

## اندازه‌گیری ضریب حلالیت سوخت مایع جت ده (JP-10)

### با استفاده از نمودار تورم تعادلی

محمد رضا پورحسینی<sup>۱\*</sup>، محمود رضوی زاده<sup>۲</sup>، محسن قادری درباغی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- استادیار ۳- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران

(تاریخ وصول: ۹۵/۶/۳۱، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۴)

#### چکیده

سوخت مایع جت ده (JP-10) یک سوخت مایع سنتزی و یک حلال تک مولکولی با خواص کاربردی مطلوب و مشابه با سوخت مایع جت ۴ (JP-4) است. JP-10 توانایی طی مسافت طولانی‌تری را نسبت به JP-4 دارا است. این وجه تمایز سبب استقبال بیشتر از سوخت JP-10 در صنایع هوافضا شده است. منابع متعددی در مورد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن وجود دارند که هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره ضریب حلالیت این سوخت مایع ارائه نکرده‌اند. ضریب حلالیت ( $\delta$ )، این سوخت با استفاده از نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل ارزیابی شده است. نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل با ترسیم کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال شبکه لاستیکی متورم شده در برابر ضریب حلالیت حلال‌های مختلف حاصل می‌شود و معادله مشخصه رفتار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل توسط این نمودار تعیین می‌شود. ضریب حلالیت JP-10 نیز با استفاده از معادله مشخصه رفتار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل و میزان کسر حجمی تعادلی شبکه لاستیک نیتریل در سوخت JP-10 برآورد می‌شود. نتایج این تحقیق، عدد  $15.80 \text{ (MPa}^{0.5})$  را به عنوان ضریب حلالیت سوخت JP-10 نشان می‌دهد. این مقدار از طریق انحلال پایه‌های لاستیکی دیگر دارای ضریب حلالیت نزدیک به مقدار ضریب حلالیت تخمین زده شده برای سوخت JP-10 و تورم تعادلی شبکه آن‌ها در این سوخت اعتبارسنجی شده است و نشان‌دهنده رفتار یک حلال ساده، غیرقطبی و بدون برهمکنش‌های درون مولکولی یا بین مولکولی ساختاری مانند پیوندهای هیدروژنی، قطبی و ... است.

واژه‌های کلیدی: سوخت جت ده، ضریب حلالیت، تورم تعادلی، شبکه لاستیکی.

## Evaluation of JP-10 Solubility Parameter Using Swelling Equilibrium Curve

M. R. Pourhosseini\*, M. Razavizadeh, M. Ghaderi Darbagi

Maleke Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 9/21/2016, Accepted: 2/22/2017)

#### Abstract

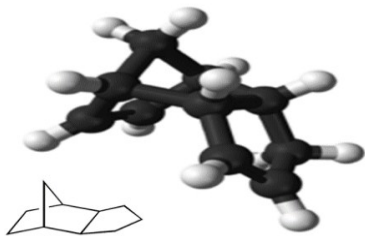
Jet propellant 10 (JP-10), is a synthetic liquid jet propellant and is a single molecular solvent with suitable properties similar to Jet propellant 4. JP-10 operates on longer distance than JP4. This difference leads to more attention to JP-10 at aerospace industries. There are several reports on its physical and chemical properties with no data about its solubility parameter, ( $\delta$ ). This study evaluates the solubility parameter of JP-10 by equilibrium swelling curve of nitrile rubber network. The equilibrium swelling curve of nitrile rubber network is plotted based on the variation of the equilibrium volume fraction of nitrile rubber in the network for different solvents against their solubility parameter. It maintains the equilibrium swelling graph of nitrile rubber network for different solvents. Then, the solubility parameter of JP-10 is evaluated based on the equilibrium swelling curve of nitrile rubber network and the equilibrium volume fraction of nitrile rubber in JP-10. The results of this research show the number of  $15.80 \text{ (MPs)}^{0.5}$  as solubility parameter of JP-10. The validity of reported data is assessed due to solubility and equilibrium swelling of other rubber base in gum or cured state with quiet close solubility parameter to JP-10 and reveals a simple non-polar solvent with no intra or intermolecular interactions as hydrogen bonding, polar bonding and etc.

**Keywords:** Jet Propellant 10 (JP-10), Solubility Parameter, Equilibrium Swelling, Rubbery Network.

## ۱- مقدمه

ترکیبی تقریباً تک مولکولی از ۹۸/۵٪ اگزو-تتراهیدرو دیسیکلوپنتادیان، با نقطه انجماد  $79^{\circ}\text{C}$  - مطابق شکل (۱) و ایزومر اندوی آن با نقطه انجماد  $80^{\circ}\text{C}$  - است که به دلیل هندسه حلقوی و ساختار کشیده، دارای انرژی حجمی فراوانی است [۹]. این سوخت با خواص کاربردی مطلوب و شبیه به سوخت مایع جت چهار، توانایی طی مسافت بیشتری را دارا است [۱۰]. اگرچه بسیاری از خواص سوخت مایع JP-10 از قبیل جرم حجمی، نقطه انجماد، فراریت، انرژی حجمی، کارایی احتراق، پایداری حرارتی و سرعت سوختن در پژوهش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است [۵ و ۷ و ۸ و ۱۱]، ولی اطلاعات چندانی از خصوصیات شیمی- فیزیکی آن منتشر نشده است. یکی از مهم‌ترین اطلاعات کاربردی در این زمینه، ضریب حلالیت<sup>۳</sup> این سوخت، ۵، است.

ضریب حلالیت از مهم‌ترین مشخصه‌های شیمی- فیزیکی حلال‌ها است. این کمیت در صنایع مختلف نظیر پتروشیمی، پلیمر، لاستیک، رنگ‌سازی، پزشکی، نظامی، حمل‌ونقل و ... کاربرد گسترده‌ای دارد [۱۳]. [۱۲]. ضریب حلالیت، رفتار یک حلال را در مواجهه با حلال‌ها و مواد پلیمری دیگر از نظر حلالیت، دو فاز شدن، تورم و ... پیش‌بینی می‌کند، از این رو دارای ارزش کاربردی و صنعتی فراوانی است. در صورت نزدیک بودن ضریب حلالیت دو ماده، آن دو با هم امتزاج پذیرند. درعین حال دو یا چند ماده امتزاج ناپذیرند، اگر مقدار ضریب حلالیت آن‌ها بسیار متفاوت باشد [۱۴ و ۱۵].



شکل ۱- ساختار مولکولی مولکول سوخت مایع JP-10 [۱۰].

اهمیت ضریب حلالیت، محققان را به ارائه روش‌های مختلفی برای ارزیابی این کمیت شیمی- فیزیکی ترغیب می‌کند [۱۶]. در این مورد دسته‌بندی‌های مختلفی برای تمایز این روش‌ها توسط پژوهشگران ارائه شده است. روش‌های ارزیابی مستقیم و غیرمستقیم [۱۴]، روش‌های محاسباتی و تجربی [۱۷ و ۱۸] و روش‌های نظری و تجربی مثال‌هایی از این دسته‌بندی‌ها است [۱۹]. بر این اساس روش‌های نظری شامل روش‌های گروه افزایشی<sup>۴</sup> یا سهم گروه<sup>۵</sup> مانند روش‌های فدورز<sup>۶</sup> و هوی<sup>۱</sup>

در سال ۱۹۰۳ برادران رایت برای تأمین نیروی موتور هواپیمای خود از نفت سفید<sup>۱</sup> استفاده کردند. در سال ۱۹۴۴، با ورود آمریکا به جنگ جهانی دوم نیاز به پیمایش مسافت‌های طولانی در ارتفاعات بالاتر بیش از پیش احساس می‌شد. بنابراین اولین سوخت جت با نام JP-1<sup>۲</sup> توسط نیروی هوایی آمریکا، مطابق با استاندارد MIL-F-5619 تولید شد. پس از آن در سال ۱۹۴۵ سوخت مایع JP-2 و سپس سوخت مایع JP-3 در سال ۱۹۴۷ عرضه شدند. این سوخت‌ها ترکیباتی از بنزین سوپر و نفت سفید خام با قابلیت کاربردی بیشتری بودند. در ابتدای دهه ۱۹۵۰ میلادی ضرورت بهبود فراریت سوخت، نقطه انجماد و نسبت قابلیت دسترسی به هزینه تولید سبب شد، سوخت مایع JP-4 مطابق با استاندارد نظامی MIL-F-5624 و به دنبال آن سوخت مایع JP-5 تحت استاندارد نظامی MIL-F-5624 معرفی شوند. در طی دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ میلادی، گسترش هواپیمایی با سرعت‌های فراتر از ماخ منجر به معرفی سوخت‌های JP-6، مطابق با استاندارد نظامی MIL-F-25656، برای سرعت‌های فراتر از دو ماخ و JP-7، بر اساس استاندارد MIL-T-38219، برای سرعت‌های بالاتر از سه ماخ شد. فراریت کم، پایداری حرارتی بالا، و میزان نفت سفید فرآیندی بیشتر، از جمله مزیت‌های این سوخت‌ها بود [۱ و ۲]. در ابتدای دهه ۱۹۷۰ میلادی، سوخت مایع JP-8، بر اساس استاندارد MIL-T-83133، معرفی شد که مشکل روان‌کاری ضعیف سوخت<sup>۳</sup> را با افزودن مواد حاوی ضد فرسایش، و بهبوددهنده‌های روان‌کننده برطرف می‌کرد [۲ و ۱]. در دهه آخر قرن بیستم، نیاز به پیمایش مسیرهای طولانی‌تر، تمایل به کاهش وزن در جنگنده‌ها و رعایت مسائل زیست‌محیطی در نحوه تولید سوخت آن‌ها، منجر به عرضه سوخت مایع JP-9 مطابق با استاندارد نظامی MIL-P-87107B شد [۲]. JP-9 ترکیبی از ایزومرهای دیمر تراهایدرو- متیل‌سیکلوپنتادیان، RJ4، ایزومرهای دیمرهای تراهایدرو- نوربورنادیان<sup>۴</sup>، RJ5 و متیل‌سیکلوپنتادیان بود. فراریت بالا برای ایجاد جرقه در موتورهای سرد و مرطوب، پایداری و شفافیت بالا، عدم حضور ساختارهای حلقوی، و سازگاری با بیش‌تر لاستیک‌ها از خصوصیات برتر این سوخت به حساب می‌آمد [۳ و ۴].

سوخت مایع JP-10 آخرین نسل از سری سوخت‌های مایع جت و مطابق با استاندارد نظامی MIL-DTL-87107D است. این سوخت، هیدروکربونی تک جزئی، سنتزی، و با چگالی انرژی بالا است و از ماده جامد اندو-تتراهایدرو دیسیکلوپنتادیان توسط هیدروژن زدایی از دیسیکلوپنتادیان تولید می‌شود، در حضور کاتالیزور ایزومره شده، و تولید سوخت مایع JP-10 می‌کند [۵-۸]. در حقیقت این سوخت

1- Kerosene  
2- Jet Propellant  
3- Lubricity Problems

4- Additive Group  
5- Group Contribution  
6- Fedors

سوخت JP-10 و تورم تعادلی شبکه آن‌ها در این سوخت اعتبارسنجی شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۱-۱- مواد

**شبکه لاستیکی:** برای ارزیابی نمودار تورم تعادلی لاستیک، از لاستیک نیتریل با میزان آکریلونیتریل ۳۴٪، ساخت پتروشیمی کوسین کره، با نام تجاری KNB استفاده شد. آمیزه لاستیکی مورد نظر شامل افزودنی‌های مرسوم از جمله، دوده نرمال ۶۶۰، گوگرد به عنوان عامل پخت گوگردی، شتاب‌دهنده تیورامی<sup>۱۳</sup> و تیزولی، استتاریک اسید به عنوان تسریع و تسهیل‌کننده رئولوژیکی، اکسید روی به عنوان فعال‌کننده واکنش پخت، عامل ضد اکسایش ایزوپروپیل‌فنیل‌فنیل‌دی‌آمین، رزین کومارون و رزین دی‌اکسی‌فتالات به عنوان عوامل کمک فرآیند، بوده که مقدار این مواد به همراه مشخصات فیزیکی در جدول (۱) گزارش شده است. اختلاط این مواد نیز به وسیله مخلوط‌کن میله‌ای W150AP، ساخت شرکت کولین آلمان، مطابق با شرایط بیان‌شده در استاندارد ASTM D15-627، انجام شد، و با استفاده از پرس داغ، ساخت شرکت کولین آلمان، مطابق با شرایط رئومتری گزارش‌شده در جدول (۲)، بر اساس استاندارد ASTM D5289، پخت گردید.

**حلال‌های مصرفی:** نمودار تورم تعادلی لاستیک مورد آزمون به کمک حلال‌های تولون، ایزواکتان، سیکلوهاگزان آزمایشگاهی، به عنوان حلال‌های آروماتیک و آلیفاتیک غیر قطبی، و ۲- اتیل‌هگزیل‌آمین، متیل‌اتیل‌کتون، متیل‌پروپیل‌دینون، بنزیل‌آمین، دی‌متیل‌فورمامید، و اتانول آزمایشگاهی، به عنوان حلال‌های قطبی، مشخص شد تا نمودار تورم تعادلی لاستیک در گستره‌ای از مقدار ضریب حلالیت حلال‌ها، ترسیم شود. برای این منظور متوسط جرم حجمی، حجم مولی، و ضریب حلالیت این حلال‌ها در جدول (۳) گزارش شده است.

**سوخت مایع JP-10:** برای اجرای آزمون تورم و ارزیابی ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10، از سوخت JP-10 تولیدی شرکت سیچان زونگینگ<sup>۱۴</sup> چین استفاده شد. همچنین به منظور راستی‌آزمایی سوخت موجود، و شناسایی غلظت عوامل تشکیل‌دهنده آن، آزمون‌های کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی و جرم حجمی انجام شد.

هوای<sup>۱</sup>، مدل‌سازی حرکات مولکولی<sup>۲</sup> و ضریب حلالیت جزئی<sup>۳</sup> هستند [۱۳، ۱۴ و ۱۸]. همچنین روش‌هایی نظیر محاسبات فشار بخار یا نقطه جوش [۱۴، ۱۸ و ۲۰]، محاسبات حلالیت/امتزاج پذیری<sup>۴</sup> در مایعات [۱۴ و ۱۸]، الگوی ته نشینی<sup>۵</sup> [۱۸]، ارزیابی انرژی سطحی<sup>۶</sup> با استفاده از کروماتوگرافی معکوس گازی [۱۷]، گرانیروی ذاتی<sup>۷</sup> [۲۰]، حلالیت هیلدبرند تعمیم‌یافته<sup>۸</sup> [۱۹، ۲۱ و ۲۲]، حلالیت هنسن تعمیم‌یافته<sup>۹</sup> [۱۹ و ۲۳]، و نظریه محلول‌های منظم هیلدبرند<sup>۱۰</sup> یا قله حلالیت<sup>۱۱</sup> [۱۹] جزء روش‌های تجربی محاسبه ضریب حلالیت برای حلال‌ها هستند.

اخیراً سپرا و همکارانش [۲۴] نشان داده‌اند که رفتار تورمی یک لاستیک پخت شده در حلال‌های مختلف، از یک رفتار زنگوله‌ای شکل پیروی می‌کند، و بیشینه تورم آن در حلالی به دست می‌آید که ضریب حلالیت آن با ضریب حلالیت شبکه لاستیکی برابر است. چنانکه رفتار تورم شبکه لاستیکی در مجاورت با طیفی از حلال‌ها، از نموداری تعادلی<sup>۱۲</sup> برای شبکه لاستیکی برخوردار است، به طوری که شبکه لاستیکی با توجه به ساختار مولکولی تشکیل‌دهنده آن در طیفی از حلال‌هایی با ضریب حلالیت نزدیک به ضریب حلالیت خود متورم شده و در سایر حلال‌ها بی‌تغییر یا با تغییر جزئی باقی می‌ماند. این نمودار با رسم مشخصات تورمی شبکه لاستیکی مانند درصد تورم یا کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال در برابر مشخصات شیمی-فیزیکی حلال‌ها، مثل ضریب حلالیت آن‌ها به دست می‌آید و مشخصه‌های شیمی-فیزیکی شبکه لاستیکی خاص یا حلالی خاص را قابل پیش‌بینی می‌نماید.

در این پژوهش ضریب حلالیت JP-10 با استفاده از نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل ارزیابی می‌شود. نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل بر اساس تغییر میزان کسر حجمی تعادلی لاستیک موجود در شبکه لاستیک نیتریل متورم شده در حلال‌های مختلف در برابر ضریب حلالیت آن‌ها ترسیم می‌شود، و معادله مشخصه رفتار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل توسط این نمودار تعیین می‌شود. سپس ضریب حلالیت JP-10 با استفاده از معادله مشخصه رفتار تورم تعادلی شبکه لاستیک نیتریل و میزان کسر حجمی تعادلی شبکه لاستیک نیتریل در سوخت JP-10 برآورد می‌شود. در ادامه این مقدار از طریق تورم یا انحلال پایه‌های لاستیکی دارای ضریب حلالیت نزدیک به

13- Tetramethylthiuramdisulfide

14- Sichuan Zhongbang Technical Developing Limited Co.

1- Hoy

1- Molecular Dynamics Simulation

2- Partial Solubility Parameter

3- Solubility/Miscibility Measurement In Liquids

4- Precipitation Schemes

5- Surface Energetic Measurements

6- Intrinsic Viscosity

7- Extended Hildebrand Solubility Approach

8- Extended Hansen's Solubility Approach

9- Hildebrand Regular Solutions Theory

11- Peak Solubility Technique

12- Equilibrium Swelling Curve

روش ارائه شده در بخش ۲-۳، ارزیابی شد. همچنین مقدار حلالیت لاستیک‌های ذکر شده در سوخت JP-10 نیز بررسی شد. درحالی‌که برای اختلاط آمیزه این شبکه‌ها از استاندارد ASTM D15-627 و مخلوط کن میله‌ای W150AP استفاده شد، و آمیزه آن‌ها مطابق با استاندارد ASTM D5289 و شرایط بیان شده در جدول (۲) پخت گردید. مقدار عوامل پخت و ضریب حلالیت شبکه‌های ذکر شده در جدول (۴) گزارش شده است.

شبکه‌های لاستیکی با ضریب حلالیت نزدیک به سوخت مایع JP-10: ضریب حلالیت محاسبه شده برای سوخت JP-10 از طریق مطالعه رفتار ترمی شبکه‌های لاستیکی دارای ضریب حلالیت مشابه بررسی شد. در این خصوص لاستیک‌های بیوتیل و اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر به عنوان لاستیک‌های شاهد بکار برده شدند. زیرا ضریب حلالیت نزدیک به مقدار پیش‌بینی شده برای سوخت JP-10 دارند. برای این منظور کسر حجمی لاستیک در تعادل با سوخت JP-10 برای شبکه‌های لاستیکی بیوتیل و اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر، مطابق با

جدول ۱- مقدار و مشخصات فیزیکی مواد موجود در آمیزه لاستیکی نیتریل.

نام ماده	جرم حجمی (gr/cm <sup>3</sup> )	مقدار (gr)	حجم (cm <sup>3</sup> )	کسر وزنی (M <sub>i</sub> )	کسر حجمی (V <sub>i</sub> )
لاستیک نیتریل	۰/۹۴۰۰	۱۰۰	۱۰۳/۳۸۳۰	۰/۴۷۹۱	۰/۶۲۴۴
شتاب‌دهنده تیورامی	۱/۳۱۷۰	۳	۲/۲۷۷۹	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۳۴
شتاب‌دهنده تیاژولی	۱/۴۹۷۰	۲/۸۸	۱/۹۲۳۸	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۱۳
گوگرد	۲/۰۱۳۰	۱/۸۳	۰/۹۰۹۱	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۵۳
اکسید روی	۵/۶۰۶۰	۵	۰/۸۹۱۹	۰/۰۲۴۰	۰/۰۰۵۲
استتاریک اسید	۰/۸۴۷۰	۱	۱/۱۸۰۶	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۶۹
عامل ضد اکسایش	۱/۱۷۰۰	۳	۲/۵۶۴۱	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۵۰
دوده نرمال	۱/۹۰۰۰	۸۰	۴۲/۱۰۵۳	۰/۳۸۳۳	۰/۲۴۷۱
رزین کومارون	۰/۹۹۵۰	۲	۲/۰۱۰۱	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۱۸
دی‌اکسی فتالات	۰/۹۸۶۱	۱۰	۱۰/۱۴۱۰	۰/۰۴۷۹	۰/۰۵۹۵
مقدار نهایی	۱/۲۲۴۹	۲۰۸/۷۱	۱۷۰/۳۸۶۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰

جدول ۲- شرایط پخت آمیزه لاستیکی.

دما (C°)	فشار (bar)	زمان (min)
۱۵۵	۱۵۰	۳۰

جدول ۳- متوسط جرم حجمی و ضریب حلالیت گزارش شده برای حلال‌های مصرفی.

نام حلال	حجم مولی (cm <sup>3</sup> /mol)	جرم حجمی حلال (ρ <sub>sl</sub> ) (gr/cm <sup>3</sup> )	ضریب حلالیت (MPa <sup>0.5</sup> )			
			δ <sub>T</sub> <sup>a</sup>	δ <sub>T</sub> <sup>b</sup>	δ <sub>T</sub> <sup>c</sup>	δ <sub>T</sub> <sup>d</sup>
ایزواکتان	۱۶۲/۴۸۹۰	۰/۸۷۷۹	<sup>a</sup> ۷/۵۴	<sup>b</sup> ۱۵/۴۸	<sup>c</sup> ۱۵/۵۰	-
سیکلوهگزان	۱۰۸/۱۶۰۹	۰/۷۷۹۰	<sup>b</sup> ۷/۹۷	<sup>b</sup> ۱۶/۳۰	-	-
۳- اتیل‌هگزیل‌آمین	۱۶۳/۸۰۲۳	۰/۷۸۹۰	<sup>b</sup> ۸/۴۹	<sup>b</sup> ۱۷/۳۶	-	-
تولون	۱۰۶/۳۹۷۰	۰/۷۰۲۴	<sup>a</sup> ۸/۹۰	<sup>b</sup> ۱۸/۲۰	<sup>c</sup> ۱۸/۱۶	-
متیل‌اتیل‌کتون	۸۹/۵۷۱۰	۰/۹۴۷۳	<sup>a</sup> ۹/۲۷	-	<sup>c</sup> ۱۹/۰۵	<sup>d</sup> ۱۹/۰۰
متیل‌پیرو لیدونون	۹۶/۲۴۲۷	۱/۰۲۹۰	<sup>b</sup> ۱۰/۲۴	<sup>b</sup> ۲۰/۹۵	-	-
بنزیل‌آمین	۱۰۹/۲۳۵۵	۰/۹۸۱۰	<sup>b</sup> ۱۱/۲۲	<sup>b</sup> ۲۲/۹۵	-	-
دی‌متیل‌فرمامید	۷۷/۱۶۰۶	۰/۸۰۵۱	<sup>a</sup> ۱۲/۱۵	-	<sup>c</sup> ۲۴/۷۳	<sup>d</sup> ۲۴/۸۰
اتانول	۵۸/۱۴۸۵	۰/۷۹۴۱	<sup>a</sup> ۱۲/۹۸	-	<sup>c</sup> ۲۶/۵۲	<sup>d</sup> ۲۶/۵۰

<sup>a</sup> مرجع [۱۷] <sup>b</sup> مرجع [۲۴] <sup>c</sup> مرجع [۲۵] <sup>d</sup> مرجع [۲۶]

جدول ۴- مقدار عوامل پخت و ضریب حلالیت شبکه‌های لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و بیوتیل.

نوع لاستیک	دوده نرمال	شتاب‌دهنده تیورامی (PhR)	شتاب‌دهنده تیزالی (Phr)	گوگرد (PhR)	اکسید روی (PhR)	استئاریک اسید (PhR)	ضریب حلالیت (MPa <sup>0.5</sup> )
اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر	۸۰	۱/۵۰	۱/۵۰	۰/۸۰	۵/۰۰	۱/۵۰	۱۵/۱۰
بیوتیل	۸۰	۱/۳۰	۰/۷۰	۲/۰۰	۵/۰۰	۳/۰۰	۱۶/۰۰

## ۲-۲-آزمون‌ها

آزمون کروماتوگرافی متصل به طیف‌سنجی جرمی: همان طور که در بخش ۱-۲، ذکر شد، شناسایی غلظت عوامل تشکیل‌دهنده سوخت موجود با اجرای آزمون کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی صورت گرفت، و نتایج آن با داده‌های مندرج در منابع موجود مقایسه شد [۱۰ و ۲۷]. برای این منظور از دستگاه GC/MS SQ 8، ساخت شرکت PerkinElmer استفاده شد.

آزمون جرم حجمی: میزان جرم حجمی سوخت مایع JP-10، با استفاده از پیکنومتر شیشه‌ای ۵۰ cc ساخت شرکت مرک آلمان اندازه‌گیری شد و داده به دست آمده از این آزمون، با اطلاعات مندرج در منابع موجود مقایسه شد. درحالی‌که جرم حجمی گزارش شده در این منابع برای سوخت مایع JP-10 بین ۰/۹۲۱ تا ۰/۹۴۳ (gr/cm<sup>3</sup>) در محدوده دمایی محیط، ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس، گزارش شده است [۱۰ و ۲۷].

آزمون تورم: آزمون تورم شبکه لاستیکی مطابق با استاندارد ASTM D471، در دمای ۲۳ °C، به مدت ۷۲ ساعت، و با تکرار پنج نمونه در هر ده حلال انجام شد. با اجرای آزمون تورم، متوسط کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال برای پنج نمونه از لاستیک موجود، در هر ده حلال به دست آمد تا برای رسم نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیکی و ارزیابی ضریب حلالیت سوخت JP-10 استفاده شود.

آزمون ارزیابی تورم شبکه و حلالیت لاستیک‌های شاهد: اعتبارسنجی مقدار گزارش شده برای ضریب حلالیت سوخت JP-10 به وسیله بررسی تورم شبکه و حلالیت لاستیک‌های اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و بیوتیل رابر، به عنوان شاهد، در سوخت JP-10 صورت گرفت. برای این منظور شبکه لاستیکی این لاستیک‌ها در سوخت مد نظر متورم شد و کسر حجمی لاستیک در تورم با سوخت JP-10 برای هر شبکه محاسبه شد. همچنین با توجه به شدت تورم شبکه‌های شاهد، میزان انحلال‌پذیری لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر در سوخت JP-10، بررسی شد.

## ۲-۳- محاسبات

روش ارزیابی نمودار تورم تعادلی: ابتدا آزمون تورم تعادلی لاستیک در نه حلال جداگانه انجام شد. سپس نمودار تورم تعادلی با درون‌یابی داده‌های حاصل بر اساس میزان متوسط کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال،  $\phi_{ri}$ ، رسم شد. برای این منظور مطابق جدول (۱) جرم

حجمی شبکه لاستیکی،  $(\rho_T)$ ، و کسر حجمی اجزای آن،  $(V_i)$ ، با فرض عدم تراکم‌پذیری اجزای تشکیل‌دهنده با استفاده از قانون مخلوط‌ها محاسبه شد. همچنین مطابق رابطه (۱)، حجم نمونه‌های مورد آزمون،  $(v_i)$ ، به وسیله حاصل ضرب وزن هر نمونه،  $(m_i)$ ، در معکوس جرم حجمی به دست آمده سنجیده شد، تا حجم لاستیک در تعادل با حلال،  $(v_{ri})$ ، رابطه (۲)، با آگاهی از حجم هر نمونه و کسر حجمی لاستیک موجود در نمونه‌ها،  $(v_r)$ ، محاسبه شود.

$$1) v_i = m_i \times \rho_T^{-1}$$

$$2) v_{ri} = v_i \times v_r$$

به کمک رابطه (۳) حجم حلال جذب‌شده در تعادل با نمونه‌ها،  $(v_{si})$ ، با استفاده از جرم حجمی حلال‌ها،  $(\rho_{si})$ ، و اختلاف وزن نمونه‌ها قبل،  $(m_{di})$ ، و بعد از اجرای آزمون تورم،  $(m_{wi})$ ، ارزیابی شد، با آگاهی از حجم تعادلی لاستیک،  $(v_{ri})$ ، و حجم حلال نفوذ کرده،  $(v_{si})$ ، کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال هر نمونه با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد. منحنی تورم تعادلی شبکه لاستیکی از رسم کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال در مقابل ضریب حلالیت حلال‌های استفاده‌شده حاصل می‌شود

$$3) v_{si} = (m_{wi} - m_{di}) \times \rho_{si}^{-1}$$

$$4) \phi_{ri} = \frac{v_{ri}}{v_{ri} + v_{si}}$$

روش ارزیابی ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10: برای ارزیابی ضریب حلالیت سوخت JP-10، ابتدا کسر حجمی لاستیک در تعادل با این سوخت مطابق با بخش ۲-۳، ارزیابی شد، و مقدار ضریب حلالیت آن با استفاده از معادله حاصل از درون‌یابی داده‌های منحنی تورم تعادلی شبکه لاستیکی ارزیابی گشت.

روش ارزیابی حلالیت لاستیک در سوخت JP-10: حلال‌های پلیمری در منابع علمی معتبر به صورت رقیق، نیمه رقیق، و غلیظ، دسته‌بندی می‌شوند. محلول‌های غلیظ و سازگار پلیمری دارای غلظت بین ۱۰ تا ۵۰ (gr/۱۰۰cc) از حل شونده در حلال هستند [۲۹، ۲۸]. با توجه به مقدار ضریب حلالیت لاستیک‌های اتیلن پروپیلن دی‌ان و بیوتیل، میزان انحلال‌پذیری آن‌ها به عنوان پایه‌های پلیمری شاهد در سوخت مایع JP-10 مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور میزان سوخت مایع JP-10 گرم از لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان منومر به ۱۵۰ میلی‌لیتر از سوخت مایع JP-10 و ۱۳/۵ (gr) از لاستیک بوتیل به ۱۰۰ میلی‌لیتر JP-10 افزوده شد، تا میزان انحلال‌پذیری و سازگاری لاستیک بیوتیل و

استاندارد وجود بیش از ۹۸٪ ساختار اگزو-تتراهیدرودیسیکلوپنتادیان گزارش شده است.

نتایج به دست آمده از آزمون اندازه‌گیری جرم حجمی سوخت JP-10 موجود نیز مطابقت مقدار جرم حجمی این سوخت با محدوده منتشرشده توسط منابع موجود را نشان می‌دهد. همان طور که در بخش قبلی ذکرشده جرم حجمی سوخت مایع JP-10 در این منابع بین ۰/۹۲۱ تا ۰/۹۴۳ برای محدوده دمایی محیط، ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس، گزارش شده است. نتایج آزمون اندازه‌گیری جرم حجمی سوخت موجود در جدول (۶) گزارش شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از اجرای آزمون‌های کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی و جرم حجمی سوخت مایع JP-10 موجود، اطمینان لازم از صحت خلوص سوخت محرک JP-10 موجود به دست آمد، درحالی‌که غلظت بالای ۹۹٪ مولکول‌های تراهیدرودیسیکلوپنتادیان در ساختار این سوخت امکان در نظر گرفتن سوخت موجود را به عنوان یک سوخت تک مولکولی را منطقی می‌نماید.

### ۳-۲- نتایج ارزیابی ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10

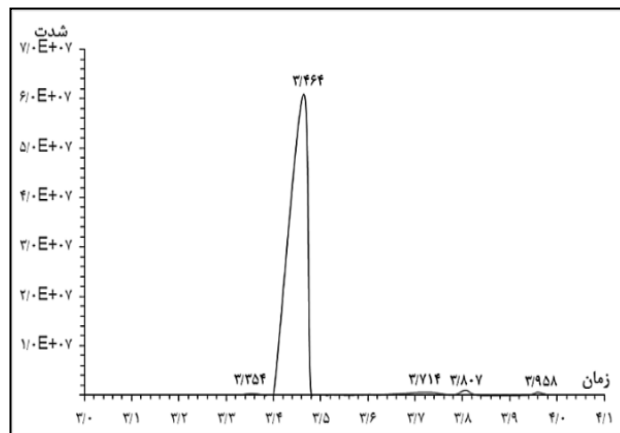
پس از اجرای آزمون تورم تعادلی شبکه لاستیکی موجود در نه حلال موجود و استفاده از معادله (۴) برای ارزیابی کسر حجمی لاستیک در تعادل با این حلال‌ها،  $\phi_{ri}$ ، و متوسط‌گیری از داده‌های حاصل‌شده، نتایج زیر به دست آمد که در جدول (۷) گزارش شده است. با آگاهی از متوسط کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال‌های موجود و درونیابی از این داده‌ها بر اساس ضریب حلالیت حلال‌های مورد آزمون، نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیکی در واحد  $(\text{Cal}/\text{cm}^3)^{0.5}$  ترسیم شد. تصویر این نمودار در شکل (۳) ارائه شده است.

لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر با سوخت مایع JP-10 بررسی شود.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- کنترل سوخت JP-10 موجود

با اجرای آزمون کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی سوخت مایع JP-10 موجود، نمودار ارائه‌شده در شکل (۲) به دست آمد. جزئیات کمی نتایج حاصل در جدول (۵) گزارش شده است.



شکل ۲- کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی سوخت مایع JP-10 10 موجود.

همان طور که از اطلاعات گزارش‌شده در جدول (۵) مشخص است، بیش از ۹۹٪ ساختار تشکیل‌دهنده سوخت مایع جت موجود اگزو-تتراهیدرودیسیکلوپنتادیان و ایزومر فضایی آن است. این در حالی است که نتایج به دست آمده تطابق بسیار مطلوبی با نتایج منتشرشده در استاندارد نظامی MIL-DTL-87107 دارد، به طوری که در این

جدول ۵- مقادیر طیف‌سنجی جرمی متصل به کروماتوگرافی گازی برای سوخت مایع JP-10 موجود.

ID	% of Total	Corr. Max %	Corr. Area	Peak Height	PK TY	Last Scan	Max Scan	First Scan	R.T. min	Peak Num
Decalin	۰/۱۵۵ %	۰/۱۶ %	۲۲۷۵۲۰	۱۲۲۳۱۲	rBV4	۵۹۲	۵۷۵	۵۶۳	۳/۳۵۴	۱
Exo-tetrahydrodicyclopentadiene	۹۸/۳۹۸ %	۱۰۰.۰۰ %	۱۴۴۴۷۰۷۲۱	۶۰۹۱۰۹۰۶	rBV	۶۵۱	۶۲۵	۵۹۵	۳/۴۶۴	۲
Adamantane	۰/۲۵۰ %	۰/۲۵ %	۳۶۶۴۳۳	۲۴۶۱۵۴	rVB2	۷۵۳	۷۳۹	۷۲۸	۳/۷۱۴	۳
Endo-tetrahydrodicyclopentadiene	۱/۰۷۶ %	۱/۰۹ %	۱۵۷۹۳۶۱	۱۰۲۲۰۱۲	rVB3	۸۰۵	۷۸۱	۷۶۷	۳/۸۰۷	۴
Decane	۰/۱۲۲ %	۰/۱۲ %	۱۷۸۴۹۷	۳۹۱۹۱	rVB3	۸۲۷	۸۵۰	۸۳۸	۳/۹۵۸	۵

جدول ۶- نتایج آزمون اندازه‌گیری جرم حجمی سوخت مایع JP-10 موجود.

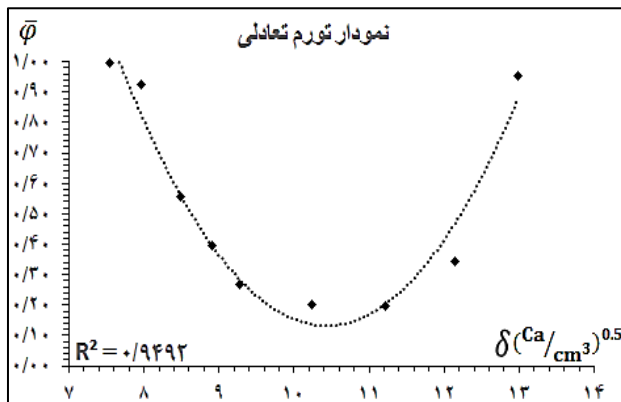
وزن پیکنومتر خشک (gr)	وزن پیکنومتر به همراه سوخت (gr)	حجم پیکنومتر (cm <sup>3</sup> )	جرم حجمی حلال (gr/cm <sup>3</sup> )
۳۶/۱۶۶۳	۸۲/۵۴۳۴	۵۰	۰/۹۲۷۵

جدول ۷- مقدار متوسط کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال و داده‌های آزمون تورم لاستیک نیتریل برای هر حلال.

نوع حلال	وزن نمونه خشک (gr) ( $m_{di}$ )	وزن نمونه متورم (gr) ( $m_{wi}$ )	وزن حلال جذب‌شده (gr) ( $m_s$ )	حجم حلال جذب‌شده ( $cm^3$ ) ( $v_s$ )	وزن لاستیک در نمونه (gr) ( $m_{ri}$ )	حجم لاستیک در نمونه ( $cm^3$ ) ( $v_{ri}$ )	مقدار $\bar{\phi}$
ایزواکتان	۰/۷۷۳۹	۰/۷۷۵۶	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۵	۰/۶۶۸۸	۰/۷۱۱۵	۰/۹۹۶۴
سیکلوهگزان	۰/۵۵۴۷	۰/۵۸۷۵	۰/۰۳۲۸	۰/۰۴۲۱	۰/۴۷۹۴	۰/۵۱۰۰	۰/۹۲۳۶
۲- اتیل‌هگزیل‌آمین	۰/۲۱۰۳	۰/۳۳۱۲	۰/۱۲۰۹	۰/۱۵۳۳	۰/۱۸۱۷	۰/۱۹۳۳	۰/۵۵۷۹
تولون	۰/۷۷۵۴	۲/۱۰۷۸	۱/۳۳۲۴	۱/۵۱۷۷	۰/۶۷۰۲	۰/۷۱۲۹	۰/۳۱۹۶
متیل‌اتیل‌کتون	۰/۵۵۳۱	۱/۶۷۶۹	۱/۱۲۳۸	۱/۳۹۵۹	۰/۴۷۸۱	۰/۵۰۸۶	۰/۲۶۷۰
متیل‌پیرو لیدونون	۰/۲۴۹۱	۱/۱۹۶۱	۰/۹۴۷۰	۰/۹۲۰۳	۰/۲۱۵۳	۰/۲۲۹۱	۰/۱۹۹۳
بنزیل‌آمین	۰/۵۸۸۸	۲/۶۴۴۹	۲/۰۵۶۱	۲/۰۹۵۹	۰/۵۰۸۹	۰/۵۴۱۴	۰/۲۰۶۰
دی‌متیل‌فرمامید	۰/۲۰۳۹	۰/۶۹۷۴	۰/۴۹۳۵	۰/۵۲۰۹	۰/۱۷۶۳	۰/۱۸۷۵	۰/۲۶۴۷
اتانول	۰/۵۴۴۷	۰/۶۰۴۶	۰/۰۵۷۹	۰/۰۷۱۹	۰/۴۷۲۵	۰/۵۰۲۷	۰/۸۷۴۷

\* داده‌های گزارش‌شده، متوسط مقادیر به دست آمده از پنج نمونه آزمایش شده است.

می‌یابد و کسر حجمی در تعادل با اتانول تا مقدار ۰/۸۷۴۷ افزایش می‌یابد. این تغییر رفتار شبکه از افزایش تورم به کاهش تورم مربوط به افزایش اختلاف ضریب حلالیت حلال متورم کننده و شبکه لاستیکی و کاهش امتزاج‌پذیری آن‌ها با شبکه لاستیکی متورم شونده است [۱۴] و [۱۵]. که نتیجه تمایل مولکول‌های حلال متورم کننده به برهمکنش درون مولکولی نسبت به برهمکنش بین مولکولی با مولکول‌های شبکه لاستیکی است.



شکل ۳- نمودار تورم تعادلی لاستیک نیتریل مورد آزمون.

با درون‌یابی از داده‌های تورم تعادلی مشخص شد که ضریب همبستگی داده‌های موجود با منحنی درجه دوم برابر با ۰/۹۴۹۲ است که بیان‌کننده پیروی مناسب این داده‌ها از معادله درجه دوم است. پیروی مناسب داده‌های تورم شبکه لاستیک نیتریل در حلال‌های موجود و همبستگی آن‌ها با منحنی درجه دوم، (رفتار زنگوله‌ای شکل)، امکان ارزیابی مناسب داده‌های تورمی لاستیک به وسیله نمودار تورم تعادلی آن را منطقی می‌نماید. در ادامه به منظور اندازه‌گیری ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10 در واحد  $(MPa^{0.5})$ ، نمودار تورمی شبکه با توجه به مقادیر ضریب حلالیت حلال‌ها در واحد مورد نظر رسم شد. شکل (۴)

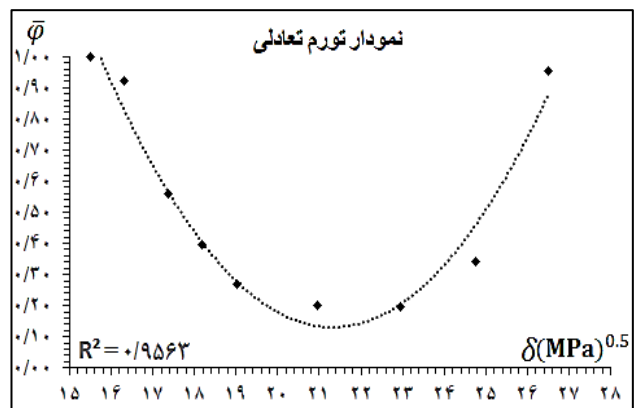
همان‌طور که در شکل (۳) مشهود است، در محدوده حلال‌های غیر قطبی و کمی قطبی، درحالی‌که متوسط کسر حجمی لاستیک نیتریل در تعادل با حلال ایزواکتان، (با ضریب حلالیت  $7/54 \text{ Cal/cm}^3$ )<sup>0.5</sup> و حجم مولار  $162/8490 \text{ (cm}^3/\text{gr mole)}$ ، ۰/۹۹۶۴ است، با کاهش حجم مولار حلال و افزایش ضریب حلالیت به متیل‌اتیل‌کتون، (با ضریب حلالیت  $9/27 \text{ Cal/cm}^3$ )<sup>0.5</sup> و حجم مولار  $89/5675 \text{ (cm}^3/\text{gr mole)}$  مقدار آن به ۰/۲۶۷۰ کاهش می‌یابد. این افزایش تورم ناشی از نزدیک شدن ضریب حلالیت حلال متورم کننده به مقدار ضریب حلالیت شبکه لاستیک نیتریل متورم شونده با ضریب حلالیت  $9/40 \text{ (Cal/cm}^3)$ <sup>0.5</sup> است [۱۴، ۱۵، ۲۴، ۲۵ و ۳۰] و همچنین تمایل بیشتر حلال به نفوذ در شبکه لاستیکی به علت کاهش اندازه مولکول‌های حلال است. با افزایش قطبیت در محدوده حلال‌های با قطبیت بیش‌تر، با وجود اینکه مقدار حجم مولار متیل‌پیرو لیدون،  $96/3362 \text{ (cm}^3/\text{gr mole)}$  و بنزیل‌آمین،  $109/2355 \text{ (cm}^3/\text{gr mole)}$ ، از متیل‌اتیل‌کتون بیش‌تر است، روند افزایش تورم شبکه تکرار شده است و کسر حجمی لاستیک در تعادل با متیل‌پیرو لیدون به ۰/۱۹۹۳ رسیده است. این روند افزایش تورم با وجود افزایش حجم مولار حلال نفوذکننده، به ساختار زنجیره‌های پلیمری شبکه لاستیک نیتریل که حاوی مولکول‌های آکریلونیتریل با ضریب حلالیت  $10/52$  است مربوط می‌شود، و ناشی از افزایش امتزاج‌پذیری مولکول‌های این حلال‌ها با مولکول‌های آکریلونیتریل موجود در شبکه لاستیکی است. با افزایش بیش‌تر قطبیت و برهمکنش مولکول‌های حلال‌ها و ضریب حلالیت آن‌ها از متیل‌پیرو لیدون به حلال دی‌متیل‌فرم‌آمید، (با ضریب حلالیت  $12/15 \text{ Cal/cm}^3$ )<sup>0.5</sup> و حجم مولار  $77/1606 \text{ (cm}^3/\text{gr mole)}$ ، و اتانول، (با ضریب حلالیت  $12/98 \text{ Cal/cm}^3$ )<sup>0.5</sup> و حجم مولار  $57/2351 \text{ (cm}^3/\text{gr mole)}$ ، تورم شبکه لاستیک نیتریل کاهش

کربن - هیدروژن است. از این رو از میان داده‌های استخراج شده در هر دسته، مقادیر پایین‌تر به عنوان ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10 انتخاب شد. زیرا مقادیر کمتر مربوط به حلال‌های غیر قطبی هستند. بنابراین مقدار ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10،  $0.7 \times 10^{-5} \text{ (Cal/cm}^3\text{)}^{0.5}$  و  $0.15/0.8$  (MPa<sup>0.5</sup>) گزارش می‌شود.

### ۳-۳- ارزیابی تورم شبکه‌های لاستیکی

نتایج گزارش شده در جدول (۹) با انجام آزمون تورم شبکه لاستیکی لاستیک‌های اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و بیوتیل در سوخت JP-10 و استفاده از معادله (۴) برای ارزیابی کسر حجمی لاستیک در تعادل با این حلال‌ها،  $\phi_{pi}$ ، و متوسط‌گیری از داده‌های حاصل شده، به دست آمد. همان طور که از نتایج گزارش شده در جدول (۹) مشخص است، میزان کسر حجمی لاستیک در تعادل با JP-10 در شبکه‌های لاستیکی غیر قطبی لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و لاستیک بیوتیل به ترتیب  $0.2401$  و  $0.2011$  است، درحالی‌که این مقدار برای شبکه لاستیک نیتریل نیمه قطبی، جدول (۸)، برابر با  $0.9750$  است. ارزیابی مقادیر به دست آمده و مقایسه آن‌ها، بیان‌گر نسبت بیش از ۴ برابری کسر حجمی لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر در تعادل با JP-10 و نسبت بیش‌تر از  $4/84$  برابری برای لاستیک بیوتیل است. درحالی‌که اختلاف ضریب حلالیت ارزیابی شده برای JP-10 با لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر برابر با  $0.70$  و با لاستیک بیوتیل برابر با  $0.20$  در واحد (MPa<sup>0.5</sup>) است. این میزان تورم لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و لاستیک بیوتیل در JP-10، و اختلاف ناچیز ضریب حلالیت آن‌ها با سوخت مد نظر حاکی از بیانگر تشابه حلال و لاستیک‌های مذکور از منظر دارا بودن ساختارهای غیرقطبی و عدم برهمکنش‌های قوی درون مولکولی و بین مولکول‌های دو ماده است. چنانکه منجر به امتزاج‌پذیری مناسب این شبکه‌ها با سوخت موجود می‌شود [۱۴، ۱۵]. در نهایت رفتار ترمی مشاهده شده برای شبکه‌های لاستیک‌های شاهد تأییدکننده صحت مقدار ضریب حلالیت محاسبه شده برای سوخت JP-10 در این گزارش است. در ادامه مقدار حلالیت این لاستیک‌ها، (در حالت خام و بدون افزودن مواد افزودنی و شبکه‌ای کننده)، در سوخت موجود بررسی شد که نتایج آن در جدول (۱۰) گزارش شده است.

نمودار تورم تعادلی لاستیک را با مقادیر ضریب حلالیت در واحد (MPa<sup>0.5</sup>) نمایش می‌دهد. همان طور که در این شکل نیز مشخص است، ضریب همبستگی داده‌های ارزیابی شده با واحد (MPa<sup>0.5</sup>) نیز  $0.9563$  است. پس از اطمینان از پیروی رفتار تورم تعادلی لاستیک از منحنی درجه دوم و ضریب همبستگی مناسب نمودارها، با اجرای آزمون تورم شبکه در سوخت JP-10، متوسط مقدار کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال شبکه در این حلال نیز محاسبه شد. این مقدار،  $(\bar{\phi})$ ، و متوسط داده‌های تورم تعادلی لاستیک در سوخت مایع JP-10 در جدول (۸) گزارش شده است.



شکل ۴- نمودار تورم تعادلی لاستیک نیتریل با مقادیر ضریب حلالیت در واحد (MPa<sup>0.5</sup>).

با رسم نمودارهای تورم تعادلی لاستیک مورد آزمون، محاسبه کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال محرک JP-10 و استخراج معادله این نمودارها، مقدار ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10 موجود در هر دو واحد موجود محاسبه شد. این مقادیر برای نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیکی در واحد  $(\text{Cal/cm}^3)^{0.5}$   $0.7/10^{-5}$  و  $0.7/10^{-5}$ ، و در واحد (MPa<sup>0.5</sup>) مقادیر  $0.26/0.86$  و  $0.15/0.80$  به دست آمد، درحالی‌که از میان مقادیر به دست آمده از هر نمودار تنها یک مقدار برای گزارش ضریب حلالیت صحت دارد.

بررسی ساختار سوخت مایع JP-10، (شکل ۱)، نشان می‌دهد که هیچ یک از ساختارهای الکترون کشنده در ساختار مولکولی این حلال وجود ندارند و این سوخت حلالی کاملاً غیر قطبی و تشکیل شده از پیوندهای

جدول ۸- مقدار متوسط کسر حجمی لاستیک نیتریل در تعادل با سوخت مایع JP-10 و داده‌های آزمون تورم.

نوع حلال	وزن نمونه خشک (gf) ( $m_{di}$ )	وزن نمونه متورم (gf) ( $m_{wi}$ )	وزن حلال جذب شده (gr) ( $m_s$ )	حجم حلال جذب شده ( $\text{cm}^3$ ) ( $v_s$ )	وزن لاستیک در نمونه (gr) ( $m_i$ )	حجم لاستیک در نمونه ( $\text{cm}^3$ ) ( $v_i$ )	مقدار $\bar{\phi}$
سوخت مایع JP-10	0.8233	0.8334	0.101	0.109	0.402	0.4258	0.9750



جدول ۹- مقدار متوسط کسر حجمی لاستیک در تعادل با سوخت مایع JP-10 و داده‌های آزمون تورم برای لاستیک‌های شاهد.

نوع لاستیک	وزن نمونه خشک (gr) ( $m_{ai}$ )	وزن نمونه متورم (gr) ( $m_{wi}$ )	وزن جذب‌شده (gr) ( $m_s$ )	حجم حلال جذب‌شده ( $cm^3$ ) ( $v_s$ )	وزن لاستیک در نمونه ( $cm^3$ ) ( $v_{ri}$ )	مقدار $\bar{\phi}$
لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر	۰/۵۲۹۳	۲/۱۶۷۶	۱/۶۳۷۲	۱/۷۶۶۳	۰/۴۷۹۹	۰/۲۴۰۱
لاستیک بیوتیل	۰/۴۶۵۵	۲/۱۳۹۵	۱/۶۷۴۰	۱/۸۰۴۹	۰/۴۱۵۶	۰/۲۰۱۱

جدول ۱۰- نتایج انحلال‌پذیری لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و بیوتیل در سوخت JP-10.

نوع لاستیک	حجم سوخت JP-10 (cc)	وزن لاستیک حل شده (gr)	میزان حلالیت لاستیک در JP-10 (gr/۱۰۰cc)
اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر	۱۴۲/۳۳	۱۹/۱۵	۱۳/۷۰
بیوتیل	۵۶/۸۹	۱۲/۰۰	۲۱/۰۹

## مراجع

- [1] Maurice, L. Q.; Lander, H.; Edwards, T.; Harrison W. E. "Advanced Aviation Fuels: A Look Ahead Via a Historical Perspective"; Fuel 2001, 80, 747-756.
- [2] Edwards, T. "Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003"; J. Propul. Power 2003, 19, 1089-1107.
- [3] Anthony, A.; Thomas, M. D. "JP-4 and JP-9 Fuel Toxicity Studies Using Fresh Water Fish and Aufwuchs"; University of California; Irvine; AMRL-TR-76-50; Annual Report; 1976.
- [4] John, P. "Military Aviation Fuel"; Military Aviation Fuel, 2011.
- [5] Hudzik, J. M.; Asatryan, R.; Bozzelli, J. W. "Thermochemical Properties of exo Tricyclo [5.2.1.02,6] decane (JP-10 Jet Fuel) and Derived Tricyclodecyl Radicals"; J. Phys. Chem. A. 2010, 114, 9545-9553.
- [6] Li, S. C.; Varatharajan, B.; Williams, F. A. "Chemistry of JP-10 Ignition"; AIAA. J. 2001, 39, 2351-2356.
- [7] Parsinejad, F.; Arcari, C.; Metghalchi, H. "Flame Structure and Burning Speed of JP-10 Air Mixtures"; Combust. Sci. & Tech. 2006, 178, 975-1000.
- [8] Vandewiele, N. M.; Magoon, G. R.; Van Geem, K. M.; Reyniers, M. F.; Green, W. H.; Marin G. B. "Experimental and Modeling Study on the Thermal Decomposition of Jet Propellant-10"; Energ. Fuel 2014, 28, 4976-4985.
- [9] Xing, E.; Zhang, X.; Wang, L.; Mi, Z. "Greener Synthesis Route for Jet Propellant-10: The Utilization of Zeolites to Replace AlCl<sub>3</sub>"; Green Chem. 2007, 9, 589-593.
- [10] Bruno, T. J.; Huber, M. L.; Laesecke, A.; Lemmon, E. W.; Perkins, R. A. "Thermochemical and Thermophysical Properties of JP-10"; National Institute of Standards and Technology 2006, 4 & 18.
- [11] Ho Oh, C.; In Park, D.; Ryu, J. H.; Cho, J. H.; Han, J. S. "Syntheses and Characterization of Cyclopropane-fused Hydrocarbons as New High Energetic Materials"; Korean Chem. Soc. 2007, 28, 2, 322-324.
- [12] Fedors, R. F. "A Method for Estimating Both the Solubility Parameters and Molar Volumes of liquids"; Polym. Eng. Sci. 1974, 14, 147-154.
- [13] Subrahmanyam, C. V. S.; Prakash, K. R.; Rao, P. G. "Estimation of the Solubility Parameter of Trimethoprim by Current Methods"; Pharm. Acta. Helv. 1996, 71, 3, 175-183.
- [14] Martini, L. G.; Avontuur, P.; George, A.; Willson, R. J.; Crowley, P. J. "Solubility Parameter and Oral Absorption"; Eur. J. Pharm. Biopharm. 1999, 48, 259-263.

همان طور که از نتایج حاصل از انحلال لاستیک‌ها در سوخت JP-10 مشخص است، غلظت محلول‌های بدست‌آمده برابر با ۱۳/۷۰ (gr/۱۰۰cc) برای اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و ۲۱/۰۹ (gr/۱۰۰cc) برای بیوتیل است که در محدوده غلظت محلول‌های پلیمری غلیظ گزارش شده در منابع قرار دارد [۲۸ و ۲۹]، و نمایان‌گر امتزاج‌پذیری مناسب این لاستیک‌ها با سوخت JP-10 است. این میزان مناسب امتزاج‌پذیر حاکی از نزدیک بودن ضریب حلالیت این سوخت با لاستیک‌های استفاده شده است و تصدیق‌کننده میزان ارزیابی شده ضریب حلالیت ۱۵/۸۰ برای سوخت JP-10 است.

## ۴- نتیجه‌گیری

رفتار شبکه‌های لاستیکی در مجاورت با طیفی از حلال‌ها نشان‌دهنده وجود یک نمودار تورم تعادلی برای شبکه لاستیکی است، به طوری که با رسم مشخصه‌های ترموی لاستیک مانند درصد تورم آن یا کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال بر اساس مشخصات شیمی - فیزیکی حلال، و به طور مشخص ضریب حلالیت حلال‌ها، مقادیر مناسبی از مشخصه‌های شیمی - فیزیکی لاستیک یا حلال خاصی قابل ارزیابی است. رسم نمودار کسر حجمی لاستیک در تعادل با حلال و ضریب حلالیت حلال‌های مختلف نشان‌دهنده پیروی رفتار تورم شبکه لاستیک از منحنی درجه دوم با ضریب همبستگی بالای این نمودار است. این همبستگی امکان ارزیابی مناسب داده‌های ترموی و شیمی - فیزیکی لاستیک به وسیله نمودار تورم تعادلی آن را مهیا می‌کند. ارزیابی ضریب حلالیت سوخت مایع JP-10 با استفاده از نمودار تورم تعادلی لاستیک منجر به گزارش مقدار ۱۵/۸۰ (MPa<sup>0.5</sup>) به عنوان ضریب حلالیت این سوخت شد. بررسی تورم و حلالیت لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر و لاستیک بیوتیل، که ضریب حلالیت نزدیکی به ضریب حلالیت ارزیابی شده برای سوخت JP-10 دارد، نیز حاکی از سازگاری و امتزاج‌پذیری عالی این لاستیک با سوخت JP-10 است، و اعتباری بر صحت ارزیابی ضریب حلالیت سوخت JP-10 به وسیله نمودار تورم تعادلی شبکه لاستیکی را ارائه می‌کند.

- [22] Gomez, J. L.; Rodríguez, G. A.; Cristancho, D. M.; Delgado, D. R.; Mora, C. P.; Yurquina, A.; Martínez, F. "Extended Hildebrand Solubility Approach applied to Nimodipine in PEG 400 + Ethanol Mixtures"; *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.* 2013, 42, 103-121.
- [23] Sathesh Babu, P. R.; Subrahmanyam, C. V. S.; Thimmasetty, J.; Manavalan, R.; Valliappan, K. "Extended Hansen's Solubility Approach: Meloxicam in Individual Solvents"; *Pak. J. Pharm. Sci.* 2007, 20, 311-316.
- [24] Seehra, M.S.; Yalamanchi, M.; Singh, V. "Structural Characteristics and Swelling Mechanism of Two Commercial Nitrile-butadiene Elastomers in Various Fluids"; *Polym. Test* 2012, 31, 564-571.
- [25] Hansen, C. M. "Hansen-Solubility-Parameters, A User's Handbook"; CRC Press, 2007, 38 & 278.
- [26] Bilati, U.; Allemann, E.; Doelker, E. "Development of a Nanoprecipitation Method Intended for the Entrapment of Hydrophilic Drugs Into Nanoparticles"; *Eur. J. Pharm. Sci.* 2005, 24, 67-75.
- [27] American Military Standard "Propellant, High Density Synthetic Hydrocarbon Type, Grade JP-10"; MIL-DTL-87107E; 2012, January.
- [28] Sperling, L. H. "Introduction to Physical Polymer Science"; John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2006, 151-152.
- [29] Teraoka, I. "Polymer Solutions- An Introduction to Physical Properties"; John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2002, 84, 295-301.
- [15] Forster, A.; Hempenstall, J.; Tucker, I.; Rades, T. "Selection of Excipients for Melt Extrusion with Two Poorly Water-Soluble Drugs by Solubility Parameter Calculation and Thermal Analysis"; *Int. J. Pharm.* 2001, 226, 147-161.
- [16] Eslamimanesh, A.; Esmailzadeh, F. "Estimation of Solubility Parameter by the Modified ER Equation of State"; *Fluid Phase Equilibria* 2010, 291, 141-150.
- [17] Kitak, T.; Dumicic, A.; Planinsek, O.; Sibanc, R.; Srcic, S. "Determination of Solubility Parameters of Ibuprofen and Ibuprofen Lysinate"; *Molecules* 2015, 20, 21549-21568.
- [18] Rogel, E. "Theoretical Estimation of the Solubility Parameter Distributions of Asphaltenes, Resins, and Oils from Crude Oils and Related Materials"; *Energy & Fuels* 1997, 11, 920-925.
- [19] Thimmasetty, J.; Subrahmanyam, C. V. S.; Vishwanath, B. A.; Babu, P. R. S. "Solubility Parameter Estimation of Celecoxib by Current Methods"; *Asian J. Res. Chem.* 2009, 2, 188-195.
- [20] Lee, S. H.; Lee, S. B. "The Hildebrand Solubility Parameters, Cohesive Energy Densities and Internal Energies of 1-Alkyl-3-Methylimidazolium-Based Room Temperature Ionic Liquids"; *Chem. Commun.* 2005, 3469-3471.
- [21] Subrahmanyam, C. V. S.; Sreenivasa Reddy, M.; Venkata Rao, J.; Gundu Rao, P. "Irregular Solution Behavior of Paracetamol in Binary Solvents"; *Int. J. Pharm.* 1992, 78, 17-24.

Archive of SID