

تهیه سوخت ژل UDMH با استفاده از نانو ذرات آلومینیوم و بررسی خواص رئولوژیکی آن

نرگس قبادی^۱، علی صابری مقدم^{۲*}، مجید شیخی نارانی^۳، حجت شفیق زاده^۴

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۸۹/۸/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۱)

چکیده

در این مقاله، تهیه سوخت ژل دی متیل هیدرازین نامتقارن حاوی ذرات آلومینیوم 50 و 130 نانومتری مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع یکنواخت نانو ذرات آلومینیوم در سوخت ژل از مهم‌ترین اهداف این پژوهش می‌باشد. توزیع یکنواخت ذرات فلزی در کیفیت احتراق سوخت تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که روش اختلاط التراسونیک - مکانیکی - مغناطیسی مناسب‌ترین روش ساخت می‌باشد. ژل ساخته شده با این روش از پایداری و همگنی خوبی برخوردار بود. اندازه‌گیری‌های رئومتری نشان داد که ژل ساخته شده دارای خواص تیکسوتروپیکی و نازک شونده‌گی برشی است. داده‌های رئومتری به دست آمده حاصل از ژل‌های ساخته شده مطابقت خوبی با مدل توانی^۵ نشان داد. در تطبیق داده‌ها با مدل توانی شاخص شبه پلاستیک (n) برابر 0/56 و 0/63 به ترتیب برای ژل حاوی ذرات 50 و 130 نانومتری در دماهای مختلف به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: سوخت ژل، ژل کننده، دی متیل هیدرازین نامتقارن، متیل سلولز، خواص رئولوژیکی.

1- مقدمه

پیشرانده‌های ژل به دلیل مزایای قابل توجهی که نسبت به پیشرانده‌های متعارف مایع دارند، در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]. یکی از این برتری‌ها، امکان افزودن ذرات جامد پراثرزی نظیر پودر آلومینیوم به آن‌ها است که موجب افزایش دانسیته و ایمپالس ویژه می‌گردد [3-1]. افزایش ایمنی، عدم ایجاد تلاطم در مخازن سوخت و اکسید کننده، عدم نشستی سوخت در اثر سوراخ شدن مخزن، کاهش نرخ تبخیر، احتراق کامل‌تر سوخت، افزایش دانسیته، افزایش ایمپالس ویژه و بهبود گرمای احتراق سوخت از جمله مزایایی است که با ژل نمودن پیشرانده‌های مایع می‌توان به

آن‌ها دست یافت [4-6].

تشکیل ژل معمولاً ناشی از ایجاد پیوندهای فیزیکی مانند هیدروژنی یا واندروالس می‌باشد که این پیوندها به صورت یک شبکه 6 در تمام فاز مایع گسترش یافته و باعث محصور شدن مایع در آن می‌گردد. در شکل (1) به عنوان نمونه، نحوه تشکیل ژل با استفاده از ژل کننده‌های دانه‌ای⁷ سیلیکا نشان داده شده است. سطح سیلیکا دارای خاصیت آبدوستی⁸ بوده و هنگام تماس با مایعات خالص موجب تشکیل گروه‌های شیمیایی هیدروکسیل ایزوله شده و گروه‌های سالیوکسان در سطوح سیلیکا می‌شود و نهایتاً ضمن تشکیل پیوندهای هیدروژنی باعث تشکیل ژل می‌گردد. به دلیل پیوندهای

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

۳- مربی

* E-mail: Saberi_mogh@yahoo.com

5- Power Law

6- Matrix

7- Particulate Gellants

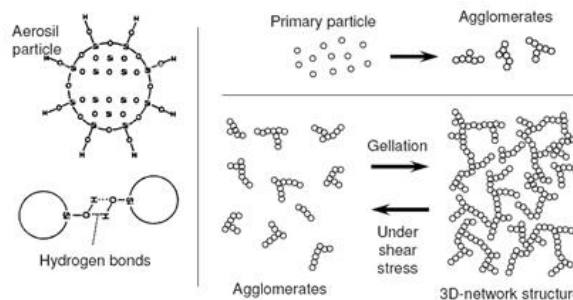
8- Hydrophilic

یکس یانگ و همکاران با استفاده از سیستم همزن‌های الکترومغناطیسی - التراسونیک موفق به ساخت پیشراشه ژل کروژین شدند و توانستند از توده‌ای شدن و به هم چسبیدن نانو ذرات آلومینیوم در سوخت ژل کروژین ممانعت کنند [11]. در گزارش آن‌ها تأکید شده که سیستم‌های همزن الکترومغناطیسی - التراسونیک به صورت توأم در پراکنده‌سازی ذرات عمل کرده‌اند و لذا استفاده هم‌زمان از این دو نوع همزن، اهمیت زیادی در اختلاط موثر جهت ساخت نانو ژل دارد. ونگ² و همکاران نیز با بهره‌گیری هم‌زمان از سیستم اختلاط التراسونیک و مکانیکی موفق به ساخت ژل هگزان و همچنین هیدروژن شدند [12]. در ساخت ژل هگزان با استفاده از همزن التراسونیک به پراکنده ساختن نانو ژلنت اقدام گردید. در سوخت ژل هیدروژن نیز با بهره‌گیری از همزن التراسونیک، پراکنده‌سازی نانو ذرات پراثری آلومینیوم صورت گرفت. در این سوخت ابتدا نانو ذره با سوخت مایع مخلوط شده و سپس ذرات میکرونی ژلنت در مخلوط مایع پراکنده شده‌اند. سوخت ژل MMH³ نیز با استفاده از ماده ژل کننده نانویی BTMSE⁴ توسط کروفت و همکاران ژل گردید [13].

کوگیل و همکاران وی نیز توانستند سوخت‌های ژل DMAZ و کروژین حاوی نانو ذرات آلومینیوم را بسازند [14]. ژل کننده این سوخت‌ها اکسید سیلیسیوم بود و نانو آلومینیوم Alex نیز در هر دو سوخت بکار برده شد. ساخت این سوخت‌ها با بهره‌گیری از همزن رزونانس صوتی صورت گرفت. جهت ساخت این سوخت، ابتدا سوخت مایع به همراه فعال کننده سطحی و نانو پودر آلومینیوم وارد رآکتور گردیده و سپس پودر ژل کننده بر روی آن‌ها ریخته شده و نهایتاً همگی به صورت یکجا مخلوط شده‌اند. فرآیند کردن همه این مواد به طور یکجا به دلیل توان چند برابر همزن رزونانس صوتی نسبت به همزن التراسونیک بوده است. این همزن توانسته به طور هم‌زمان هم توده‌های به هم چسبیده فلزی و هم ذرات ژلنت را در هم شکسته و در سوخت مایع پراکنده سازد. زمان انجام فرآیند ساخت حدود 10 دقیقه اعلام گردیده است.

سوخت‌های هیدرازینی به دلیل گرمای احتراق مناسب و هایپرگول بودن مورد توجه می‌باشند [15-17]. یکی از این سوخت‌ها دی متیل هیدرازین نامتقارن (UDMH)⁵ است. ژل UDMH با ذرات میکرونی آلومینیوم (37/5، 20 و 1 میکرون) قبلاً توسط صابری و همکاران ساخته شده و تست‌های

هیدروژنی تشکیل شده بین ذرات سیلیکای پخش شده در فاز مایع، ویسکوزیته افزایش یافته و سیستم رفتار تیکسوتروپیکی از خود نشان می‌دهد. با اعمال نیروهای برشی، پیوندهای هیدروژنی از بین رفته و در نتیجه ویسکوزیته کاهش می‌یابد. هر چند با حذف نیروهای برشی از سیستم، توسعه دوباره پیوندهای هیدروژنی منجر به افزایش ویسکوزیته می‌گردد [7 و 8].



شکل 1- مکانیسم ساختاری تشکیل ژل با استفاده از ژل کننده سیلیکا [7].

کیفیت شبکه تشکیل شده بر اثر به هم پیوستن ذرات ژل کننده تابعی از پارامترهای زیر می‌باشد [8]

- طبیعت مایع خالص
- غلظت عامل ژل کننده
- درجه پخش شدگی¹
- دمای سیستم

گر چه بیشتر تحقیقات صورت گرفته در سال‌های گذشته بر ساخت پیشراشه‌های ژل با ذرات پر انرژی میکرونی متمرکز بوده است [3 و 1] اما به منظور افزایش راندمان احتراق سوخت ژلی، بهبود خواص رئولوژیکی و کاهش ته مانده‌های جامد حاصل از احتراق برخی تحقیقات نیز بر روی ساخت ژل با ذرات نانو انجام گرفته است [4-6]. در سال‌های اخیر جهت افزایش راندمان سیستم پیشرانس فضایی‌ها و موشک‌ها، نانو سوخت‌های فلزی نظیر پودر آلومینیوم به پیشراشه‌های مایع ژل اضافه شده که منجر به بهبود پارامترهای موثر بر کارایی پیشراشه شده است.

برخی گزارش‌ها در خصوص استفاده از نانو ذرات پر انرژی در سوخت‌های ژل پر کاربرد نفتی، هیدرازینی و هیدروژنی انتشار یافته‌اند [9-11]. لیو

1 - Degree of Dispersion

2- Kristopher

3 - Mono Methyl Hydrazine

4 - Bis-Tri Methoxy Silyle Ethane

5 - Unsymmetrical- Di Methyl- Hydrazine

استفاده گردید. در سیستم اختلاط غیر هم‌زمان التراسونیک-مغناطیسی، ابتدا همزن مغناطیسی به مدت 6 دقیقه با سرعت 200rpm و سپس همزن التراسونیک به مدت 6 دقیقه با توان و پالس سابق الذکر مخلوط را هم زدند [19]. پایدارترین سوسپانسیون که توزیع بسیار خوبی از نانو ذرات آلومینیوم را در پی داشت با روش اختلاط هم‌زمان مغناطیسی- التراسونیک به دست آمد.

گرچه گزارشات موجود حاکی از عدم واکنش سوخت‌های هیدرازینی با نانو ذرات آلومینیوم هستند [20] ولی با توجه به تمایل بالای نانو ذرات جهت حضور در واکنش‌ها، مناسب دیده شد تا تست واکنش‌پذیری نانو ذرات آلومینیوم با UDMH در شرایط متعارف مورد بررسی قرار گیرد. البته نانو ذرات آلومینیوم Alex مورد استفاده دارای پوششی از اکسید آلومینیوم بودند، لذا واکنش بین این ماده و UDMH که بازی ضعیف است کاملاً غیر محتمل می‌باشد. ولی با این وجود جهت کسب اطمینان از عدم وقوع واکنش در شرایط آزمایش، واکنش‌پذیری نانو ذرات آلومینیوم با UDMH مورد بررسی قرار گرفت.

جهت انجام آزمایش ابتدا سیستم با استفاده از گاز ازت شسته شد و دمای حمام آب در 20°C تنظیم گردید. سپس سوسپانسیون (50 nano) UDMH - Al که به مدت 6 دقیقه با استفاده از همزن‌های التراسونیک (40 درصد توان بیشینه و 40 پالس در ثانیه) و مغناطیسی (300rpm) ساخته شده بود در ارلن ریخته شد. ارلن در حمام 20°C قرار داده شد و به مدت سه شبانه روز در همین شرایط نگهداری گردید.

در طی این مدت هیچ گونه تغییری در ارتفاع روغن سیلیکونی رخ نداد که نشان دهنده عدم وقوع هر گونه واکنش منجر به تولید گاز است. جهت بررسی واکنش‌های احتمالی دیگر که بدون تولید گاز صورت پذیرفته باشند نانو ذرات آلومینیوم موجود که به صورت کلوخه بودند به شکل پودر در آمده و جهت جداسازی گازها و یا سوخت احتمالی به دام افتاده در میان ذرات به مدت 12 ساعت در آون خلأ (40°C تحت دمای 40°C و خلأ 200 mbar) قرار داده شدند.

آن گاه جامد باقی‌مانده توزین و مشاهده شد که جرم رسوب بسیار نزدیک به مقدار اولیه پودر آلومینیوم است که می‌تواند دلیلی بر عدم تشکیل ترکیب جدید در فاز جامد به دلیل واکنش میان نانو آلومینیوم و UDMH باشد.

کنترل کیفی را با موفقیت گذرانده است [18 و 3]. با توجه به آثار ناشی از کوچک شدن اندازه ذرات فلزی تا حد نانو، روش ساخت سوخت ژل حاوی نانو ذرات دارای ویژگی‌های متمایزی با روش ساخت سوخت با ذرات میکرونی است. گرچه ساخت ژل با استفاده از ذرات نانو برای کروسین [10]، مونو متیل هیدرازین [2] و نیترومتان [9] گزارش شده است، اما گزارشی در خصوص ساخت ژل UDMH (که از نظر ایمنی بهتر از هیدرازین و مونو متیل هیدرازین است) با استفاده از ذرات نانو موجود نمی‌باشد. در این تحقیق سوخت UDMH با توجه به اهمیت و کاربرد وسیع آن، با استفاده از نانو ذرات آلومینیوم و ژل کننده متیل سلولز¹ مطابق با روشی مناسب ژل گردید و خواص رئولوژیکی، پایداری، همگنی و برگشت‌پذیری ژل‌های ساخته شده مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج رئولوژیکی با بهره‌گیری از مدل توانی بررسی شدند و پارامترهای مدل از تطبیق نتایج آزمایشگاهی بدست آمدند.

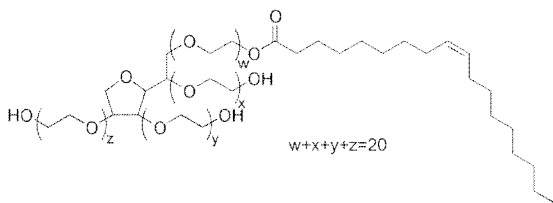
2- بخش تجربی

نانو آلومینیوم به کار رفته دارای دو اندازه مختلف 130 و 50 نانومتر (ساخت شرکت Federation- Russian - ATP/TECHNOLOGIES) بود. صحت اندازه‌های داده شده توسط شرکت فروشنده با تعیین توزیع اندازه ذرات توسط دستگاه HORIBA LB-550 مورد تایید قرار گرفت. گزارش شده است که سیمولنت MC-H₂O رفتار رئولوژیکی شبیه ژل UDMH دارد [18]. لذا قبل از انجام آزمایشات اصلی، سیمولنت حاوی نانو ذرات آلومینیوم ساخته شد تا روش مناسب جهت توزیع یکنواخت ذرات در توده ژل به دست آید. گام اول در ساخت سیمولنت ژل ایجاد سوسپانسیون پایدار از نانو ذرات آلومینیوم در آب بود. برای این منظور سه روش زیر مورد بررسی واقع شدند: 1- هم زدن التراسونیک، 2- هم زدن هم‌زمان مغناطیسی- التراسونیک و 3- هم زدن غیر هم‌زمان از طریق التراسونیک- مغناطیسی.

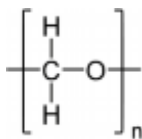
به منظور اختلاط پودر آلومینیوم و آب، پس از ریختن نانو پودر آلومینیوم در آب، مخلوط به مدت 6 دقیقه در دمای 23°C با روش مورد نظر هم زده شد. در روش اختلاط آلتراسونیک از همزن التراسونیک مدل UP400S با فرکانس کاری 24 کیلو هرتز و 40 درصد توان خروجی و پالس 0/4 استفاده شد. در سیستم اختلاط هم‌زمان التراسونیک- مغناطیسی از همزن التراسونیک با شرایط مذکور و از همزن مغناطیسی با سرعت 200rpm

1- Methyl Cellulose

[22]. گرمای احتراق فعال کننده سطحی Tween-80 معادل با گرمای احتراق نمونه مشابه آن یعنی پلی اکسی متیلن (17390J/g) در نظر گرفته شد، زیرا همان‌طور که در شکل‌های (2) و (3) نشان داده شده است گروه‌های عاملی موجود در هر دو پلیمر شباهت زیادی به هم داشته و با توجه به اینکه درصد کمی از Tween-80 در فرمولاسیون پیش‌رانه بکاربرده شده است، می‌توان گرمای احتراق آن را با گرمای احتراق پلی اکسی متیلن تخمین زد [23].



شکل 2- فرمول ساختاری Tween-80 [26].



شکل 3- فرمول ساختاری پلی اکسی متیلن [26].

زنجیره‌های پلیمری این ترکیب مانند جاروبی با موهای نرم و انعطاف پذیر است و طوری عمل می‌کند که مانع تجمع ذرات می‌شود [21]. برای ساخت نمونه‌ای از ژل‌های UDMH بدین طریق عمل شد: UDMH با دمای 20°C - 15 به درون ظرف مخصوص انجام فرآیند التراسونیک ریخته شد، همزن مغناطیسی با دور 100 rpm روشن شد، پس از 3 دقیقه فعال کننده سطحی (1 و 3 درصد) به منظور جلوگیری از توده شدن و به هم چسبیدن نانو ذرات اضافه گشت، پودر نانو آلومینیوم (130 و 50 نانومتر) که برای تماس کمتر با هوا و پرهیز از چسبیدن ذرات به یکدیگر در پلاستیک‌های زیپ کیپ² قرار داده شده بود، در مدت حدود یک دقیقه به طور یکنواخت به محلول اضافه شد، در حین افزایش نانو ذرات آلومینیوم به محلول به منظور پخش بهتر آن دور همزن به 300rpm افزایش یافت و همزن آلتراسونیک با توان خروجی 40 درصد و پالس 0/4 سوسپانسیون را به مدت 6 دقیقه بهم زد. با توجه به اینکه حجم نمونه 100cm^3 بود، از سونوترود H7/Tip7 با قطر 7mm جهت اختلاط و پراکنده‌سازی نانو ذرات استفاده شد. ظرف حاوی سوسپانسیون نانو آلومینیوم - UDMH به رآکتور

2- Zip-kip

به منظور بررسی محصولات جدید در فاز مایع در اثر واکنش احتمالی UDMH با نانو ذرات آلومینیوم، فاز مایع توسط دستگاه GC مورد آنالیز قرار گرفت و از مقایسه پیک‌های حاصل با پیک‌های بدست آمده از آنالیز UDMH خالص مشاهده شد که هیچ محصول جدیدی ایجاد نشده است. لذا به نظر می‌رسد که در شرایط آزمایش به کار رفته در این تحقیق برای ساخت ژل‌های UDMH حاوی ذرات نانو، واکنش بین ذرات آلومینیوم و UDMH غیر محتمل می‌باشد.

با توجه به وجود برخی گزارشات مبنی بر افزایش دمای محلول تحت فرآیند التراسونیک [11] و نیز با توجه به فراریت زیاد UDMH و آتش‌گیر بودن آن، افزایش دمای محلول آب هم حجم UDMH در شرایط مورد نظر آزمایش (40 درصد از توان بیشینه و 40 پالس در ثانیه به مدت 6 دقیقه) مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده گردید که افزایش دما در حدود 7°C می‌باشد، که با توجه به وجود حمام آب سرد در هنگام ساختن ژل UDMH و نیز بهره‌گیری از اتمسفر گاز خنثی در داخل ظرف واکنش، این مقدار انرژی نمی‌تواند برای ساخت ژل UDMH مشکل آفرین باشد.

با بهره‌گیری از آزمایشات مقدماتی برای ساخت ژل‌های UDMH حاوی نانو ذرات، ابتدا با استفاده از روش التراسونیک - مغناطیسی، سوسپانسیون UDMH- Al تهیه شد و سپس این سوسپانسیون جهت افزودن ژل کننده به رآکتوری مجهز به حمام آب و همزن مکانیکی منتقل گردید. برای ساخت نمونه در این تحقیق ژل‌های UDMH با کدهای الف و ب تهیه شدند. ژل "الف" از یک درصد فعال کننده سطحی، 7/5 درصد ژل کننده متیل سلولز و 5 درصد پودر آلومینیوم با اندازه متوسط 130 نانو متر و نمونه "ب" از سه درصد فعال کننده سطحی، 7/5 درصد ژل کننده متیل سلولز و 5 درصد پودر آلومینیوم با اندازه متوسط 50 نانو متر ساخته شدند.

ژل کننده متیل سلولز با نام تجاری MC-1500 ساخت شرکت Merk با میانگین اندازه ذرات 63 میکرون بود که ویسکوزیته محلول دو درصد آن در آب در دمای 20°C برابر 1500cP است.

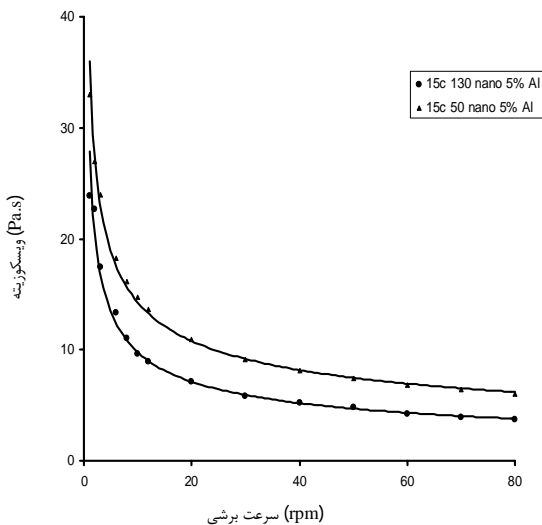
فعال کننده سطحی مورد استفاده در این تحقیق با نام تجاری Tween-80¹ با چگالی 1/08 گرم بر سانتیمتر مکعب در دمای 20°C درجه سانتی‌گراد و نقطه جوش 100°C ، ساخت شرکت Merck بود. این ماده جهت تر نمودن و نفوذ ذرات کلوخه آلومینیوم به درون ژل مورد استفاده قرار گرفت [21] تا ذرات فلزی به این وسیله بتوانند به خوبی در تمام نقاط ژل جای گیرند

1- Polyoxyethylene Sorbitan Monooleate

سانتریفیوژ برای مدت 30 دقیقه، این کاهش طبیعی به نظر می‌رسد. سپس از مقاطع سطح، وسط و عمق ژل نمونه برداری شد و نمونه‌ها توزین گردیدند و به مدت 24 ساعت در دمای 30°C و خلأ 400mbar- قرار داده شدند و نهایتاً جامد خشک بر جای مانده از آن‌ها توزین گردیدند. نتایج نشان داد که تحت شرایط اعمال شده تنها مقدار ناچیزی (کمتر از 5 درصد) از ذرات جامد از لایه‌های بالایی به لایه‌های زیرین در هر دو ژل منتقل گردیده است.

3-2- بررسی خواص رئولوژیکی سوخت ژل UDMH-AI

ویسکوزیته نانو ژل‌ها با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد¹ مدل LVDV-II Pro اندازه‌گیری شد و تغییرات ویسکوزیته با rpm (متناسب با سرعت برشی) در دماهای مختلف رسم گردید. همان‌طور که در شکل (4) برای دمای 15°C مشاهده می‌شود، ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد که نشانه وجود خاصیت نازک شونده برشی² است. این خاصیت در سایر دماها هم مشاهده گردید.



شکل 4- تغییرات ویسکوزیته ژل حاوی 5 درصد آلومینیوم با rpm (متناسب با سرعت برشی) در دمای 15°C .
(نمونه الف) ژل حاوی 5 درصد آلومینیوم 130 نانو متر.
(نمونه ب) ژل حاوی 5 درصد آلومینیوم 50 نانو متر.

یک خاصیت رئولوژیکی مهم در پیشراهنه‌های ژل، قابلیت بازگشت پذیری می‌باشد. مطالعه این خاصیت با اعمال سرعت‌های برشی مختلف در دو مسیر رفت و برگشت در دمای ثابت صورت گرفت. از آنجا که معمولاً مسیر رفت و

مخصوص ساخت ژل اضافه شد و پس از اطمینان از عدم وجود نشتی، سیستم توسط گاز نیتروژن شسته شد و همزن مغناطیسی با سرعت 350rpm و همزن مکانیکی (مدل Heidolf ساخت کشور آلمان با قابلیت تنظیم در دو حالت دور کند و تند) با سرعت 400rpm روشن شدند. در نهایت، ژل کننده MC به سوسپانسیون اضافه شد. تیغه‌های همزن از نوع توربینی با دو ردیف عمود بر هم بودند تا هر چه بیشتر موجب شکسته شدن تجمعات ذرات شوند. چرخش همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه در خلاف جهت همزن مغناطیسی ادامه یافت تا با اعمال تنش‌های برشی قوی به ژل باعث جدا شدن ذرات به هم چسبیده ژل کننده گردد. نهایتاً هر دو همزن خاموش شده و ژل به مدت 24 ساعت دست نخورده باقی ماند.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی همگنی و پایداری سوخت ژل UDMH-AI

به منظور بررسی همگنی ژل، پس از گذشت 24 ساعت از ساخت هر نمونه اقدام به نمونه برداری از سطح، وسط و عمق ژل‌ها گردید. نمونه‌ها توزین شده و سپس در آن خلأ تحت دمای 30°C و خلأ 400mbar- به مدت 24 ساعت قرار داده شدند. نهایتاً باقی‌مانده، خشک و توزین گردید تا میزان جامد خشک بر جای مانده از هر مقطع بدست آید. نتایج بدست آمده نشان داد که همگنی خوبی بین مقادیر خشک باقی‌مانده هر سه مقطع برای هر دو نمونه ژل "الف" و "ب" وجود دارد و لذا ژل‌های ساخته شده از همگنی و یکنواختی مطلوبی برخوردارند.

جهت بررسی توانایی شبکه ژلی در نگهداری ذرات جامد در طول مدت انبارداری و یا هنگام اعمال شتاب‌های ناگهانی در زمان پرتاب موشک از تست پایداری استفاده می‌شود. تست پایداری معمولاً در شتاب 500g به مدت 30 دقیقه صورت می‌گیرد [14 و 3]. به منظور انجام تست پایداری از دستگاه سانتریفیوژ استفاده شد و برای مدت 30 دقیقه دستگاه در دور 2800rpm (معادل شتاب اعمال شده 500g) قرار داده شد. با بررسی ظرف نمونه هیچ گونه جاشدگی مایع از ژل (پدیده سینرسیس) مشاهده نگردید. با توزین نمونه ژل پس از انجام تست پایداری و مقایسه آن با وزن نمونه قبل از تست، مشخص گردید که حدود 7 درصد UDMH تبخیر گردیده است که با توجه به فرارپذیری زیاد UDMH و باز بودن درب ظرف نمونه در دستگاه

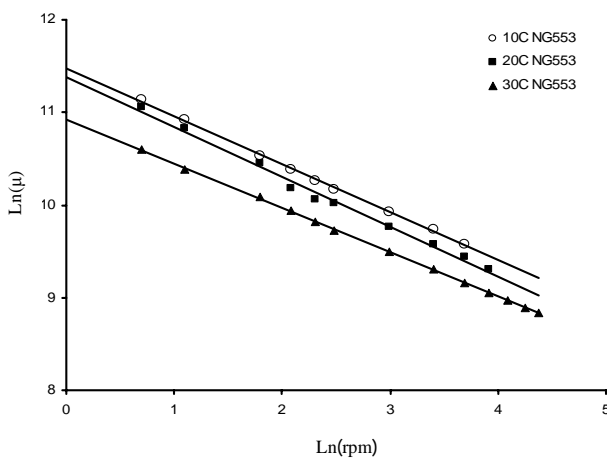
1- Brookfield

2- Shear Thinning (pseudo plastic)

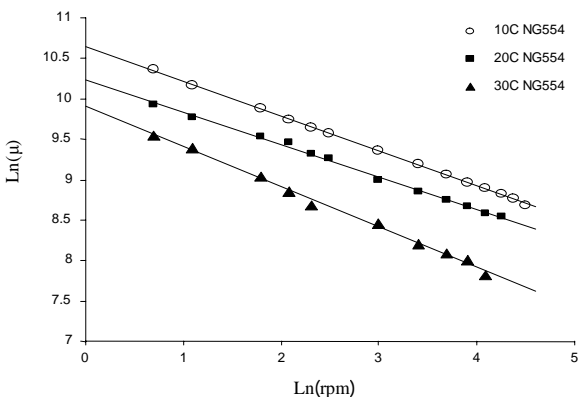
مطابق با معادله (2) است. بر این مبنا با رسم نمودارهای لگاریتمی ویسکوزیته در مقابل سرعت برشی، می توان خط‌هایی بدست آورد که شیب آن‌ها برابر با $(n-1)$ و عرض از مبدأ آن‌ها متناسب با k باشد.

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

شکل های 6 و 7 (رسم لگاریتمی ویسکوزیته بر حسب rpm) نشان می‌دهند که هماهنگی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل (خطوط) وجود دارد ($R^2 > 99\%$) و لذا با اطمینان قابل قبولی می‌توان شیب و عرض از مبدأ را به عنوان مقادیری متناسب با ثوابت معادله توانی برای هر دما بدست آورد.



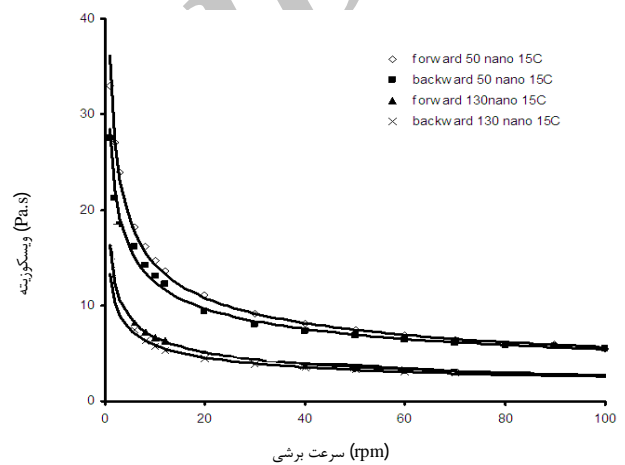
شکل 6- نمودار لگاریتمی ویسکوزیته بر حسب rpm برای نمونه (الف) در دماهای 10، 20، 30°C.



شکل 7- نمودار لگاریتمی ویسکوزیته بر حسب rpm برای نمونه (ب) در دماهای 10، 20، 30°C.

برگشت کاملاً بر هم منطبق نیستند، لذا بین این دو، حلقه‌ای به وجود می‌آید که به حلقه هیستریسیس¹ معروف است. مساحت این حلقه متناسب با خاصیت تیکسوتروپیک ژل می‌باشد، یعنی هر قدر مساحت حلقه بیشتر باشد خاصیت تیکسوتروپیک ژل (وابستگی خواص رئولوژیکی به زمان) بیشتر می‌باشد.

در شکل (5) حلقه هیستریسیس برای دو ژل حاوی 5 درصد ذرات آلومینیوم 130 و 50 نانو متر در دمای 15°C رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که هر دو ژل دارای خاصیت برگشت‌پذیری خوبی هستند. کم بودن مساحت سطح حلقه هیستریسیس نیز بیانگر خاصیت تیکسوتروپیک نسبتاً ضعیف برای هر دو ژل است.



شکل 5- مقایسه حلقه هیستریسیس دو نمونه ژل "الف" و "ب" در دمای 15°C.

اغلب محققین ذکر کرده‌اند که مدل توانی می‌تواند رفتار رئولوژیکی پیش‌رانه ژل هیدرازینی نظیر UDMH با خاصیت نازک شوندگی برشی را پیش‌بینی کند [19، 24، 25 و 3 و 14].

برای سیالاتی که دارای خاصیت نازک شوندگی برشی هستند، مقدار n در محدوده $0 < n < 1$ می‌باشد [27 و 28]. تطبیق نتایج رئومتری حاصله از ژل‌های UDMH ساخته شده با ذرات نانو با مدل توانی نشان داد که هماهنگی بسیار خوبی با این مدل وجود دارد. در مدل توانی داریم:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

که در این رابطه τ تنش برشی، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی، K شاخص پایداری و n شاخص شبه پلاستیک هستند. رابطه ویسکوزیته ظاهری با تنش برشی

1- Hysteresis Loop

130 نانو متر تقریباً 0/63 محاسبه گردید. مقدار شاخص پایداری نیز برای هر دو نمونه با افزایش دما کاهش یافت.

جدول 1- ضرایب شاخص شبه پلاستیک (n) و شاخص پایداری (k) برای ژل‌های حاوی 5 درصد آلومینیوم 130nm (نمونه الف) و 5 درصد آلومینیوم 50nm (نمونه ب) در دمای 10، 20 و 30 °C.

30 °C		20 °C		10 °C		کد نمونه
K	n	K	n	K	n	
8/46	0/65	9/91	0/64	10	0/62	الف
10/567	0/54	10/424	0/55	10/645	0/57	ب

مراجع

- [1] Varghase, T. L.; Gaidhar, S. C.; John D.; Jose Kutty J.; Muthiah R. M.; Rao, S. S.; Nian, K. N.; Krishnamurthy, V. N. "Developmental Studies on Metalized UDMH and Kerosene Gel Propellant.", Defence Sci. J. 1995, 45(1), 25-30.
- [2] Plaszewski, Bryana "Metalized Gelled Propellant :Historical and Future Developments."; Invited plenary Lecture, Presented at 8th International Workshop on Combustion and Propulsion, (2002).
- [3] حاجیلری، نسیمه؛ صابری مقدم، علی؛ "بررسی اثر اندازه و مقدار پودر آلومینیوم بر رفتار رئولوژیکی پیشرانۀ ژل UDMH"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهار 1386.
- [4] [http:// Eltron Research & Development Inc](http://Eltron Research & Development Inc), "High Impulse Nanoparticulate-Based Gel Propellants", (2007).
- [5] Starkovich, J. "Nanoparticulate Gellants for Metalized Gelled Liquid Hydrogen with Aluminum", NASA, (2000).
- [6] Coguill, S. L. "Synthesis of Highly Loaded Gelled Propellants.", Resodyn Corporation, 1901 South Franklin, Butte MT (406) 723-2222, pp. 2089-2098, (2004).
- [7] Glenn, R. "Nano Gellant Material.", NASA, FBO Daily Issue of January, 09, (2002).
- [8] Natan, B. "Gel Propellants, Introduction.", Faculty of Aerospace Engineering Techno, 2009.
- [9] Arnold, R.; Santos, H. S.; Kubal, T.; Campanella, O. E.; Anderson, W. "Investigation of Gelled JP-8 and RP-1 Fuels.", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2009 .
- [10] Ulrich, T; Forter-Barth, U., "Rheological Behavior of Nitromethane Gelled with Nanoparticles.", J. Propul. Power 2005, 21(1), 40-43.
- [11] Liu, Xiang-Cui; Zhang, Wei; Zhu, Hui; "Study on Dispersion of Nano-Aluminum Powder in Kerosene.", J. Propul. Tech. 2007, 26(2), 184-187.
- [12] Liu, Xiang-Cui "Study on Energy Performances for Nano-Aluminum Powder and Nano-Aluminum/Kerosene Gel System.", J. Solid Rocket Tech. 2005, 28(3), 198-200.
- [13] Wong, W.; Starkovich, J.; Adams, S. "Cryogenic Gellant and Fuel Formulation for Metalized Gelled Propellants: Hydrocarbons and Hydrogen with Aluminum.", AIAA 4-3175106698, 1994.

مقادیر متناسب با معادله توانی نیز با استفاده از داده‌های رئومتر برای دو نمونه الف و ب در سه دمای 10، 20 و 30 °C مطابق با جدول (1) می‌باشند. بر اساس اطلاعات مندرج در این جدول ملاحظه می‌شود که برای ژل‌های الف و ب مقدار شاخص شبه پلاستیک (n) برای ژل حاوی ذرات ریزتر (50nm) تا حدی کمتر از ژل حاوی ذرات بزرگ‌تر می‌باشد. با تغییر دما مقدار شاخص شبه پلاستیک برای هر دو نمونه ژل چندان عوض نمی‌شود، اما موجب تغییر در شاخص پایداری می‌گردد. با افزایش دما مقدار شاخص پایداری (K) کاهش می‌یابد که این پدیده به کاهش نیروهای والانس ثانویه و در نتیجه کاهش ویسکوزیته نسبت داده شده است [1]. بر اساس مطالعات انجام شده مشخص است که مدل توانی می‌تواند به عنوان یک مدل رئولوژیکی مناسب جهت توضیح چگونگی تغییرات ویسکوزیته ژل با سرعت برشی به کار برده شود. به موجب اندازه‌گیری‌های رئومتر، ژل‌ها از خواص مورد انتظار برای یک پیشرانۀ ژل مناسب یعنی نازک شونده‌گی برشی و تیکسوتروپیک‌گی برخوردارند.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سوخت ژل UDMH حاوی نانو ذرات آلومینیوم با استفاده هم‌زمان از هم زدن آلتراسونیک- مکانیکی و مغناطیسی با فعال کننده سطحی (Tween-80) ساخته شد. ساخت سوخت به این روش منجر به همگنی مطلوب و توزیع یکنواخت نانو ذرات آلومینیوم در شبکه ژل شد. افزودن فعال کننده سطحی به سوخت قبل از ژل کننده و نانو پودر آلومینیوم، نقش مهمی در همگنی نانو ذرات فلزی و اختلاط کامل ژل کننده در سوخت مایع ایفا نمود. مطالعات رئولوژیکی ژل‌های ساخته شده نشان داد که نتایج تجربی به خوبی با مدل توانی هماهنگی داشته و توسط این مدل قابل تفسیر هستند. مقدار شاخص شبه پلاستیک (n) برای ژل‌های ساخته شده با 5 درصد آلومینیوم 50 نانو متر در محدوده دمای 10-30 °C در حدود 0/56 بود در حالی که این پارامتر برای ژل ساخته شده با 5 درصد آلومینیوم

- [21] Palaszewski, B. "Nanotechnology and Gelled Cryogenic Fuels.", NASA Nano/Bio Initiative, May 30, 2001.
- [22] Ulrich, T. "Energetic Material: Particle Processing and Characterization.", Willey-VCH, First ed, (2004).
- [23] Varghese, T. L.; Prabhakaran, N.; Thanki, K. P. "Performance Evaluation and Experimental Studies on Metalized Gel Propellant.", Defence Sci. J. 1999, 49(1), 71-78.
- [24] Walters, N.; Stacey, M. H.; Richard, E. L. "Heats of Combustion of High Temperature Polymers.", William J. Hughes Technical Center, (2006).
- [25] شیخی نارانی، مجید؛ "رئولوژی"، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر، چاپ اول، مرداد 71.
- [26] Vingaradov, G. V.; Malkin, A. Ya. "Rheology of Polymers.", Translated from Russian by Beknazarov, A., Mir Publisher, Moskow, 1980.
- [14] Crofoot, T. A. "Polymer Gelled Propellant and Method for Its Production.", EP Patent 20060252111, 2006.
- [15] Coguill, S. L. "Synthesis of Highly Loaded Gelled Propellants.", Technical Report, Resodyn Corporation, Butte, MT, 2009.
- [16] غیبایی، س "تهیه سوخت‌های ژل، بهینه سازی و کاربرد آن در موشک‌های سوخت مایع"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، 1368.
- [17] صابری مقدم، ع، افشاری، ع، شهسواری، ح و ده نمکی، ع، "مروری بر خط سیر توسعه پیشرانه های مایع در سیستم‌های موشکی"، چهارمین همایش سراسری مواد منفجره، پیروتکنیک و پیشرانه، 1384.
- [18] Christopher J.; Jeol P. F. "Gel Propellant Composition.", US Patent 6,652,682, 2003.
- [19] صابری مقدم، علی؛ اکبر آبادی، مرثی؛ "روش‌های ساخت پیشرانه های دوتایی ژل و بررسی رفتار سیمولنت ژل MC-H₂O"، مجله علمی- پژوهشی مواد پراثری، شماره 3، 1386.
- [20] قبادی، نرگس؛ صابری مقدم، علی؛ شیخی نارانی، مجید؛ "بررسی اثر نانو ذرات آلومینیوم بر خواص بالستیک داخلی، رئولوژیکی و پایداری پیشرانه ژل UDMH"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهمن 1387.

Archive of SID