراحی زنجیره تأمین پالایشگاه زیستی بر اساس مفاهیم قبلی از رویکردهای زنجیره تأمین، توالی و یکپارچه‌سازی می‌باشد. توضیح دقیق فرایند شبیه‌سازی، جرم و انرژی همراه با ارزیابی فنی - اقتصادی پالایشگاه زیستی ارائه شده است.

فصل ۵ از جنبه محیط‌زیستی پالایشگاه‌های زیستی با رویکرد تحلیل چرخه عمر ارزیابی می‌کند. همچنین طرح انتخابی برای یک پالایشگاه زیستی امیدوارکننده باید شامل ارزیابی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی باشد.

در فصل ۶ اولین رویکردهای ارزیابی اجتماعی اعمال شده در پالایشگاه زیستی با استفاده از مطالعه موردی با توجه به ویژگی‌های اجتماعی - اقتصادی مورد مطالعاتی ارائه می‌شود. در این فصل، مرتبط‌ترین مفاهیم برای تعیین تأثیر اجتماعی که این نوع سیستم را ایجاد می‌کند، نشان داده می‌شوند: ایجاد شغل در سطح زمین و فرایند، تأمین غذا، و تحلیل اجتماعی عمده‌تاً با زنجیره تأمین در ارتباط است و این کار آسانی نیست. مردم می‌توانند انتظار داشته باشند که هر پروژه کارآمد مربوط به یک پالایشگاه زیستی می‌تواند زنجیره تأمین را بهبود بخشد، و استفاده از زیست‌توده را به شیوه‌ای یکپارچه سودآورتر کند. تجزیه و تحلیل اینکه به طور جداگانه می‌تواند یک مشکل باشد.

در فصل ۷ برخی مثال‌های خاص از پالایشگاه‌های زیستی ارائه می‌کند که با در نظر گرفتن نتیجه منطقی تکامل از کارخانه‌های سوخت زیستی اصلی به کارخانه‌های پالایشگاه زیستی پیچیده چندمحصولی است. برخی از آن‌ها واقعاً وجود دارند یا فقط برنامه‌ریزی شده‌اند یا پیشنهاد شده‌اند. موارد تجزیه و تحلیل شده عبارت‌اند از: نیشکر، ذرت، نخل روغنی، زیست‌توده لیگنوسلولزی، میوه‌های گرمسیری و ریز جلبک‌های زیستی. توضیح دقیق هر سیستم و مسیرهای تبدیل، پلتفرم‌ها، و محصولات در این فصل توصیف شده است هر مطالعه موردی یک استراتژی تجزیه و یکپارچه‌سازی خاص را با توجه به مواد خام و محصولات هدف نشان می‌دهد. در نهایت، این فصل یک دیدگاه کلی از مفاهیم لجستیک به‌کاررفته در سیستم‌های عرضه زیست‌توده ارائه می‌دهد. در فصل ۸ شاخص‌های مربوط به پالایشگاه زیستی به عنوان عوامل تعیین‌کننده برای تعریف بهترین پیکربندی‌ها و قضاوت در مورد ریسک‌های تکنولوژیکی و اقتصادی آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. این شاخص‌ها یک اصل پایداری را منعکس می‌کنند: استفاده یکپارچه از مواد خام تجدیدپذیر. برای ارزیابی فنی یک پالایشگاه زیستی، شاخص‌هایی مانند شاخص جرم پالایشگاه زیستی، شاخص جرم آب پالایشگاه زیستی، محصولات فرعی پالایشگاه زیستی و محصولات جانبی باید در نظر گرفته شود.

در فصل آخر به چالش‌های کلیدی توسعه زیست پالایشگاه‌ها در آینده اشاره می‌کند. افزایش رشد پروژه‌های پالایشگاه‌های زیستی در مقیاس‌های مختلف در طول سال‌های آینده مورد انتظار است. با این حال، می‌توان نتیجه گرفت که تکامل پالایشگاه زیستی هنوز هم بسیار پایین است، حتی زمانی که فناوری‌های بسیار پیشرفته و بالغ برای تولید اتانول یا برق به عنوان نقطه شروع برای این عملیات پالایش زیستی به کار می‌روند. هنگامی که پالایشگاه‌های نفت از نظر استراتژی‌های تکامل و طراحی با پالایشگاه زیستی مقایسه می‌شوند، تمایل به تکرار بیشتر خطاهای گذشته به دلیل عدم گنجاندن جنبه‌های بسیار مهم وجود دارد: استفاده یکپارچه از مواد خام، تجزیه و تحلیل تدارکات و همچنین ثبات مالی. پالایشگاه زیستی از ابتدا باید با در نظر گرفتن پایداری سیستم طراحی شود.



توربین‌های بادی بدون پره

محمد امین رحیمی جعفری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

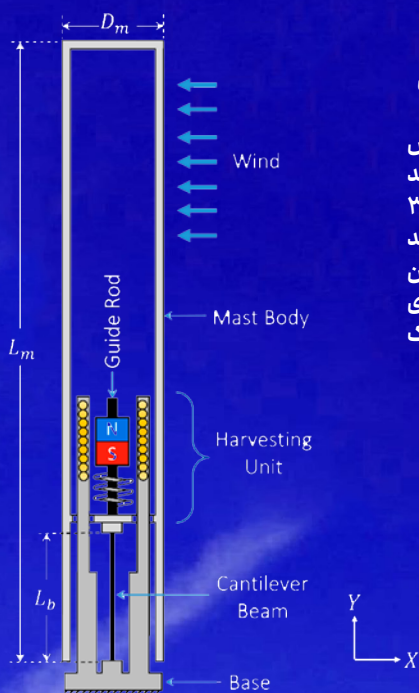
توربین‌های بادی بدون پره یک فناوری نوآورانه انرژی باد هستند که توسط شرکت اسپانیایی Vortex Bladeless توسعه یافته است. برخلاف توربین‌های بادی سنتی، این توربین‌ها هیچ‌گونه پره‌ای ندارند. در عوض، آنها ساختار استوانه‌ای سبکی دارند که عمود بر جریان باد در نوسان است و انرژی را از طریق پدیده‌ای به نام رزونانس آئروالاستیک مهار می‌کند.

این طراحی چندین مزیت دارد، از جمله:

- * نگهداری نسبتاً کم
- * بی‌صدا بودن
- * سازگار با پرندگان
- * ایمنی

این فناوری برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از سطح مصرف‌کننده تا پارک‌های بادی در مقیاس بزرگ، توسعه یافته است. Vortex Bladeless قصد دارد توربین‌ها را در مناطق شهری برای مقاصد خودمصرفی و ایجاد هم‌افزایی با انواع دیگر انرژی‌ها نصب کند. این فناوری پتانسیل تولید ۳۰ درصد از آنچه را که می‌توان از یک توربین معمولی به دست آورد را داشته و برای کاربردهایی مانند انرژی بادی دریایی در نظر گرفته شده است. تحقیقات این شرکت نشان داده است که هر توربین نصب شده در امتداد یک بزرگراه می‌تواند به اندازه ۲۰ توربین سنتی برق تولید کند. توربین‌های بادی بدون پره را می‌توان به‌تنهایی یا همراه با پنل‌های خورشیدی مورد استفاده قرارداد که یک جایگزین جدید و سازگار با محیط‌زیست با ویژگی‌های متمایز و امکانات جدید ارائه می‌کند.

توربین‌های بادی بدون پره از طریق نوسان سازه استوانه‌ای در باد، الکتریسیته تولید می‌کنند. این نوسان با استفاده از پدیده‌ای به نام رزونانس آئروالاستیک مهار می‌شود که در اثر عبور باد از توربین و ایجاد یک الگوی چرخه‌ای از گردابه‌ها ایجاد می‌شود. سپس انرژی جنبشی استوانه نوسانی از طریق یک ژنراتور خطی یا یک سیستم دینام (مشابه آنچه برای مهار انرژی موج استفاده می‌شود) به الکتریسیته تبدیل می‌شود. این روش مبتکرانه تبدیل انرژی به توربین‌های بدون پره اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به پره‌های چرخان سنتی برق تولید کرده و آنها را نسبتاً کم تعمیر، بی‌صدا و ایمن می‌سازد و امکانات جدیدی را برای تولید برق بادی ارائه می‌کند.





هوشمندسازی ساختمان

بهزاد مهدوی، کنترل کیفی شرکت تراکورسازی ایران



- حال به تشریح هر کدام از موارد فوق می پردازیم:

- ذخیره و تبدیل انرژی های طبیعی به برق:

- ۱- ذخیره آب باران با استفاده از تانکر آب و استفاده از آب تصفیه کن جهت استفاده از آن
- ۲- ساخت پنل خورشیدی در بام ساختمان ها
- ۳- نصب توربین های بادی خانگی

- ذخیره آب باران با استفاده از تانکر آب و استفاده از آب تصفیه کن جهت استفاده از آن:

هنگامی که باران می بارد از آب آن نمی توانیم استفاده ای کنیم، چون در اکثر خانه ها به فاضلاب شهری منتقل می شود اما می-توان با ذخیره کردن آن در تانکر و تصفیه آن استفاده بهینه را کرد. حتی می توانیم در صورت عدم استفاده از تصفیه کننده آب در موارد آبیاری و شست و شوی ماشین نیز استفاده کرد.

صرفه جویی کردن در مصرف انرژی از اهمیت زیادی برخوردار است. در زندگی روزمره از آب، برق، گاز استفاده می کنیم. علاوه بر صرفه جویی با ذخیره کردن انرژی های طبیعی نیز می توانیم قدم های بزرگی در راستای حفظ منابع طبیعی برداریم. این روزها مهندسان در تلاش اند که ساختمان های کارآمد بسازند. یعنی از سویی که آرامش و رفاه ساکنین ساختمان برای آنها اهمیت دارد؛ از سویی تلاش می کنند با کم کردن هزینه های نگهداری و تعمیرات ساختمان به کاهش مصرف انرژی کمک نمایند. این کار در طولانی مدت به اکو سیستم زندگی ما کمک می کند تا بهترین سبک زندگی را داشته باشیم. هوشمندسازی ساختمان و منازل مسکونی یک پیشنهاد خوب برای صرفه جویی در مصرف انرژی است. برای این کار راهکارهای ویژه ای در نظر گرفته شده که می تواند در طولانی مدت از نظر اقتصادی و مصرف انرژی صرفه جویی نمود.

- انواع راه های مدنظر برای کاهش مصرف انرژی:

- ۱- ذخیره و تبدیل انرژی های طبیعی به برق
 - ۲- هوشمندسازی ساختمان در راستای کاهش مصرف انرژی
- میتوانیم با استفاده از موارد فوق نسبت به ذخیره و کاهش انرژی هم زمان در ساختمان ها اقدام کنیم.





شکل-۱ استفاده مجدد از آب باران

ساخت پنل خورشیدی در بام ساختمان ها:

برای تولید انرژی از پنل های خورشیدی استفاده کنید. برای ساختمان هایی که در مناطق گرمسیری قرار دارند چه چیز بهتر از این است که انرژی گرمایشی را به طور رایگان دریافت کنند. استفاده از نور خورشید را همیشه به خاطر بسپارید و هر طور شده برای ساختمان یک پنل خورشیدی تهیه نمایید. درست است که هزینه تهیه آن کمی زیاد است اما در درازمدت این هزینه به شما برمی گردد.

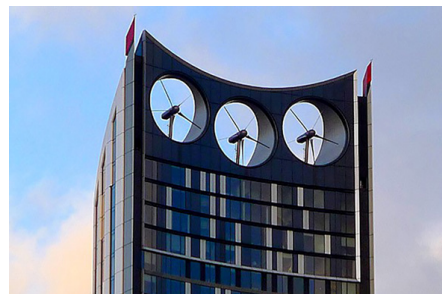


شکل-۲ استفاده و کاربرد پنل های خورشیدی را برای داشتن یک ساختمان هوشمند

-نصب توربین های بادی خانگی:

پیش بینی شده است که تا سال ۲۰۲۰ میلادی، سهم انرژی باد در تامین انرژی جهان تقریباً برابر با ۳۷۵۰۰۰ گیگاوات ساعت در سال باشد و برق تولید شده با باد، ۱۰ درصد از منبع برق جهان را تشکیل دهد.

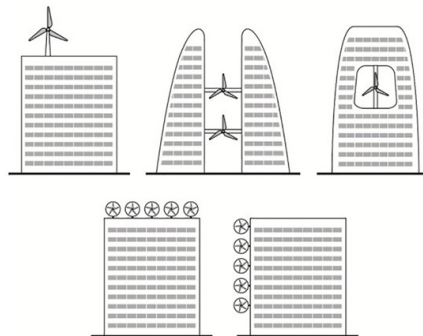
استفاده از باد برای تأمین انرژی روز به روز در حال پیشرفت و گسترش است و تحقیقات گسترده ای برای استفاده بهتر و کارآمدتر از انرژی باد در سراسر دنیا در حال انجام است. تکنولوژی های تولید برق از انرژی موجود در باد به سرعت در حال پیشرفت هستند و کمپانی های بزرگی در دنیا هر روزه فناوری های جدیدتری در این زمینه ارائه می کنند. باد به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پاک، آلودگی محیط زیست، تولید و انتشار دی اکسید کربن و باران های اسیدی را در پی ندارد. یک توربین بادی انرژی باد را با حرکت پره های خود به انرژی مکانیکی تبدیل می کند. امروزه در ساخت پره ها مواد پیشرفته سبکی به کار می رود تا حتی کوچکترین جریان های هوایی را نیز حس کنند و وزن توربین نیز در صورت نیاز به افزایش طول پره ها زیاد سنگین نباشد. طراحی توربین های بادی خانگی معمولاً طوری است که از نظر بیننده جذاب باشند بدون این که به کارکرد آنها خللی وارد شود.



شکل ۳- توربین های بادی در ساختمان ها

محل نصب توربین های بادی خانگی:

قبل از نصب توربین بادی خصوصاً در تعداد زیاد، باید ساختار پشت بام را از لحاظ قدرت و استحکام برای تحمل وزن توربین ها بررسی کرد. در شکل زیر در ردیف اول سه حالت ممکن برای نصب توربین های بادی بزرگ در ساختمان و در ردیف دوم دو حالت ممکن برای نصب توربین های بادی کوچک نشان داده شده است.



شکل ۴- نحوه محل نصب توربین های بادی خانگی

مرکز تجارت جهانی بحرین مثال خوبی از ساختمان های دارای توربین های بادی نصب شده در مقیاس بزرگ است. این سه توربین بادی مجموعاً بین ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ مگاوات ساعت انرژی تولید می کنند و در مجموع ۱۱٪ تا ۱۵٪ از تأمین برق ساختمان را بر عهده دارند.

هر چه ارتفاع از سطح زمین بیش تر باشد سرعت باد نیز بیشتر است و این دلیلی است که توربین های بادی را تا حد امکان بلند می سازند. توان یک توربین بادی به مساحت جاروشده توسط پره ها بستگی دارد؛ به این معنی که اگر طول پره ها دو برابر شود، انرژی تولید شده ۴ برابر می شود. در برخی موارد نیز هندسه یک ساختمان به دلیل افزایش سرعت باد در دیواره آن می تواند عملکرد یک توربین بادی را بهبود بخشد.

یکی از مسائلی که همیشه در مورد توربین های بادی خانگی وجود دارد، ترس از افتادن پره های توربین و آسیب به منطقه یا افراد است. این مسئله در مورد توربین های بادی سایز بزرگ در مزارع بادی خارج از شهر اهمیت زیادی ندارد اما در مورد توربین های نصب شده در بالای یک ساختمان بلند در شهر مسئله بسیار مهمی است. با وجود این که استفاده از توربین های بادی خانگی در بسیاری از کشورهای دنیا گسترش یافته است اما طبق گزارش کارخانه های سازنده، عملکرد آن ها در تولید برق هنوز به اندازه انتظار نیست و تاکنون

نتوانسته اند به اندازه ظرفیت واقعی خود انرژی تولید کنند. بنابراین شاید بزرگ ترین مسئله توربین های بادی خانگی را مسئله اقتصادی دانست. هر چند که توربین های بزرگ موجود در مزارع بادی را می توان جزء به صرفه ترین روش های تولید انرژی دانست، اما توربین های نصب شده روی ساختمان نسبت به هزینه زیاد خود عملکرد مطلوبی ندارند. در واقع علت عملکرد ضعیف آن ها نسبت به توربین های بزرگ مزارع بادی، اندازه کوچک آنهاست. توربین های کوچک نمی توانند باد های شدید و سرکش را مهار و به اندازه کافی انرژی تولید کنند. توربین های با صرفه اقتصادی برای ساختن یک ساختمان بسیار بزرگ هستند.

مزایای توربین بادی خانگی:

۱. عدم نیاز به سوخت، به دلیل این که سوخت توربین های بادی انرژی باد است که تمام نشدنی است.
۲. رایگان بودن انرژی باد
۳. کاهش مصرف سوخت های فسیلی با بهره گیری از توربین های بادی
۴. کاهش آلودگی محیط زیست چون خروجی یک توربین بادی پاک است و به محیط و هوا ضرری نمی رساند.
۵. عدم نیاز به آب برای تولید انرژی
۶. توانایی تأمین بخشی از برق مورد نیاز یک ساختمان
۷. عدم نیاز به جا و مکان زیاد برای نصب
۸. کم تر بودن قیمت انرژی تولید شده توسط توربین بادی نسبت به انرژی های تجدید ناپذیر

- معایب توربین بادی:

۱. سرو صدای تولید شده توسط توربین ها، که با وجود پیشرفت تکنولوژی و به کارگیری مواد عایق و کم صدا هنوز هم سرو صدای ایجاد شده می تواند به عنوان یکی از معایب توربین ها ذکر شود.
۲. متغیر بودن انرژی باد و در نتیجه متغیر بودن برق تولید شده توسط توربین بادی
۳. عملکرد پایین تر آن ها نسبت به توربین های نصب شده در مزارع بادی به علت ارتفاع کمتر، زیرا با افزایش ارتفاع از سطح زمین سرعت وزش باد بیش تر شده و مهار انرژی باد راحت تر است.
۴. مقرون به صرفه نبودن توربین های خانگی بدلیل عملکرد پایین آن نسبت به هزینه صرف شده برای آنها.
۵. به هم زدن محیط زندگی پرندگان
۶. احتمال خطر افتادن پره های توربین در مجموع این مطلب می توان گفت: خوب است که از انرژی باد برای تأمین برق ساختمان های خود استفاده کنید اما بهتر است آن را در مقیاس بزرگ و در منطقه ای دور دست که توربین های بادی بزرگ جریان های شدید باد را مهار می کنند و سرو صدای آنها به منطقه مسکونی و شهری آسیب نمی زند، تولید کنید.

هوشمند سازی ساختمان در راستای کاهش مصرف انرژی:

هوشمند سازی منازل:

- کنترل کلیه سیستم های الکترونیکی منزل
- هوشمند سازی روشنایی، برق و تئوپیه مطبوع
- هوشمند سازی شیر برقی آب و گاز
- با استفاده از مطالب گفته شده می توان با داشتن ژنراتور، ذخیره کننده برق، تانکر آب می توان انرژی را ذخیره کرد و سپس در مواقع ضروری به کار برد و با سیستم هوشمند کنترل خانه، بیشتر در منابع انرژی صرفه جویی کرد.



مروری بر کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز

آرش نوربخش سعدآباد

دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمدتقی شروانی تبار

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

کاویتاسیون یکی از چالش برانگیزترین ناهنجاری‌های جریان سیال است که منجر به اثرات مضر بر رفتارهای جریان پمپ گریز از مرکز و ویژگی‌های فیزیکی می‌شود. کم فشارترین مناطق پمپ‌های گریز از مرکز اولین قربانیان کاویتاسیون هستند، جایی که کاویتاسیون خود را به شکل حفره روی دیواره‌های جامد داخلی پمپ، همراه با نویز و لرزش نشان می‌دهد، که همگی منجر به تخریب عملکرد هیدرولیکی پمپ می‌شود. در مقاله حاضر، بر اساس بررسی متون، برخی از ویژگی‌های کاویتاسیون اساسی روشن شده، که در آن جنبه‌های مختلف مربوط به کاویتاسیون در پمپ‌های گریز از مرکز به طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته است. روش‌هایی برای توقف یا جلوگیری از کاویتاسیون نیز در مقاله ارائه گردیده است.

واژگان کلیدی: کاویتاسیون، پمپ گریز از مرکز، ویژگی‌های عملکرد، فشار بخار.

مقدمه:

پمپ یک وسیله مکانیکی است که بیشتر برای بالا بردن مایعات از سطح پایین به سطح بالاتر استفاده می‌شود. این کار با ایجاد فشار کم در ورودی و فشار زیاد در خروجی پمپ انجام می‌شود. با این حال، در ابتدا کار باید توسط یک محرک اولیه انجام شود تا بتواند انرژی مکانیکی را به مایع منتقل کند که در نهایت به انرژی فشار تبدیل می‌شود. بیشتر در صنایع و کاربردهای مسکونی استفاده می‌شود. پمپ گریز از مرکز یک پمپ جابجایی غیر مثبت است که به مایع انرژی می‌دهد. پمپ‌های گریز از مرکز ماشین‌هایی هستند که از نیروی گریز از مرکز استفاده می‌کنند تا با ایجاد فشار، سیال را از سطح پایین‌تر به سطح بالاتر ببرند. پمپ گریز از مرکز با چرخاندن یک یا چند پروانه در داخل یک محفظه حلزونی مایع را به حرکت در می‌آورد. مایع از طریق ورودی محفظه از چشمی پروانه وارد می‌شود، جایی که توسط پره‌های پروانه گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، ماشین‌های توربو سیال اساساً شامل یک پروانه است که در یک محفظه می‌چرخد (Deeprise, King, & d'Agostino & Acosta, ۱۹۹۱; Oldenzil, ۱۹۸۲; McNulty, & Pearsall, ۱۹۷۴; Zhang, Zhou, Gao, & Kanoglu, Cengel, & Cimbal, ۲۰۲۰; Cui, ۲۰۱۴). سیال از چشمی پروانه (در مرکز پروانه‌ها) وارد می‌شود و از فضای بین تیغه‌های پروانه به فضای بین پروانه و دیواره‌های بدنه خارج می‌شود (White, ۱۹۹۴). سرعت عناصر سیال در دو جهت مماسی و شعاعی است. سرعت و همچنین فشار، هر دو به طور نسبی افزایش می‌یابند، زیرا سیال از پروانه جریان می‌یابد (Zhang, Zhou, Gao, & Kanoglu, Cengel, & Cimbal, ۲۰۲۰). یک پمپ گریز از مرکز شامل مجموعه‌ای از پره‌های دوار محصور در یک محفظه است که برای انتقال انرژی به سیال از طریق نیروی گریز از مرکز استفاده می‌شود.

پره‌ها معمولاً به سمت عقب و دور از جهت چرخش هستند. پره‌های پروانه چرخان انرژی را به سیال منتقل می‌کند و در نتیجه سرعت را افزایش می‌دهد. سیال از طریق چشم پروانه به پروانه مکیده می‌شود و از طریق کانال‌های پروانه که توسط تیغه‌های منحنی بین کفه و توپی تشکیل شده‌اند جریان می‌یابد. سیال با انتقال پالس شتاب می‌گیرد در حالی که انحنا پره‌های پروانه را از مرکز پروانه (چشم) به سمت بیرون دنبال می‌کند. در قطر بیرونی پروانه به حداکثر سرعت خود می‌رسد و پروانه را به داخل یک دیفیوزر یا محفظه پیچی رها می‌کند (Kostyukov & Tarasov, ۲۰۱۶; Patel & Doshi, ۲۰۱۳).

پدیده کاویتاسیون در پمپ

در یک پمپ گریز از مرکز، منطقه جریان در چشمی پروانه پمپ معمولاً کوچکتر از ناحیه جریان لوله کشی پمپ یا ناحیه جریان از طریق پره‌های پروانه است. هنگامی که مایع پمپاژ شده وارد چشم یک پمپ گریز از مرکز می‌شود، کاهش سطح جریان منجر به افزایش سرعت جریان همراه با کاهش فشار می‌شود. هر چه دبی پمپ بیشتر باشد، افت فشار بین مکش پمپ و چشمی پروانه بیشتر می‌شود. اگر افت فشار به اندازه کافی بزرگ باشد یا اگر دما به اندازه کافی بالا باشد، افت فشار ممکن است به اندازه‌ای باشد که باعث شود مایع به بخار تبدیل شود، زمانی که فشار موضعی به زیر فشار اشباع سیال پمپاژ می‌شود. هر حباب بخاری که در اثر افت فشار در چشم پروانه‌ها ایجاد می‌شود، توسط جریان سیال در امتداد پره‌های پروانه جاروب می‌شود. هنگامی که حباب‌ها وارد منطقه‌ای می‌شوند که فشار موضعی بیشتر از فشار اشباع دورتر از پره پروانه است، حباب‌های بخار به طور ناگهانی فرو می‌ریزند.

(A. Al-Obaidi, Pradhan, Asim, Mishra, & Zala, 2014; Jani et al., 2019). این فرآیند تشکیل و متعاقب آن فروپاشی حباب‌های بخار در پمپ، کاویتاسیون نامیده می‌شود.

برخی از موقعیت‌هایی که احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در جریان سیال از طریق پمپ گریز از مرکز بیشتر است: ۱- هندسه دیوار در نواحی جریان سیال باعث تحمیل سرعت‌های بالا و افت فشار بعدی به دلیل کاهش تدریجی سطح جریان می‌شود. این مورد انقباض جریان در مجاری سیال و پروانه پمپ است. ۲- برش بین دو جریان همسایه با سرعت‌های بسیار متفاوت مستلزم نوسانات آشفته فشار زیاد است. این مورد برای جت‌ها و ویک‌ها است. ۳- خصلت ناپایداری بالای جریان‌های خاص که در نتیجه شرایط شتاب زمانی جریان سیال را افزایش می‌دهد، بنابراین افت فشار در جریان سیال را افزایش می‌دهد. ۴- ناهمواری در مرز دیواره جریان سیال، که منجر به تشکیل ویک و حفره‌های متصل بعدی می‌شود.

۵- وجود آب در فاصله‌ها به دلیل اتصال نادرست بین دو یا چند قطعه در یک سیستم مکانیکی. هنگامی که دیواره‌های بینابینی شروع به حرکت می‌کنند، احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد است. ۶- تأثیر اجسام جامد متحرک دارای لبه‌های تیز غوطه‌ور در مایع. شتاب سیال به دست آمده در این لبه‌ها باعث افت فشار می‌شود، بنابراین احتمال وقوع کاویتاسیون زیاد است. کاویتاسیون یک نگرانی عمده در پمپ سانتریفیوژ است، زیرا می‌تواند منجر به کاهش عملکرد پمپ و آسیب مجراها و فیکسچرها شود. کاویتاسیون می‌تواند به سرعت جریان سیال و دمای سیال آن بستگی داشته باشد. بیشتر پمپ‌های گریز از مرکز برای مقاومت در برابر کاویتاسیون پایدار طراحی نشده‌اند. صدا یکی از نشانه‌های حفره شدن پمپ گریز از مرکز است. نشانه‌های دیگری که می‌توان از یک ایستگاه راه دور مشاهده کرد، نوسان فشار تخلیه، سرعت جریان و جریان موتور پمپ است. کاویتاسیون در پمپ گریز از

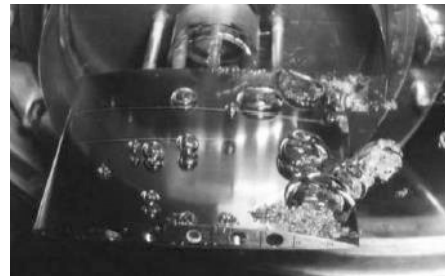
مرکز را می‌توان با تکنیک‌های متفاوت شناسایی کرد. تأثیر دمای آب جاری و سرعت جریان بر روی شروع حفره‌ها در پمپ گریز از مرکز ممکن است با استفاده از تکنیک تجسم جریان و پیش بینی فشار مورد مطالعه قرار گیرد (Chakraborty, Singh, Zinzuvadia, & Pandey, 2012; Sheth, 2017).

انواع کاویتاسیون

رشد پدیده کاویتاسیون به طور کلی با تشکیل و حباب‌های بخار در جریان سیال مشخص می‌شود. فصل مشترک سیال بخار می‌تواند تحت اشکال مختلفی باشد، که طبقه‌بندی کاویتاسیون بر اساس آن است. الگوهای کاویتاسیون مختلف در اینجا ارائه شده است (Binama, Muhirwa, & Bisengimana, 2016; Bacharoudis, Filios, & Bisengimana, 2008; Mentzos, & Margaritis, 2008).

کاویتاسیون متحرک

در این نوع کاویتاسیون، میکرو حباب‌هایی که هسته‌های کاویتاسیون نامیده می‌شوند، در امتداد میدان جریان حرکت می‌کنند تا زمانی که به مناطق فشار پایین‌تر جریان برسند. جایی که قبل از فروپاشی در مناطق بازبایی فشار، به حباب‌های کاویتاسیون ماکروسکوپی تبدیل می‌شوند. حباب‌های توسعه‌یافته معمولاً به شکل پیچیده‌ای هستند که عمدتاً ناشی از تعامل آنها با دیوارهای همسایه یا حباب‌های دیگر است.



شکل ۱- حباب کاویتاسیون در حال عبور

کاویتاسیون متصل

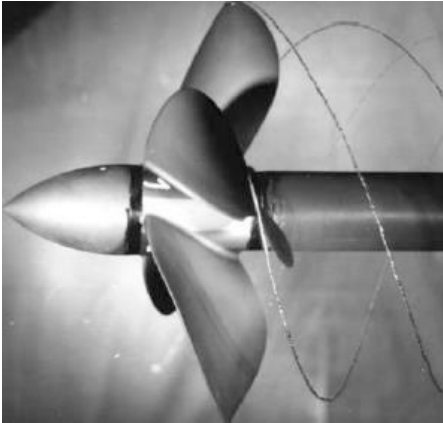
برخلاف کاویتاسیون متحرک ارائه شده، کاویتاسیون متصل در همان محل متصل به دیوار می‌ماند. این بدان معنا نیست که جریان ثابت است. در واقع، کاویتاسیون تقریباً همیشه منبع ناپایداری است که ممکن است بسیار قوی باشد. در مورد کاویتاسیون متصل، منبع اصلی ناپایداری از قسمت عقبی حفره نشات می‌گیرد.



شکل ۲- کاویتاسیون متصل

حفره گردابی

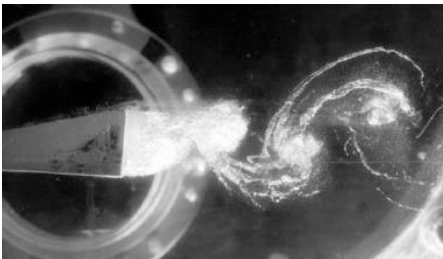
این نوع کاویتاسیون بیشتر در پروانه‌های دریایی یافت می‌شود. در هسته گرداب ایجاد شده توسط جریان ثانویه در نوک تیغه یافت می‌شود. جریان دوم نوک تیغه نتیجه اختلاف فشار بین فشار پره و سمت مکش است. فشار در گرداب نوک ایجاد شده بسیار کمتر از فشار دور در همان سیال است که آن را در برابر پدیده کاویتاسیون آسیب پذیر می‌کند.



شکل ۳- حفره گردابی

کاویتاسیون برشی

چنین کاویتاسیونی در ویک اجسام بلوف یا در جت‌های مایع غوطه‌ور مشاهده می‌شود.

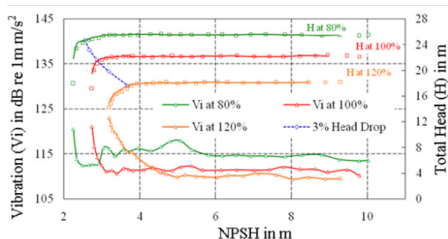


شکل ۴- کاویتاسیون برشی

اثرات کاویتاسیون در پمپ

کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز تأثیر قابل توجهی بر عملکرد پمپ دارد. کاویتاسیون عملکرد پمپ را کاهش می‌دهد و در نتیجه نرخ جریان و فشار تخلیه نوسان دارد. کاویتاسیون همچنین می‌تواند برای اجزای داخلی پمپ‌ها مخرب باشد. هنگامی که یک پمپ حفره می‌کند، حباب‌های بخار در ناحیه کم فشار درست در پشت پره‌های پروانه چرخان تشکیل می‌شود. این حباب‌های بخار سپس به سمت پره پروانه روبه‌رو حرکت می‌کنند، جایی که فرو می‌ریزند و باعث ایجاد ضربه فیزیکی به لبه جلویی پره پروانه می‌شوند. این شوک فیزیکی حفره‌های کوچکی را در لبه جلویی پره پروانه ایجاد می‌کند. هر گودال منفرد از نظر اندازه میکروسکوپی است، اما اثر جمعی میلیون‌ها عدد از این گودال‌ها که در طی چند ساعت یا روز تشکیل می‌شوند، می‌تواند به معنای واقعی کلمه یک پروانه پمپ را از بین ببرد. کاویتاسیون همچنین می‌تواند باعث لرزش بیش از حد پمپ شود که می‌تواند به یاتاقان‌های پمپ، حلقه‌های پوشیده و مهر و موم آسیب

(X) را نشان می‌دهد. NPSH به عنوان تفاوت بین انرژی در سمت مکش پمپ و انرژی بخار مربوط به دمای آب تعریف می‌شود. استنباط می‌شود که روند ارتعاش برای کاهش NPSH (هد مکش مثبت خالص) با توجه به دبی اسمی تغییر می‌کند. افت هد برای ۳٪ در منحنی کاویتاسیون ترسیم شده است تا ایده اثرات کاویتاسیون با اشاره به سیگنال ارتعاش را بدست آورد.



شکل ۵- ویژگی‌های کاویتاسیون پمپ گریز از مرکز در ۱۵۰۰ دور در دقیقه برای سه نرخ جریان.

در نتیجه می‌توان گفت از ارتعاش به عنوان یک دستگاه نظارتی برای تشخیص ناهنجاری‌های پمپ استفاده می‌شود. ارتعاش، بهتر از افت عملکرد مانند ۰/۵٪، ۳٪ و غیره کاویتاسیون را پیش‌بینی می‌کند. تجزیه و تحلیل ارتعاش در طول آزمایش کاویتاسیون در کل باند فرکانسی انجام خواهد شد که از بین فرکانس‌های ارتعاش مختلف، فرکانس تکرارپذیر به مراتب بهتر از فرکانس‌های غالب و بزرگی متوسط بین باندهای فرکانسی است. این به کاربر پمپ اجازه می‌دهد تا به عنوان یک دستگاه نظارت برای کشف ناهنجاری‌های پمپ در هنگام کارکرد استفاده کند. بنابراین، شناسایی فرکانس قابل تکرار برای هر دکل آزمایشی پمپ پس از راه اندازی مجموعه در حالت عادی ضروری است.

بحث و نتیجه‌گیری

پدیده کاویتاسیون در سطح جهانی مانند تشکیل حباب‌های بخار در جریان سیال از افت فشار، زیر فشار بخار آن درک می‌شود. با توجه به ماهیت سریع و پیچیده آن، تشخیص کاویتاسیون به روش‌های پیچیده‌ای نیاز دارد. در غیر این صورت تنها با تأثیرات آن بر تجهیزات مانند سرو و صدای غیر معمول، ارتعاشات و آسیب‌های مادی می‌توان متوجه آن شد. در ماشین‌های سیال، بر اساس شرایط فیزیکی و کاری سیستم، کاویتاسیون می‌تواند به شکل‌های مختلفی ظاهر شود که پس از توسعه کامل، اثرات تقریباً مشابهی بر ویژگی‌های سیستم دارد. در پمپ‌های گریز از مرکز، عملکرد کاویتاسیون بیشتر به طراحی هندسی پروانه بستگی دارد به طوری که هر گونه اصلاح هندسی می‌تواند عملکرد کاملاً متفاوتی را به همراه داشته باشد. بنابراین، فرآیند طراحی نیاز به کنترل دقیق‌تری دارد، به طوری که از طریق تجربی عملکرد پمپ گریز از مرکز را بتوان به خوبی تعیین کرد که در آن کاویتاسیون می‌تواند تا سطوح قابل قبول کاهش یابد، اگر به طور کامل حذف نشود.

ساختاری (حالت‌ها) یا رزونانس‌های ناشی از انفجار حباب‌ها و بمباران سطوح داخلی پمپ است (Abdel-Rahman & El-Shaikh, ۲۰۰۹). استفاده از درایوهای سرعت متغیر در ایستگاه‌های پمپاژ، ضرورت بکارگیری تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌کننده و بازرسی دوره‌ای را افزایش می‌دهد، زیرا سطح ارتعاش با افزایش سرعت و همچنین با افزایش نیروهای تحریک افزایش می‌یابد. نصیری و همکاران (Nasiri, Mahjoob, & Vahid-Alizadeh, ۲۰۱۱) روش سیستم شبکه عصبی را برای تجزیه و تحلیل ارتعاش برای تشخیص کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز ایجاد کردند و مفیدتر یافتند. نظارت بر وضعیت یک سانتریفیوژ تک بلوک با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی انجام می‌شود (Sakthivel, Nair, Elangovan, Sugumaran, & Saravanmurugan, ۲۰۱۴) و ویژگی‌های آماری استخراج می‌شود، که به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک می‌کند (Rao, Zubair, & Rao, ۲۰۰۳). با گسترش فناوری‌های مبتنی بر اینترنت، روش نظارت بر وضعیت برای مکان‌های دور ساده‌تر شد و به‌طور مداوم برای هر گونه ناهنجاری در ماشین‌ها ثبت و مشاهده شد (Helal, Ahmed, Banawan, & Kotb, ۲۰۱۹). مشابه پیشرفت در سیستم‌های پایش وضعیت، دینامیک سیالات محاسباتی به پیش‌بینی شروع کاویتاسیون در ملخ دریایی به روشی ساده‌تر از روش‌های تجربی کمک می‌کند (Pei, Yuan, Li, & Yuan, ۲۰۱۴).

حد اکثر نوسان را می‌توان در لبه انتهایی تیغه نزدیک سمت فشار تیغه برای هر کانال جریان تحت شرایط بار قطعه یافت که منجر به ارتعاش می‌شود (Fu et al, ۲۰۱۵). در دبی‌های بالا، ارتعاش ساختار پدیده‌های کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز با دبی‌های پایین متفاوت است. فرکانس ارتعاش در هر نقطه نظارت به طور عمده در شفت، شفت چنگانه و فرکانس‌های غالب رخ داده است (Wang, Liu, Zhou, & Wang, ۲۰۱۶). طیف فرکانسی سیگنال‌های ارتعاشی کاویتاسیون برای تجزیه و تحلیل پدیده کاویتاسیون و برای به دست آوردن یک NPSH بحرانی (هد مکش مثبت خالص) با استفاده از بزرگی متوسط در باند فرکانسی، فرکانس‌های غالب و فرکانس‌های تکرارپذیر استفاده می‌شود. سیگنال‌های نویز و ارتعاش، پارامترهای بهتری برای درک وقوع کاویتاسیون نسبت به افت هد ۳ درصدی بر اساس مقدار NPSH به‌دست‌آمده صرف‌نظر از همه نرخ‌های جریان، سرعت‌ها و انتخاب لبه‌های پیشرو بودند (Christopher & Kumaraswamy, ۲۰۱۳). از این مطالعه مشاهده می‌شود که کاویتاسیون مدت‌ها قبل از تحت‌تأثیر قرار گرفتن ویژگی‌های عملکرد (یعنی خیلی قبل از افت ۳ درصدی هد) رخ می‌دهد و احتمالاً اوج منحنی ارتعاش کاویتاسیون را دارد (Christopher Stephen & Kumaraswamy, ۲۰۱۹). شکل ۵ ویژگی‌های کاویتاسیون پمپ گریز از مرکز (پمپ با سرعت ویژه متریک کم ۲۳) را در ۱۵۰۰ دور در دقیقه برای سه نرخ جریان (۸۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۰٪) به همراه منحنی ارتعاش برای فرکانس ۹۹۲ هرتز (فرکانس مکرر) با ارجاع به NPSH (در محور

برساند. تعداد کمی از پمپ‌های گریز از مرکز برای کار در شرایطی طراحی شده‌اند که کاویتاسیون اجتناب ناپذیر است (Cunha & Nova, ۲۰۱۳). این پمپ‌ها باید به طور ویژه طراحی و نگهداری شوند تا میزان کمی کاویتاسیون که در حین کار آنها ایجاد می‌شود بایستند. در زیر آسیب‌های پمپ در اثر کاویتاسیون آورده شده است:

- فرسایش پروانه در اثر کاویتاسیون باعث عدم تعادل پروانه می‌شود.
- کاویتاسیون باعث ایجاد ارتعاش و آسیب زیاد یا تاقان‌ها می‌شود.
- به دلیل کاویتاسیون، عمر پمپ کاهش می‌یابد و همچنین باعث خرابی زودرس پمپ می‌شود.

پیشگیری از کاویتاسیون در پمپ

هنگام طراحی یک سیستم پمپاژ یا انتخاب پمپ، باید هد خالص مکش مثبت (NPSH) را به طور کامل ارزیابی کرد تا از ایجاد کاویتاسیون جلوگیری شود. تجزیه و تحلیل مناسب هر دو هد مکش خالص مثبت موجود در سیستم (NPSHA) و هد مکش خالص مثبت مورد نیاز پمپ (NPSHR) باعث کاهش تشکیل کاویتاسیون می‌شود. این اندازه‌گیری افت فشار هنگام حرکت مایع از محدوده مکش پمپ در امتداد ورودی به پروانه پمپ است. این تلفات در درجه اول به دلیل اصطکاک و تلاطم است. تلفات توربولانس در دبی کم پمپ بسیار زیاد است و سپس با جریان به سمت بهترین نقطه بازده پمپ کاهش می‌یابد. تلفات اصطکاک معمولاً با افزایش دبی پمپ افزایش می‌یابد. در نتیجه، تلفات داخلی پمپ در دبی کم زیاد خواهد بود، به طوری که ۲۰ تا ۳۰ درصد از بهترین بازده جریان کاهش می‌یابد، سپس با جریان افزایش می‌یابد. حاشیه NPSH مورد نیاز با طراحی پمپ و سایر عوامل متفاوت خواهد بود و نمی‌توان حاشیه دقیق را دقیقاً پیش‌بینی کرد. برای اکثر برنامه‌ها، NPSHA از NPSHR فراتر خواهد رفت. به طور معمول حاشیه NPSH ۱ متر خواهد بود که برای انتخاب پمپ برای جلوگیری از کاویتاسیون در نظر گرفته می‌شود (Abbas, ۲۰۱۰; A. R. Al-Obaidi, ۲۰۱۹). NPSH ■ موجود باید بیشتر از NPSH مورد نیاز پمپ باشد.

- یک مسیر مستقیم سه تا پنج برابر طول قطر لوله (D) تا محدوده مکش پمپ برای جلوگیری از تلاطم اضافی در چشم پروانه ایجاد کنید.
- از مخلوط شدن بخار جوش با مایع پمپاژ اجتناب کنید.
- نباید اجازه داد که فشار مطلق کمتر از فشار بخار سیال باشد. این از جوشیدن که باعث ایجاد حفره می‌شود، جلوگیری می‌کند.

کاویتاسیون و ارتعاش

تان و همکاران (C Stephen, ۲۰۱۸) پیش‌بینی کردند که ارتعاش تصادفی با فرکانس بالا نشان‌دهنده خوبی برای ارتعاشات ناشی از جریان و تشخیص کاویتاسیون است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که تون فرکانس گسسته مشخصه، که در ارتباط نزدیک با فرآیند کاویتاسیون است (Cudina & Prezelj, ۲۰۰۹)، نتیجه ارتعاشات

منابع

- Abbas, M. K. (۲۰۱۰). Cavitation in centrifugal pumps. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, ۱۸--۱۷.
- Abdel-Rahman, S. M., & El-Shaikh, S. (۲۰۹). Diagnosis vibration problems of pumping stations: case studies. Paper presented at the ۱۳th IWTC (International Water Technology Conference), March.
- Al-Obaidei, A., Pradhan, S., Asim, T., Mishra, R., & Zala, K. (۲۰۱۴). Numerical studies of the velocity distribution within the volute of a centrifugal pump.
- Al-Obaidei, A. R. (۲۰۱۹). Experimental investigation of the effect of suction valve opening on the performance and detection of cavitation in the centrifugal pump based on acoustic analysis technique. *Archives of Acoustics*, ۶۹-۵۹, (۱)۴۴.
- Bacharoudis, E., Filios, A., Mentzos, M., & Margaris, D. (۲۰۰۸). Parametric study of a centrifugal pump impeller by varying the outlet blade angle. *The Open Mechanical Engineering Journal*, ۱(۲).
- Binama, M., Muhiirwa, A., & Bisengimana, E. (۲۰۱۶). Cavitation effects in centrifugal pumps-A review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, ۶۳-۵۲, (۵)۶.
- Chakraborty, S., Pandey, K., & Roy, B. (۲۰۱۲). Numerical analysis on effects of blade number variations on performance of centrifugal pumps with various rotational speeds. *International Journal of Current Engineering and Technology*, ۱۵۲-۱۴۳, (۱)۲.
- Christopher, S., & Kumaraswamy, S. (۲۰۱۳). Identification of critical net positive suction head from noise and vibration in a radial flow pump for different leading edge profiles of the vane. *Journal of Fluids Engineering*, ۱۳۵(۱۳۵).
- Cudina, M., & Prezelj, J. (۲۰۹). Detection of cavitation in operation of kinetic pumps. Use of discrete frequency tone in audible spectra. *Applied Acoustics*, ۵۴۶-۵۴۰, (۴)۷۰.
- Cunha, M. A. R., & Nova, H. F. V. (۲۰۱۳). Cavitation modelling of a centrifugal pump impeller. Paper presented at the ۲۲nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirao Preto, Sao Paulo, Brazil.
- d'Agostino, L., & Acosta, A. (۱۹۹۱). A cavitation susceptibility meter with optical cavitation monitoring—part two: experimental apparatus and results.
- Deeprase, W., King, N., McNulty, P., & Pearsall, I. S. (۱۹۷۴). Cavitation noise, flow noise and erosion. Paper presented at the Cavitation Conference, Institution Mechanical Engineers.
- Fu, Y., Yuan, J., Yuan, S., Pace, G., d'Agostino, L., Huang, P., & Li, X. (۲۰۱۵). Numerical and experimental analysis of flow phenomena in a centrifugal pump operating under low flow rates. *Journal of Fluids Engineering*, ۱۳۷(۱۳۷).
- Helal, M. M., Ahmed, T. M., Banawan, A. A., & Kotb, M. A. (۲۰۱۹). Numerical prediction of the performance of marine propellers using computational fluid dynamics simulation with transition-sensitive turbulence model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, ۵۲۷-۵۱۵, (۲)۲۳۳.
- Jani, D., Yash, M., Mit, S., Ajay, S., Jeel, S., & Pritesh, P. (۲۰۱۹). An overview on cavitation in centrifugal pump. *Renew Sustain Energy Rev*, ۷۰-۶۶, ۶.
- Kanoglu, M., Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (۲۰۲۰). *Fundamentals and applications of renewable energy*: McGraw-Hill Education.
- Kostyukov, V., & Tarasov, E. (۲۰۱۶). Centrifugal pumps in downstream: operational safety increase. *Procedia Engineering*, ۵۱۰-۵۰۵, ۱۵۲.
- Nasiri, M., Mahjoob, M., & Vahid-Alizadeh, H. (۲۰۱۱). Vibration signature analysis for detecting cavitation in centrifugal pumps using neural networks. Paper presented at the ۲۰۱۱ IEEE International Conference on Mechatronics.
- Oldenzien, D. (۱۹۸۲). A new instrument in cavitation research: the cavitation susceptibility meter.
- Patel, M., & Doshi, A. (۲۰۱۳). Effect of impeller blade exit angle on the performance of centrifugal pump. *Int J. Emerging Technology and Advanced Engineering*, ۱(۱)۳۹۹-۹۱.
- Pei, J., Yuan, S.-q., Li, X.-j., & Yuan, J.-p. (۲۰۱۴). Numerical prediction of ۳D periodic flow unsteadiness in a centrifugal pump under part-load condition. *Journal of Hydrodynamics*, ۲۶۳-۲۵۷, (۲)۲۶.
- Rao, J., Zubair, M., & Rao, C. (۲۰۰۳). Condition monitoring of power plants through the Internet. *Integrated Manufacturing Systems*, ۵۱۷-۵۰۸, (۶)۱۴.
- Sakthivel, N., Nair, B. B., Elangovan, M., Sugumaran, V., & Saravanmurugan, S. (۲۰۱۴). Comparison of dimensionality reduction techniques for the fault diagnosis of mono block centrifugal pump using vibration signals. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, ۳۸-۳۰, (۱)۱۷.
- Singh, V. R., Zinzuvadia, M., & Sheth, S. M. (۲۰۱۷). Parametric study and design optimization of centrifugal pump impeller—a review. *Int J Eng Res Appl. Kalpa Publications in Engineering*, ۵۱۵-۵۰۷, ۱.
- Stephen, C. (۲۰۱۸). A review of cavitation effects on vibration in centrifugal pump. *Fluid Mech. Res. Int. J.*, ۱۲۹-۱۲۸, (۳)۲.
- Stephen, C., & Kumaraswamy, S. (۲۰۱۹). Experimental determination of cavitation characteristics of low specific speed pump using noise and vibration. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, ۷۴-۶۵, ۱۰۰.
- Wang, K., Liu, H., Zhou, X., & Wang, W. (۲۰۱۶). Experimental research on pressure fluctuation and vibration in a mixed flow pump. *Journal of Mechanical Science and Technology*, ۱۸۴-۱۷۹, ۳.
- White, F. M. (۱۹۹۴). *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill. New York.
- Zhang, Q., Zhou, H., Gao, Q., & Cui, Z. (۲۰۱۴). Analysis of effects of impeller inlet width on the performance of centrifugal pump. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, ۲۰۸۱-۲۰۷۸, (۵)۶.

