

کد چکیده: 166-F    کد مقاله: D    نویسنده مسئول: محمد جواد مهرانی    تلفن: ۰۹۱۳۸۰۳۷۲۲۱

## "طراحی و ساخت نازل راکت سوخت جامد از بتن سبک پرلیتی"

محمد جواد مهرانی<sup>۱</sup>، محمد رئیسی<sup>۲</sup>، علیرضا اعرابی<sup>۳</sup>، محمد جواد امامی<sup>۴</sup>

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اصفهان

۲. عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان

۳. مدرس گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، اصفهان

ایمیل: mj.mehrani@iaukhsh.ac.ir

ایمیل: raeesi@iaukhsh.ac.ir

ایمیل: arabi@iaukhsh.ac.ir

ایمیل: m.javad.iran@gmail.com

### چکیده

مهمترین قسمت راکت، نازل آن است. ماده ای که برای ساخت نازل باید استفاده شود بسیار مهم است چراکه این ماده باید در برابر حرارت و فشار مقاوم باشد. سوخت راکت از نظر تئوری دمای شعله ای بسیار بالایی دارد و با توجه به شرایط طراحی، فشار ایجاد شده در محفظه ی احتراق حدود ۷ مگاپاسکال می باشد. سوخت این راکت ترکیبی از پتاسیم نیترات و نوعی قند می باشد که به این نوع سوخت ها، سوخت های قندی، یا (candy fuel) گفته می شود.

با توجه به شرایط موجود ایده ی استفاده از بتن پرلیتی در ساخت بدنه راکت به ویژه در محل نازل به ذهن خطور کرد، چرا که بتن ساخته شده توسط دانه های پرلیت، هم سبک بوده و به رانش راکت کمک می کند و هم در برابر حرارت بالا و آتش مقاومت قابل قبولی دارد. همچنین در مورد راکت های سبک نیز به منظور افزایش سرعت گازهای خروجی نیاز به وجود مقطع بسیار کوچکی در قسمت زیرین نازل می باشد که ساخت چنین نازلی با دستگاه های متعارف و در دسترس ما از جنس راکت های موجود فلزی سخت و تقریباً ناممکن است در صورتی که به راحتی می توان با ابزار های در دسترس و با استفاده از بتن پرلیتی، آن را ساخت.

واژه های کلیدی: راکت، سوخت جامد، بتن سبک پرلیتی.

## مقدمه

راکت پرتابه‌ای است که با نیروی عکس‌العمل ناشی از خروج گاز (معمولاً ناشی از سوختن سوخت) حرکت می‌کند و شامل دو نوع هدایت شونده و غیر هدایت شونده است. نوع هدایت شونده آن پس از پرتاب، در مسیر خود دارای ماموریت و قادر به هدایت است و نوع غیر هدایت شونده پس از پرتاب و به پایان رسیدن سوخت آن، هدایت‌پذیر نیست و صرفاً بر پایه قوانین پرتابه‌ها یا بالیستیک به سوی هدف می‌رود و به آن بر خورد می‌کند. راکت‌ها مشتمل بر سوخت مایع و جامد هستند که نوع سوخت جامد آن در اساس متشکل از یک بدنه معمولاً استوانه‌ای شکل هستند که از یک ماده جامد آتشگیر پر شده‌اند. در واقع این نوع موشک‌ها فاقد موتور مجزا بوده و کل بدنه نقش موتور یا اتاقک احتراق موشک را بازی می‌کند. در هنگام شلیک یک آتشزنه سوخت درون موشک را مشتعل می‌کند. خروج گازهای داغ از آگزوز موشک باعث حرکت آن به سمت جلو می‌شود سوخت به کار رفته در این موشکها طیف گسترده‌ای را شامل می‌شود که از باروت در موشکهای قدیمی تا خرجهای دوپایه در موشکهای جدیدتر را در بر می‌گیرد. نحوه قرارگیری خرجها در بدنه متنوع است و ممکن است وسط خرج به شکل یک سوراخ مدور، ستاره یا اشکال دیگری باشد (شکل شماره ۲) که هر کدام از این اشکال تراست متفاوتی را ایجاد می‌کنند. ماده‌ای که برای ساخت نازل باید استفاده شود بسیار مهم است چراکه این ماده باید در برابر حرارت و فشار مقاوم باشد. [1] از مزایای این نوع بتن سبک که باعث شد تا به عنوان ساخت نازل به کار گرفته شود، می‌توان به سبک بودن، عایق بودن آن در برابر حرارت بالا و انفجار، عدم شعله ور شدن آن، قابلیت شکل‌پذیری بسیار خوب، عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته در ساخت، اشاره کرد. [2]

پرلیت سبکدانه‌های مصنوعی سنگ آتشفشان شیشه‌ای با ترکیب ریولیتی است که ساختاری بی شکل و غیر کریستالی دارد و نوع منبسط آن سفید رنگ است. نزدیک به ۷۵ درصد آن اکسید سیلیسیم است که در حدود ۳ تا ۵ درصد آب به صورت حبس شده در خود دارد و در اثر حرارت بین ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد آب حبس شده در آن به صورت بخار در می‌آید و خروج این آب حبس شده از داخل ذرات نرم شده سنگ پرلیت سبب می‌شود که حجم آن از ۴ تا ۲۰ برابر افزایش یابد. پرلیت خام پس از انبساط، حجم آن ۱۰ تا ۲۰ برابر افزایش می‌یابد و در هر متر مکعب تقریباً وزنی معادل ۶۰ تا ۱۱۰ کیلوگرم خواهد شد. [3]

از جمله امتیازات ملات ساخته شده توسط سیمان و پرلیت نسبت به ملات معمولی سیمان، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

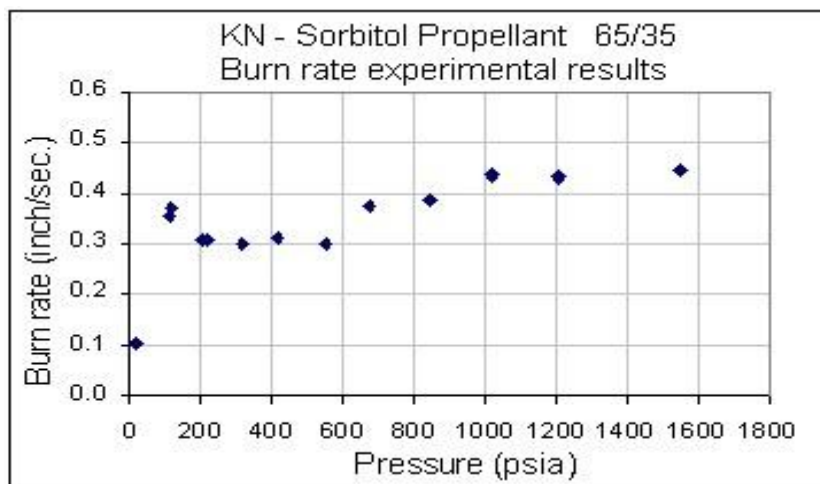
- ۱- وزن آن کمتر از نصف ملات معمولی سیمان است.
- ۲- مقاومت آن در برابر آتش ۴ برابر ملات معمولی سیمان است.
- ۳- ضریب هدایت حرارتی آن ۸ برابر کمتر از ملات معمولی سیمان است. [4]

همچنین بختیاری و همکارانش در پژوهشی نشان دادند که مقاوم‌ترین بتن در برابر آتش و انفجار، بتنی است که شامل دانه‌های پرلیت باشد. آنها نمونه‌های خود را در حرارت‌های بسیار بالا (بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) در یک کوره آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد و مقاومترین آنها را بتن شامل پرلیت معرفی کردند. به طور مثال قطعه‌ای از نوع بتن سبک با وزن فضایی ۷۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم در متر مکعب به راحتی تا ۱۲۷۰ درجه سانتیگراد را تحمل می‌نماید و اصولاً در وزنهای پایین غیر قابل احتراق است. [5]

در مورد راکت‌های سایز کوچک (میکرو تراستر ها) نیز به منظور افزایش سرعت گازهای خروجی نیاز به وجود مقطع بسیار کوچکی در قسمت زیرین نازل می‌باشد که ساخت چنین نازلی با دستگاه‌های متعارف و در دسترس ما از جنس راکت‌های موجود فلزی سخت و تقریباً ناممکن است در صورتی که به راحتی می‌توان با ابزارهای در دسترس و با استفاده از قالب بندی بتن، آن را ساخت. برای آزمایش نازل ساخته شده، نیاز به طراحی یک نمونه راکت آزمایشگاهی داشتیم که در ادامه به طراحی اجزای مختلف آن می‌پردازیم.

## طراحی نمونه راکت آزمایشگاهی

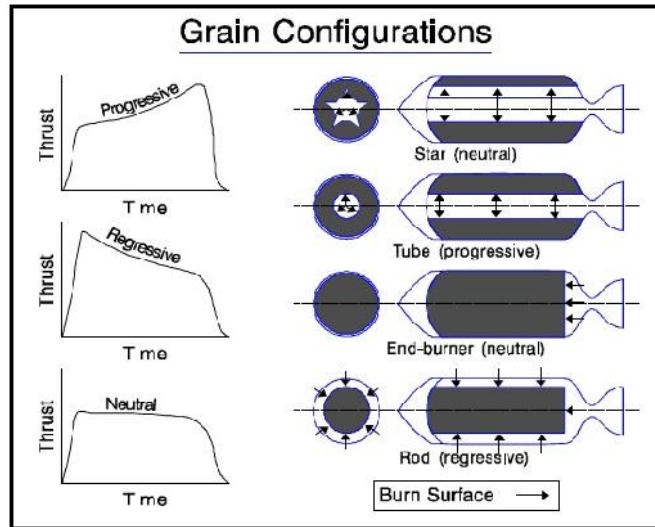
راکت ها از نظر سوخت به دو دسته راکت با سوخت مایع و راکت با سوخت جامد تقسیم می‌شوند. در طراحی این راکت از سوخت های جامد قندی با ترکیب پتاسیم نیترات و سوربیتول استفاده شد که از لحاظ تئوری دمای شعله ای برابر ۱۶۰۰ درجه کلوین دارد. سوخت جامد، برخلاف سوخت مایع به محفظه تزریق نمی‌شود و کل سوخت در خود محفظه به شکل گرین قرار داده می‌شود و پس از احتراق کاملاً در معرض آتش قرار دارد و اگر احتراق شروع شده باشد، دیگر به سختی می‌توان در فرآیند سوختن آن دست برد. [6] تحلیل مقاومت مصالح موشک‌های سوخت جامد، به طور عمده به محفظه احتراق بر می‌گردد، به طوریکه مقاومت آن تحت فشار داخلی و رژیم دمایی تعیین می‌شود. در اثر بارهای اعمالی در طول مسیر، نیازی به تقویت پوسته (نازل) نداریم. چون پوسته انتخابی ما خودبه‌خود محکم و مقاوم است، اما در عوض باید محل اتصال محفظه به قسمت عدسی جلوی راکت (دماغه) تقویت شود. به دلیل بالا بودن مقاومت پوسته در راکت سوخت جامد، در مقایسه با راکت سوخت مایع، از تعداد زیادی از محدودیت‌هایی که در موشک سوخت مایع در قسمت پرواز در اتمسفر وجود دارد، خبری نیست. [7] با توجه به دانستن نرخ تغییرات سرعت سوزش سوخت نسبت به فشار محفظه (شکل شماره ۱)، فشار محفظه احتراق ۷ مگاپاسکال انتخاب شد و قطر گلوگاه معادل ۵ میلی متر و سرعت سوزش ۱۱/۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد.



شکل ۱- نرخ تغییرات سرعت سوزش با زمان

با توجه به این که ابعاد راکت می‌بایست کوچک می‌بود تا امکان ساخت و تست راحت تر فراهم گردد، ارتفاع محفظه ی احتراق موشک ۱۵ سانتیمتر و قطر آن ۳/۸ سانتی متر انتخاب شد. این ابعاد امکان استفاده از لوله های با جنس غیر فلزی را می‌داد که علاوه بر وزن پایین، قیمت پایین و در دسترس بودن، ویژگی های مهمی چون عدم تغییر شکل پلاستیک در اثر مجاورت با حرارت زیاد را داشت و بعلاوه باعث می‌شد که ابعاد راکت از یک استاندارد ابعادی پیروی کند. [8]

در مرحله ی بعد نوع دانه بندی سوخت از نوع درون سوز با مقطع دایره ای انتخاب شد (شکل شماره ۲). با توجه به انتخاب نوع دانه بندی، اندازه قطر داخلی تیوب به عنوان یکی از پارامتر های موثر در زمان سوزش و جرم گاز تولیدی در کنار ابعاد نازل، به عنوان یک عدد ثابت در نظر گرفته شد تا در مراحل بعدی برای انجام تغییرات در نیروی پیشرانش صرفاً با نازل به عنوان تنها متغیر در گیر باشیم. با توجه به موارد گفته شده و در نظر گرفتن برخی موارد فنی در ریخته گری سوخت، قطر تیوب ۲ سانتی متر در نظر گرفته شد و دانه بندی از نوع تیوبی شکل (tube progressive) و درون سوز با مقطع دایره ای باشد (شکل ۳ و ۴). [9]



شکل ۲- دانه بندی های مختلف و ویژگی های سوزش هر کدام.



شکل ۳- نمونه سوخت جامد مورد استفاده

در ادامه با پیش بینی وزن تقریبی راکت (۴۰۰ گرم) و معادله های مربوطه سرعت جریان گاز خروجی را برای دست یابی به نیروی رانش مشخص به دست آوردیم. با توجه به این که ماموریت این راکت حمل محموله یا انجام مانور های سنگین را شامل نمی شد و صرفا استخراج ویژگی های پروازی مورد نظر بود، حد اقل نیروی رانش مورد نیاز برای پرواز راکت در نظر گرفته شد. این میزان در منابع مختلف از ۱.۵ برابر تا ۵ برابر وزن راکت ذکر شده است. برای اطمینان بیشتر از صحت عملکرد راکت، میزان رانش ۵ برابر وزن تخمینی در نظر گرفته شد. [10]

در نهایت با به دست آوردن دهانه ی گلوگاه و سرعت گاز های خروجی، با کمک جداول موجود [11,12]، مساحت خروجی گاز را به دست آوردیم (برای یک راکت مدل با این نوع سوخت جامد از نوع تیوپی، یک سوراخ ۳ میلی متری کافی است). همچنین پارامتر مهم دیگر زاویه ی همگرایی- واگرایی انتهای نازل می باشد که با استفاده از اطلاعات آماری زاویه همگرایی ۶۰ درجه انتخاب گردید. [7] که در نهایت در جدول ۱ اطلاعات بدست آمده از طراحی پارامترهای سوخت و احتراق قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات سوخت مورد استفاده

واحد	پارامترها
sec.	164 ایمپالس های ایده آل
m/sec	938 سرعت آگروز (مشخصه نظری)
deg Celsius	1327 درجه حرارت احتراق (در ۱۰۰۰ psia)
gram/cu.cm.	1.841 تراکم ایده آل
g/mole	39.9 وزن موثر مولکولی آگروز
mm/sec	11.5 نرخ رفتار سوزش (در ۱۰۰۰ psia)
deg. C.	> 300 درجه حرارت احتراق خودکار

قالب بندی راکت

اگرچه می شد نازل را به کمک قالب های فلزی راحت تر و دقیق تر ساخت اما بدلیل ناموجود بودن این نوع قالب خاص و هزینه بالای آن جهت سفارش ساخت، از قالب های پلاستیکی و موجود استفاده کردیم.

با توجه به ابعاد و زوایای به دست آمده از نازل، برای ساخت قالب نازل از لوله های (PVC) و تفلون (TTC) بهره گرفته شد و با استفاده از دستگاه تراش موجود در کارگاه تراشکاری دانشگاه، لوله ی توپر تفلون با ارتفاع مشخص نازل و قطری برابر قطر سوخت جامد (۳/۸ سانتی متر) و انتهای همگرا با زاویه ۶۰ درجه آماده شد. سپس این لوله در داخل لوله (PVC) استوانه ای تو خالی با قطر (۵/۸ سانتی متر) قرار گرفت، تا در فاصله ی یک سانتی متری این دو لوله بتن ریزی شود و پس از عمل آوری، نازل ساخته شود. (شکل شماره ۴). رژیم کاری موتورهای سوخت جامد(نازل راکت) عملاً تابعی از بارهای مسیر نیست و عدم وجود سیستم تزریق آن رابه صوت یک بلوک مجزا در می آورد. بنابراین، نازل راکت سوخت جامد کاملاً از دیگر المانها مستقل است، به طوری که می توان آن را مانند یک مجموعه جدا طراحی کرد. [9] بنابراین انتخاب ضخامت نازل (یک سانتیمتر) با توجه به انتخاب وزن تقریبی ۴۰۰ گرم برای کل راکت بدست آمد.



شکل ۴- قالب های بتن ریزی (سمت چپ) بتن ریخته شده در قالب (سمت راست)

## مصالح مورد استفاده در ساخت نازل

سیمان پرتلند تیپ I از کارخانه اصفهان با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب.

ماسه آهکی ۵-۰ میلیمتر با وزن مخصوص ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با دانه بندی در محدوده استاندارد ASTM C33 5.

ماده هوازا و فوق روان کننده از شرکت Fosroc با وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب.

پرلیت منبسط شده ۳-۰ میلیمتر از کارخانه اصفهان با وزن مخصوص ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۴۷٪.

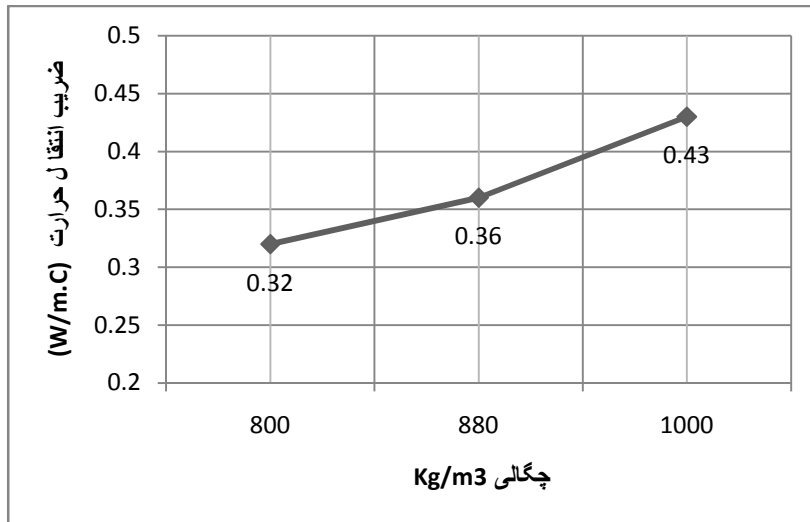
## یافته ها

برای ساخت بتن با این سبکدانه (پرلیت)، نیاز به درصد جذب آب آن و وزن مخصوص ظاهری آن داشتیم که جذب آب پرلیت را در حالت های یک ساعته، شش ساعته و ۲۴ ساعته به دست آوردیم و با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش جذب آب در حالت های مختلف، حالت جذب آب شش ساعته (۴۷٪) را برای طرح اختلاط انتخاب کردیم و پرلیت ها را به صورت اشباع با سطح خشک در طرح اختلاط اضافه کردیم تا از جذب آب طرح اختلاط جلوگیری کرده باشیم. این نوع بتن، به دلیل جذب مایعات بالا، برای استفاده به عنوان نازل برای راکت های سوخت جامد مفید تر است، چرا که در راکت های سوخت جامد، سوخت به محفظه آن تزریق نمی شود و در راکت های سوخت مایع، به دلیل امکان جذب سوخت توسط پرلیت موجود در دیواره های بتن، باید داخل نازل عایق بندی شود که با مشکلاتی همراه است. برای یافتن وزن مخصوص آن نیز از روش سعی و خطا در طرح ریزی اختلاط استفاده کردیم که در نهایت به وزن مخصوص ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب رسیدیم. در این پژوهش، برای به دست آوردن طرح اختلاط بتن ریزی از ACI-211.2 و ACI-318 استفاده شد. چون وزن نازل در رانش راکت از عوامل تاثیرگذار است، هرچه وزن نازل کمتر باشد بهتر است اما نباید وزن کم آن به مقاومت نازل در برابر حرارت های بالا صدمه بزند. بنابراین کاهش وزن و کاهش چگالی بتن تا حدی قابل قبول است که به رانش راکت لطمه وارد نشود. در این پژوهش چند نمونه طرح اختلاط ریخته شد و مورد بررسی قرار گرفت و مناسب ترین نوع آن معرفی گردید که در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات طرح اختلاط و مقاومت فشاری نمونه ها

چگالی خشک Kg/m <sup>3</sup>	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	آب Kg/m <sup>3</sup>	ماسه Kg/m <sup>3</sup>	پرلیت Kg/m <sup>3</sup>	روان کننده/هوازا	مقاومت فشاری ۷ روزه (Mpa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)
۱۰۰۰	۴۵۰	۰/۳۵	۱۴۱/۵	۲۵۱	٪۱	۷/۹۷	۱۱/۲۵
۸۸۰	۴۵۰	۰/۳۵	---	۲۷۰	٪۱	۶/۰۱	۹/۱۹
۸۰۰	۴۰۰	۰/۳۸	---	۲۴۸	٪۱	۴/۹۵	۶/۰۵

همچنین در نمودار ۱، ضریب انتقال حرارت این بتن ها ارائه شده است که با افزایش چگالی، ضریب هدایت گرمایی نیز افزایش پیدا کرده است. بنابر این هرچه چگالی این نوع بتن کمتر باشد، مقاومت آن در برابر گرما بیشتر است.



نمودار ۱ - نمودار ضریب هدایت گرمایی-چگالی

جدول ۳- مقایسه وزنی و چگالی نمونه نازل ها (Kg/m<sup>3</sup>)

نوع بتن	چگالی ۸۰۰	چگالی ۸۸۰	چگالی ۱۰۰۰
وزن نازل خشک (kg)	۰/۲۷۵	۰/۳۰۱	۰/۳۴۵
حجم بتن نازل (m <sup>3</sup> )	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۳۴
چگالی نمونه ها (Kg/m <sup>3</sup> )	۸۰۸/۸۲	۸۸۵/۲۹	۱۰۱۴/۷

در نمونه های ساخته شده با چگالی ۸۰۰ و ۸۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با حذف ماسه و جایگزین پرلیت به جای آن در صد سبک سازی هرچه بیشتر آن برآمدیم از ماده هوازا برای کاهش چگالی بتن و نیز برای کاهش تخلخل نمونه ها و روان سازی هرچه بهتر آنها برای راحت تر ریختن در قالب ها استفاده کردیم.[13] بین سه نمونه نازل ساخته شده، نمونه با چگالی ۸۰۰ را انتخاب کردیم، زیرا وزن نمونه نازل خشک شده آن از نمونه های دیگر سبک تر بوده و به وزن تقریبی آن نزدیک بوده و حذف کردن ماسه در این نمونه کاهش چشمگیری در مقاومت آن نداشته است.(جدول شماره ۳و۲) همچنین با توجه به (نمودار شماره ۱) ضریب انتقال حرارت آن از دو نمونه دیگر کمتر بوده و مقاومت بیشتری در برابر آتش و حرارت دارد.

لازم به ذکر است که تمامی آزمایش ها شامل ساخت قالب و ساخت و تست سوخت جامد و....در کارگاه های تراشکاری، قید و بند و کارگاه هوافضای دکتر حسابی و ساخت نمونه نازل های بتنی در محل کارگاه عمران دانشگاه آزاد واحد خمینی شهر اصفهان انجام شده است.

مشابه این نازل در کارگاه هوافضای دکتر حسابی دانشگاه آزاد خمینی شهر، از مقوای فشرده و یا پلاستیک نیز ساخته شده و درتست های رانش انجام گرفته نیز موفق بوده اما مقوای فشرده و یا پلاستیک فقط برای راکت های کوچک(میکروتراستر ها و راکت های مخصوص آتش بازی و تفریح) جوابگو بوده و برای راکت های بزرگتر و هدف دار، جوابگو نمی باشد و دچار ناپایداری می شود و تا به حال تنها گزینه برای ساخت نازل های بزرگتر از راکت مدل، نازل های جنس فلزی است. اما نازل ساخته شده از بتن پرلیتی، برای ساخت نازل راکت های بزرگتر نیز مورد استفاده است و تنها عیب آن مقاومت محدود کششی است.در این صورت می توان با قالب بندی دقیق فلزی در نمونه های بزرگتر و با آرماتور بندی آنها (به وسیله آرماتور های با قطر بسیار کم مانند آرماتور های اف و حرارت)، کشش ناشی از گاز های خروجی بر بدنه ی نازل را نیز کنترل کرد. چراکه مقاومت کششی این

نوع بتن تا دمای حدود ( $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) تناسب تقریباً ثابتی با مقاومت فشاری دارد، اما با افزایش دما، مقاومت کششی با شدت بیشتری از مقاومت فشاری سقوط خواهد کرد که باید به علت ضعف ناحیه انتقالی باشد. [14]



شکل ۴- سطح مقطع نازل بتن پرلیتی (سمت راست) سطح مقطع نازل مقوای فشرده (سمت چپ)

### نتیجه گیری

پهنا و گستره ی استفاده از انواع بتن در صنعت بسیار زیاد است و تقریباً در موارد مشابه، نوعی بتن خاص دوام و پایداری نزدیک به نمونه های مشابه مورد استفاده خود را پیدا کرده است در صورتی که بسیار اقتصادی تر و در دسترس تر است. با توجه به موارد مورد بررسی و نتایج به دست آمده از ساخت نازل از جنس بتن پرلیتی، می توان گفت بتن پرلیتی می تواند ماده ی اقتصادی و در دسترس و مناسبی برای ساخت نازل های راکت سوخت جامد با ابعاد کوچک و متوسط از نوع غیر هدایت شونده باشد چرا که این نوع بتن از مقاومت و دوام قابل قبولی در مقابل حرارت بالای ناشی از احتراق سوخت برخوردار می باشد. همچنین می توان آن را برای راکت های بزرگتر سوخت جامد غیر هدایت شونده تعمیم داد و مشکلات ناشی از محدود بودن مقاومت کششی و یا مقاومت در برابر حرارت های بسیار بالاتر را به راحتی حل کرد و با قالب بندی فلزی بهتر می توان بالچه هایی را روی بدنه نازل برای کنترل بهتر آن تعبیه کرد و می توان حتی دماغه راکت را از بتن پرلیتی ساخت چراکه در این نوع راکت به علت سرعت کم آن در هوا دماغه کاملاً نوک تیز نمی باشد و مدور است. بنابراین می توان یک راکت سوخت جامد با پوسته تمام بتنی شامل نازل و دماغه بتنی تهیه کرد و برای اتصال آنها از ملات شامل چسب بتن برای چسبندگی بهتر استفاده کرد. این نوع بتن به دلیل جذب مایعاتی چون سوخت داخل محفظه راکت سوخت مایع، برای راکت های سوخت جامد طراحی شده است اما می توان آن را برای راکت های سوخت مایع نیز به کار برد. لازمه این کار این است که عایق بندی داخلی نازل برای جلوگیری از جذب سوخت مایع توسط پرلیت های موجود در بتن انجام شود. همچنین با مطالعات زمین شناسی به دست آمده می توان گفت منابعی غنی از پرلیت در کشور ایران وجود دارد که می توان استفاده از آن را مقرون به صرفه دانست.



## مراجع

- 1-Sutton, George p., and Oscar Biblarz, Rocket propulsion elements, 7th Edition, December 29, 2000, vol 1.
2. ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
۳. قربانی م، پرلیت و پوکه های معدنی، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات زمینی کشور، ۱۳۸۷.
۴. زندی یوسف، استفاده از پرلیت به عنوان مصالح بومی در سبک سازی وزن بتن همراه با قابلیت افزایش مقاومت آن. اولین همایش بین المللی زلزله و سبک سازی ساختمان- دانشگاه قم.
۵. بختیاری سعید، اله وردی علی، رضانیانپور علی اکبر، مروری بر رفتار انواع بتن در برابر آتش، مجله علمی ترویجی انجمن مهندسی شیمی.
- 6-leo ,T. s.,. And Wang, c.-t.,. and Sun, J.-M.,. optimal design and operation on convergent-devergent nozzle type no-moving-parts valves (NMPV) in micro channel.
۷. جان جیمز، دینامیک گازها، ترجمه علی اکبر عالم رجبی، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ویرایش دوم، ۱۳۸۰.
8. Eugene I, Fleeman , Tactical missile design , 2nd ed, 2002.
9. National Association of Rocketry web site: <http://nar.org>.
10. rules Judge Reggie B. Walton, APCP not an explosive , Planet News. 16 March 2009. Retrieved 9 September 2010.
11. Tamir Hassan, Phillips jay, Potassium nitrate based rocket propulsion, 2011,
۱۲. محمدی همایون، زمانی مصطفی، شادآرام عبدا...، بررسی عددی جریان داخلی موتور های سوخت جامد DTM در شروع راه اندازی، اولین کنفرانس انجمن پيشران‌ش هوافضا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۹ آذر ۱۳۹۱.
13. ACI-212.4R, Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete, American Concrete Institute; 2004.
۱۴. بختیاری سعید، بررسی رفتار و مقاومت انواع بتن در برابر آتش، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۶.