

مجتمع آزمایشگاهی ، آموزشی و فنی مهندسی دانش بنیان  
مرجع و همکار سازمان ملی استاندارد ایران

حسین سعادت زاده      کارشناس ارشد و جانشین مدیر فنی آزمایشگاه



---

## مروری بر محاسبه شاخص ستان سوخت دیزل و فراورده های نفتی از طریق معادله چهار متغییره

---



### چکیده

شاخص ستان، اندازه گیری نسبی تاخیر زمانی بین تزریق سوخت به محفظه و شروع احتراق است. سوخت برای موتورهای احتراق تراکمی، باید به راحتی از بین برود. احتراق در فاز گاز اتفاق می افتد. بنابراین ، برای یک سوخت مایع ، اولین گام ها به سمت اشتعال شامل انتقال از مایع به گاز است. زمان مورد نیاز برای این انتقال "تأخیر فیزیکی" در احتراق است و شامل مدت زمان مورد نیاز برای یک قطره سوخت برای گرم شدن ، بخار شدن و مخلوط شدن با هوای گرم در سیلندر است. اگر هنگام تزریق سوخت به داخل سیلندر به سرعت رخ ندهد ، سوخت و هوا از پیش مخلوط شده جمع می شوند به گونه ای که هنگام احتراق سرعت سوختن خیلی سریع صورت می گیرد. سوختن سریع باعث افزایش فشار می شود که می تواند منجر به ضربه موتور شود که این مورد می تواند باعث کاهش کارایی و آسیب رساندن به موتور شود. بنابراین، توانایی درجه بندی کیفیت اشتعال سوخت های احتراق فشاری برای فرمولاسیون سوخت دیزل مهم است. بدون کیفیت جرقه زنی سوخت (تعداد ستان به اندازه کافی)، موتور به سختی روشن می شود و ضعیف کار می کند.

کلمات کلیدی: عدد ستان ، احتراق ، تاخیر فیزیکی ، سوخت.

از پارامترهای کیفی احتراق سوخت، شاخص ستان<sup>1</sup> می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی آرام‌سوزی و کیفیت سوخت دیزل است [1]. یکی از روش‌هایی که بدون صرف هزینه و زمان زیاد می‌توان این پارامتر را اندازه‌گیری نمود، استاندارد INSO 8525 می‌باشد. این استاندارد برای سوخت‌های بخش میانی برج تقطیر حاصل از منابع نفتی کاربرد دارد.

در سال‌های اخیر بدلیل کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست‌محیطی و قابلیت تجدیدپذیری سوخت‌های بیودیزل تحقیقات وسیعی در راستای امکان استفاده از آن به جای سوخت گازوئیل انجام یافته است. منابعی به عنوان سوخت جایگزین می‌توانند مطرح شوند که اولاً منابعی ارزان قیمت و در دسترس (عدم وابستگی به منطقه‌ی جغرافیایی) بوده و ثانياً دوست‌دار محیط زیست باشند که از آن جمله می‌توان به سوخت‌های بیولوژیکی به عنوان یک پیشنهاد اشاره کرد. مواد بیولوژیک پایه آلی داشته و به عنوان منابع انرژی قابل بازیابی، قابلیت مستقیم به انرژی و یا مواد حامل انرژی را دارند. یکی از مهم‌ترین سوخت‌های بیولوژیک، بیودیزل‌ها می‌باشند. بیودیزل را می‌توان از روغن‌های گیاهی تازه یا کارکرده و چربی‌های حیوانات تولید نمود. استفاده از روغن‌های گیاهی به طور مستقیم در موتور دیزل، با توجه به ویسکوزیته‌ی بالای روغن، باعث بوجود آمدن مشکلاتی از قبیل پایین بودن اشتعال و احتراق ناقص سوخت می‌شود. از طرف دیگر با تشکیل لایه‌های از سوخت محترق نشده روی دیواره‌ی سیلندر، کار سیستم روانکاری را مختل مینماید. از جمله مهم‌ترین فرآیندها در موتورهای احتراق داخلی، فرآیند احتراق میباشد [2].

زمان مورد نیاز برای انتقال سوخت از حالت مایع به گاز تاخیر فیزیکی در احتراق می‌باشد. از پارامترهای مهم در فرآیند احتراق، درجه آرام‌سوزی سوخت است که نشان‌دهنده‌ی کیفیت احتراقی سوخت میباشد که موارد زیر در مورد تاخیر فیزیکی نقش دارند:

تراکم و دمای هوا در سیلندر

سرعت و تلاطم هوا

اتمی شدن، نفوذ و شکل اسپری

<sup>1</sup>Cetane number

از جمله مهمترین خصوصیات مورد بررسی سوخت ها شامل موارد زیر می باشد [3,4]

دانسیتته<sup>2</sup>

ویسکوزیته<sup>3</sup>

کشش سطحی<sup>4</sup>

تقطیر<sup>5</sup>

آنتالپی تبخیر<sup>6</sup>

فشار بخار<sup>7</sup>

اشتعال<sup>8</sup>

به دنبال فرآیندهای فیزیکی تبخیر و اختلاط هوا ، توالی واکنش‌های شیمیایی رخ می دهد که در آن سوخت فاز گاز با اکسیژن واکنش نشان می دهد. به منظور اشتعال ، سوخت باید تا دمای کافی گرم شود تا برخی از پیوندهای ضعیف درون مولکول ها شکسته شوند و رادیکال تشکیل دهند. سرعت محدود این واکنش های اکسیداسیون تشکیل رادیکال مسئول تاخیر شیمیایی در احتراق فشاری است. هنگامی که رادیکال های آزاد به غلظت کافی رسید، شعله ور شدن (اشتعال) سریع اتفاق می افتد. برای تخمین درجه‌ی آرام سوزی سوخت، از عدد ستان و استفاده میکنند.

---

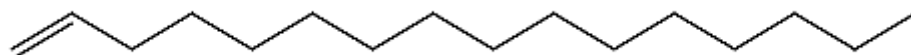
<sup>2</sup> Density <sup>3</sup> Viscosity <sup>4</sup> Surface tension <sup>5</sup> Distillation <sup>6</sup> Enthalpy of vaporization <sup>7</sup> Vapor pressure <sup>8</sup> Flash

## 2- اصول شاخص ستان

### 2-1- سوخت های مرجع

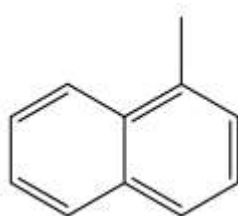
در طول دهه 1930 ، بویلرگ<sup>9</sup> و بروزی<sup>10</sup> [5] از آزمایشگاه دلفد در هلند به دنبال روشی برای تعیین کیفیت اشتعال سوخت دیزل بودند که شبیه به روش درجه بندی اکتان برای بنزین با استفاده از دو سوخت هیدروکربن مرجع شامل 1- هگزا دکان<sup>11</sup> و  $\alpha$ -متیل نفتالین<sup>12</sup> بود.

اولین سوخت مرجع ، 1- هگزا دکان ، که همچنین به عنوان ستان شناخته می شود ، مانند شکل 1 ساختار زنجیر مستقیم و طولانی دارد و به راحتی اکسید می شود. به این سوخت عدد ستان 100 اختصاص داده شد



شکل 1: ساختار 1- هگزادکان

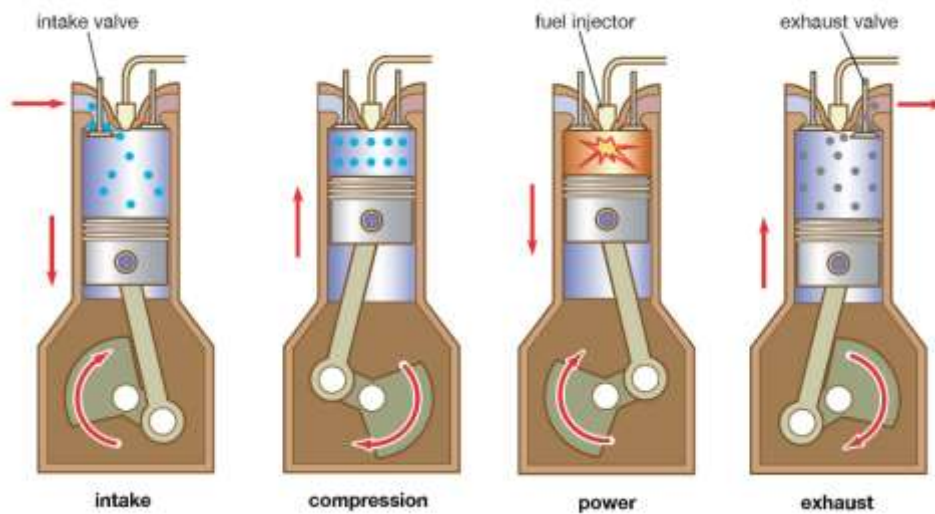
دومین سوخت مرجع ،  $\alpha$ -متیل نفتالین ، دارای دو حلقه آروماتیک است ، همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است ، و در برابر احتراق خودکار بسیار مقاوم است. به این سوخت عدد ستان صفر در نظر گرفته شد که عدد ستان یک سوخت (از نظر جرم) در مخلوطی از 1- هگزا دکان و  $\alpha$ -متیل نفتالین است که عملکرد همان اشتعال سوخت مورد آزمایش را نشان می دهد.



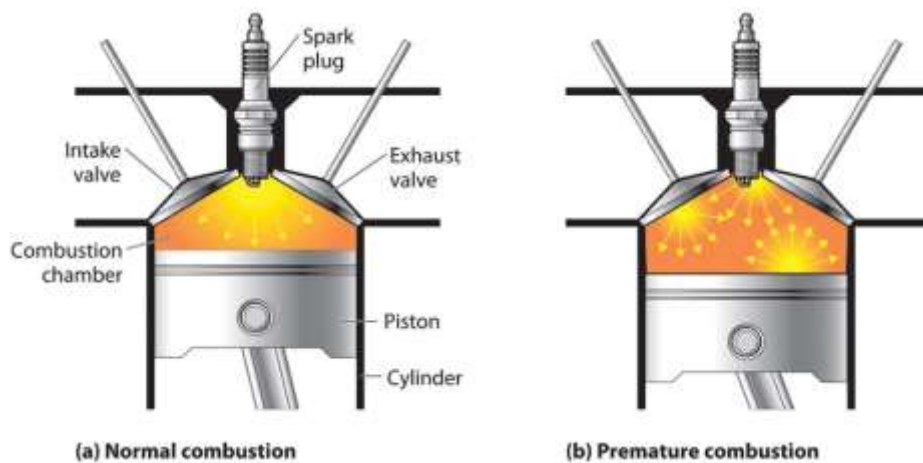
شکل 2: ساختار  $\alpha$ -متیل نفتالین

<sup>9</sup>Boerlage <sup>10</sup> Broeze <sup>11</sup> 1-hexadecene <sup>12</sup>  $\alpha$ -methylnaphthalene

در یک موتور دیزلی طی مرحله اول هوای خالص مکش می‌شود. در طول مرحله دوم هوا فشرده شده و دمای آن افزایش می‌یابد تا اینکه سوخت به داخل سیلندر تزریق گردد. پس از رسیدن به شرایط احتراق سوخت به طور خود به خود و بدون جرقه زدن شمع، در اثر فشار و دمای بالا می‌سوزد و در مرحله سوم سیلندر منبسط می‌شود. نهایتاً در مرحله چهارم گازهای حاصل از احتراق از طریق اگزوز از محفظه خارج می‌شوند. با توجه به موارد ذکر شده، ساختار شیمیایی گازوئیل به عنوان سوخت موتور دیزلی و شرایط موتور دیزل باید به نحوی باشد که امکان احتراق خود به خود داخل محفظه احتراق را تسهیل کنند. (شکل 3 و 4)



شکل 3: عملکرد چهار زمانه موتور دیزلی برای احتراق



شکل 4: نحوه احتراق سوخت: (a) احتراق منظم (b) احتراق نامنظم

بهبود عدد ستان سوخت های دیزلی معمولاً به وسیله یک سری مواد افزودنی که به احتراق خود به خودی داخل موتور کمک می کنند انجام می شود. این مواد افزایش دهنده عدد ستان اصطلاحاً پروستان (Pro – Cetane) نامیده می شوند. پروستان ها اکسیدکننده های ناپایداری هستند که در اثر تجزیه، رادیکال های آزاد تولید می کنند و فرآیند احتراق خود به خود در داخل موتور دیزل را تسهیل می کنند. دو گروه از ترکیبات آلی به نام پراکسیدها (R – O – O – R') و نیترات ها از مواد معروف افزایش دهنده عدد ستان هستند. با توجه به هزینه کمتر، در دسترس بودن و استفاده راحت تر معمولاً از نیترات هایی مانند اتیل هگزیل نیترات به عنوان پروستان بهبود دهنده عدد ستان استفاده می شود.

گستره پیشنهادی خواص سوخت برای کاربرد این استاندارد مطابق جدول 1 می باشد:

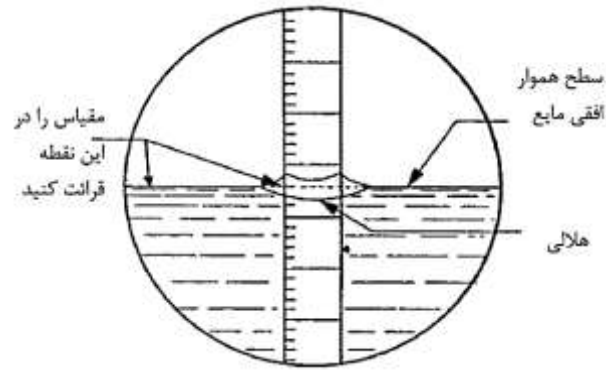
گستره پیشنهادی	خاصیت سوخت
۵۶٫۵ – ۳۲٫۵	عدد ستان
۸۹۵٫۰ – ۸۰۵٫۰	چگالی در دمای ۱۵ °C (kg/m <sup>3</sup> )
۲۵۹ – ۱۷۱	دمای بازیابی ۱۰٪ (حجمی/حجمی) تقطیر (°C)
۳۰۸ – ۲۱۲	دمای بازیابی ۵۰٪ (حجمی/حجمی) تقطیر (°C)
۳۶۳ – ۲۵۱	دمای بازیابی ۹۰٪ (حجمی/حجمی) تقطیر (°C)

جدول 1: گستره پیشنهادی خواص سوخت

## 2-2- دانسیته

برای تعیین دانسیته [6] و دانسیته نسبی نفت خام، فراورده های نفتی یا مخلوط های از فراورده های نفتی و غیر نفتی که در حالت عادی به صورت مایع حمل می شوند و دارای فشار بخار 101.325 کیلوپاسکال یا کمتر با استفاده از روش هیدرومتر مطابق استاندارد ملی INSO 197 صورت میگیرد.

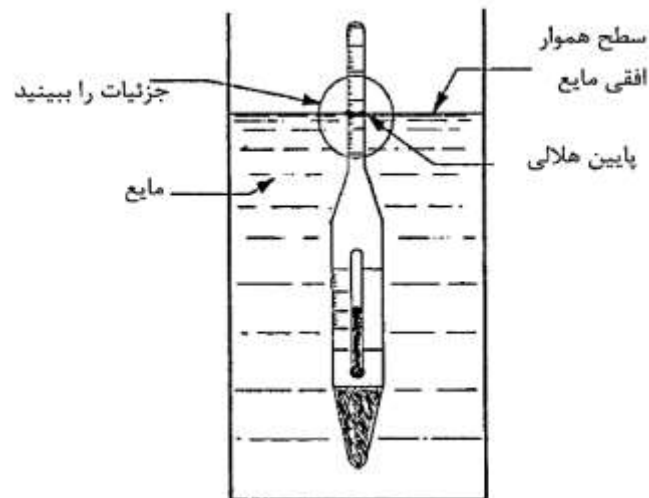
دانسیته، مطابق شکل 5 در دمای محیط آزمایش شده و با استفاده از مجموعه ای از محاسبات و جدول های استاندارد بین المللی به معادل آن در دمای 15 درجه سانتی گراد یا 60 درجه فارنهایت تصحیح می شوند.



شکل 5: قرائت مقیاس هیدرومتر برای فراورده های نفتی

## 1-2-2- هیدرومتر

هیدرومتر که با نام چگالی سنج نیز شناخته می شود، تجهیزاتی (شکل 6) است که به کمک آن میتوان چگالی نسبی سیالات مختلف را اندازه گیری کرد. هیدرومترها باید تصدیق شده یا تایید شده باشند. تصدیق باید با مقایسه با یک هیدرومتر تایید شده یا به وسیله استفاده از یک ماده مرجع تایید شده ویژه برای استفاده در دمای مرجع انجام شود.



شکل 6: هیدرومتر اندازه گیری دانسیته

## 3-2- تقطیر در اتمسفر

به منظور تعیین دماهای 10% ، 50% و 90% (حجمی /حجمی) از نمونه بازیافت شده مطابق استاندارد ملی INSO 6261 صورت می‌گیرد. نمونه بر اساس ترکیب، فشار بخار، نقطه جوش اولیه یا نقطه جوش پایانی و یا هر دو در یکی از چهار گروه مطابق جدول 2 قرار می‌گیرد. ترتیب قرارگیری دستگاه، دمای مبرد و دیگر متغیرهای عملیاتی توسط گروهی که نمونه در آن قرار می‌گیرد، مشخص می‌شوند. 100 میلی لیتر نمونه (با توجه به گروهی که قرار دارد) تقطیر می‌شود. تقطیر در یک دستگاه تقطیر ناپیوسته آزمایشگاهی در فشار محیط و در شرایطی طراحی می‌گردد که به طور تقریبی معادل تقطیر جزء به جزء با یک سینی تتوری می‌باشد (شکل 5). اجزاء اصلی دستگاه تقطیر عبارتند از: [7]

بالن تقطیر، مبرد، حمام سرد کن، یک محفظه فلزی یا حصار برای بالن تقطیر، منبع حرارت، نگه دارنده بالن، وسیله اندازه گیری دما (برای گستره های دمای پایین از دماسنج های ASTM 7C/IP 5C و گستره دمای بالا دمایی از دماسنج ASTM 8C/IP 6C) و استوانه دریافت کننده برای جمع آوری محصول تقطیر.

گروه ۴	گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱	
				مشخصات نمونه نوع محصول تقطیر
<۶۵٫۵	<۶۵٫۵	<۶۵٫۵	≥ ۶۵٫۵	فشار بخار <sup>a</sup> در ۳۷٫۸ °C (kPa)
<۹٫۵	<۹٫۵	<۹٫۵	≥ ۹٫۵	۱۰۰ °F (psi)
>۱۰۰	≤ ۱۰۰			تقطیر IBP (°C)
>۲۱۲	≤ ۲۱۲			(°F)
>۲۵۰	>۲۵۰	≤ ۲۵۰	≤ ۲۵۰	EP (°C)
>۴۸۲	>۴۸۲	≤ ۴۸۲	≤ ۴۸۲	(°F)
<sup>a</sup> طبق استانداردهای ASTM D323، ASTM D4953، ASTM D5190، ASTM D5191، ASTM D5191، IP69 یا IP394				

جدول 2: مشخصات گروه ها



دماهای خوانده شده در بازه های حجمی 10%، 50% و 90% را نسبت به فشار 760 میلی متر جیوه تصحیح گردد. برای هر انجام تصحیح با استفاده از معادله (سیدنی یانگ) طبق رابطه زیر انجام گردد:

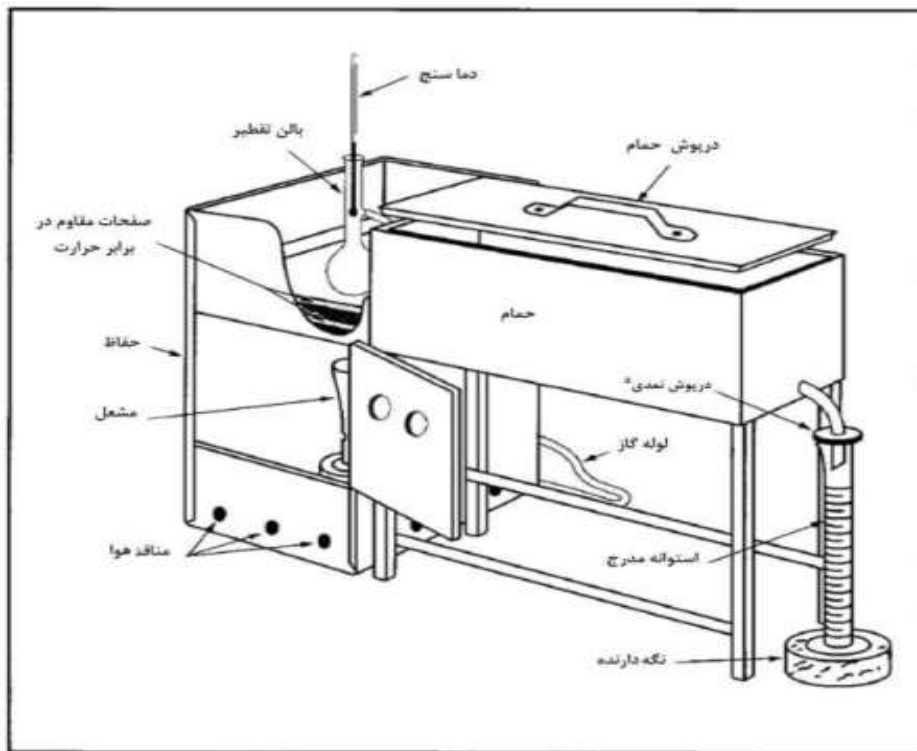
$$C_C = 0.00012 (760 - P) * (273 + t_c)$$

که در آن:

$C_C$ : تصحیح هایی که باید به صورت جبری به دمای خوانده شده اضافه گردد.

$P$ : فشار خوانده شده در زمان و محل آزمون

$t_c$ : دمای خوانده شده (°C)



شکل 5: مجموعه دستگاه تقطیر

### 3- اندازه گیری شاخص ستان

در محدوده گستره پیشنهادی عدد ستان (32.5 تا 56.5)، خطای مورد انتظار از طریق معادله شاخص ستان ، برای 65% سوخت های حاصل از تقطیر، کم تر از  $\pm 2$  عدد ستان خواهد بود . خطا برای سوخت هایی که خواص آن ها خارج از گستره پیشنهادی کاربرد است، ممکن است بزرگ تر باشد [8] .

#### 3-1- اندازه گیری شاخص ستان (CI) با استفاده از معادله

$$CI = 452 + 0.0892T_{10N} + (0.131 + 0.90IB) T_{50N} + (0.0523 - 0.42B) T_{90N} + \dots + 0.00049 (T_{10N}^2 - T_{90N}^2) + 107B + 60B^2$$

که در آن:

$$T_{10N} = T_{10} - 215,$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260,$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310,$$

$T_{10}$  دمای بازیابی 10% (حجمی / حجمی) تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

$T_{50}$  دمای بازیابی 50% (حجمی / حجمی) تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

$T_{90}$  دمای بازیابی 90% (حجمی / حجمی) تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

$$B = \left[ \exp^{(-0.0035 DN)} \right] - 1$$

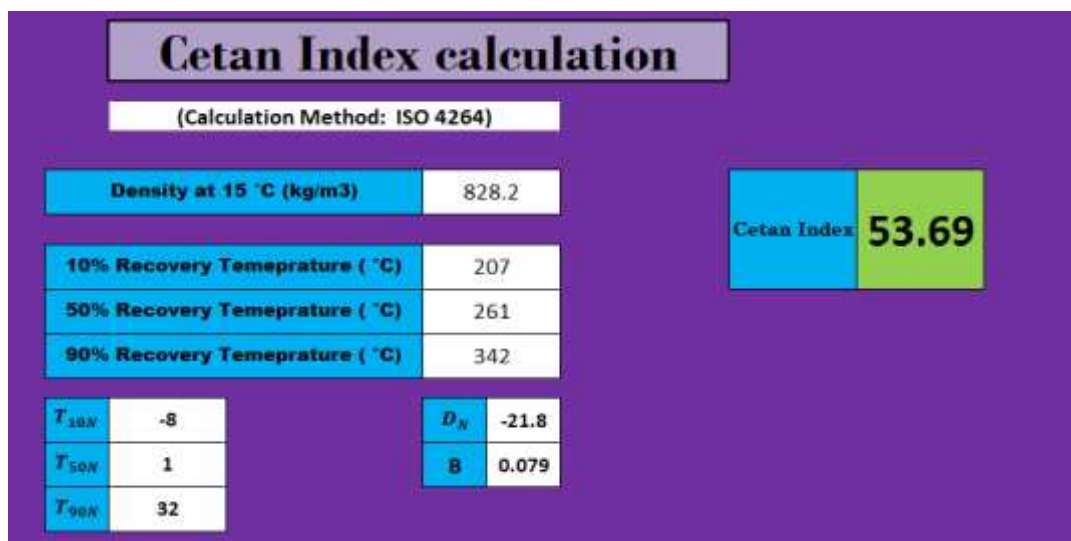
$$DN = D - 850$$

D چگالی در دمای 15 درجه سانتی گراد  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

یک مثال از روش معادله برای یک سوخت با شاخص ستان 53.69 مطابق جدول 3 و 4 نشان داده شده است.

ردیف	آزمون	روش آزمون	واحد	نتیجه
1	تقطیر در فشار اتمسفر	ASTM D 86	°C	IBP
				5%
				10%
				20%
				30%
				40%
				50%
				60%
				70%
				80%
				90%
				95%
				FBP
				Residue
				Loss
				Recovery@390°C
				Recovery
2	دانسیته در 15 °C	ASTM D 1298	kg/m <sup>3</sup>	828.2

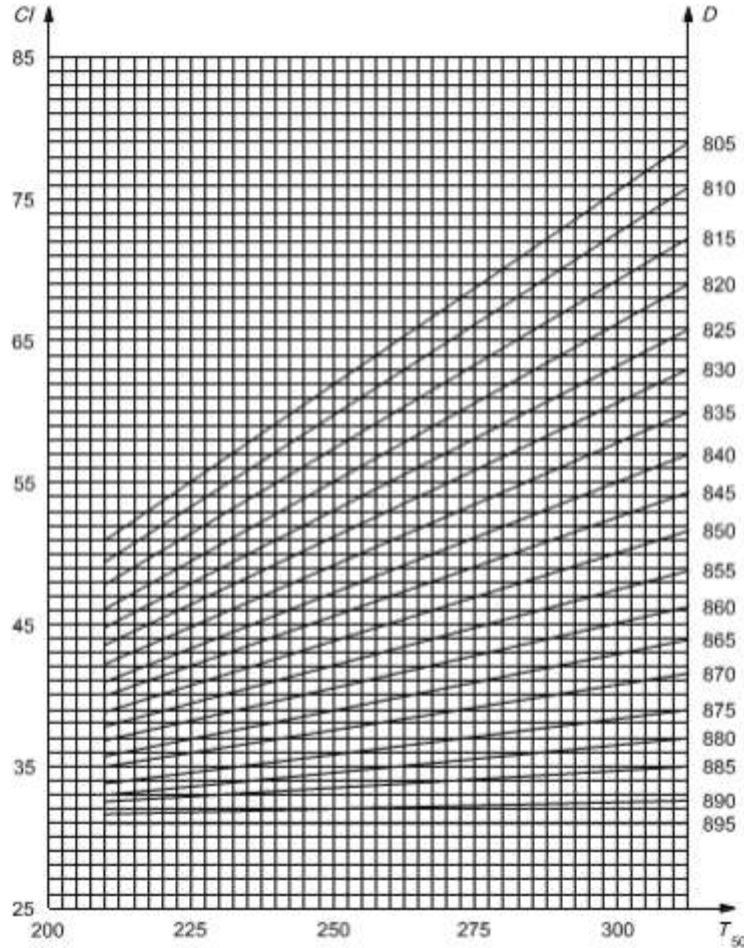
جدول 3: نتایج آزمایش تقطیر در اتمسفر و دانسیته



جدول 4: نتیجه محاسبه شده شاخص ستان برای نمونه سوخت با استفاده از معادله

### 2-3- اندازه گیری شاخص ستان (CI) با استفاده از نمودار

از روی نمودار در شکل های 6، 7، و 8 برای بدست آوردن شاخص ستان به صورت زیر استفاده گردد:  
الف) دانسیته و مقادیر دماهای بازیابی 50% (حجمی / حجمی) تقطیر را در شکل 6 وارد گردد تا تخمینی از شاخص ستان سوخت به دست آید.



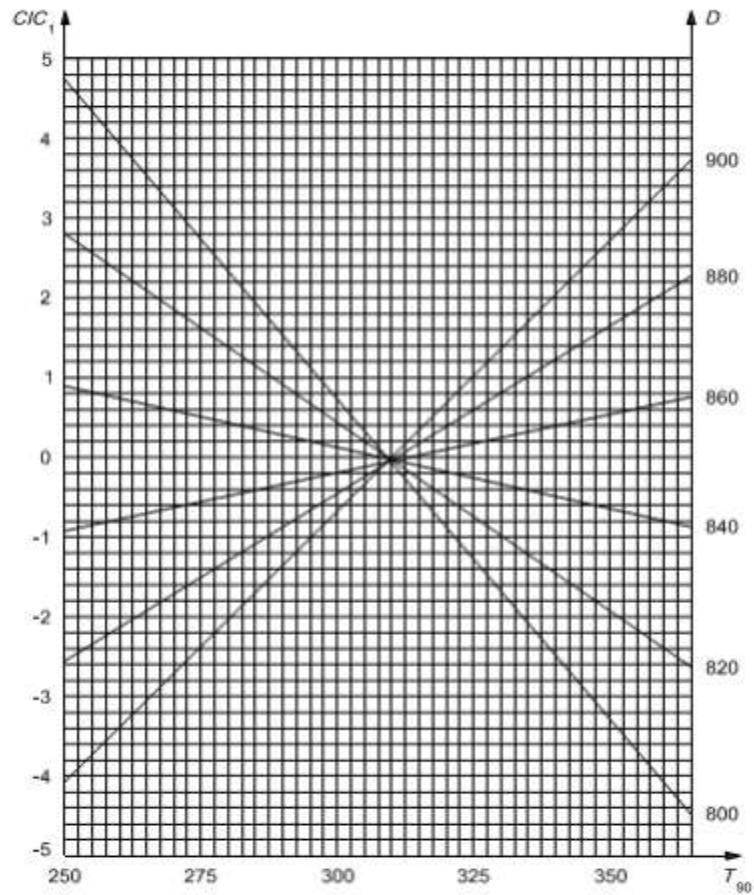
شکل 6: شاخص ستان - تخمین بر اساس چگالی و دمای بازیابی 50% تقطیر

CI شاخص ستان

$T_{50}$  دمای بازیابی 50% تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

D چگالی در دمای 15 درجه سانتی گراد بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

ب) دانسیته و مقادیر دماهای بازیابی 90% (حجمی / حجمی) تقطیر را در شکل 7 وارد گردد تا ضریب تصحیح برای انحراف در این پارامترهای حاصل از مقادیر میانگین تعیین شود.



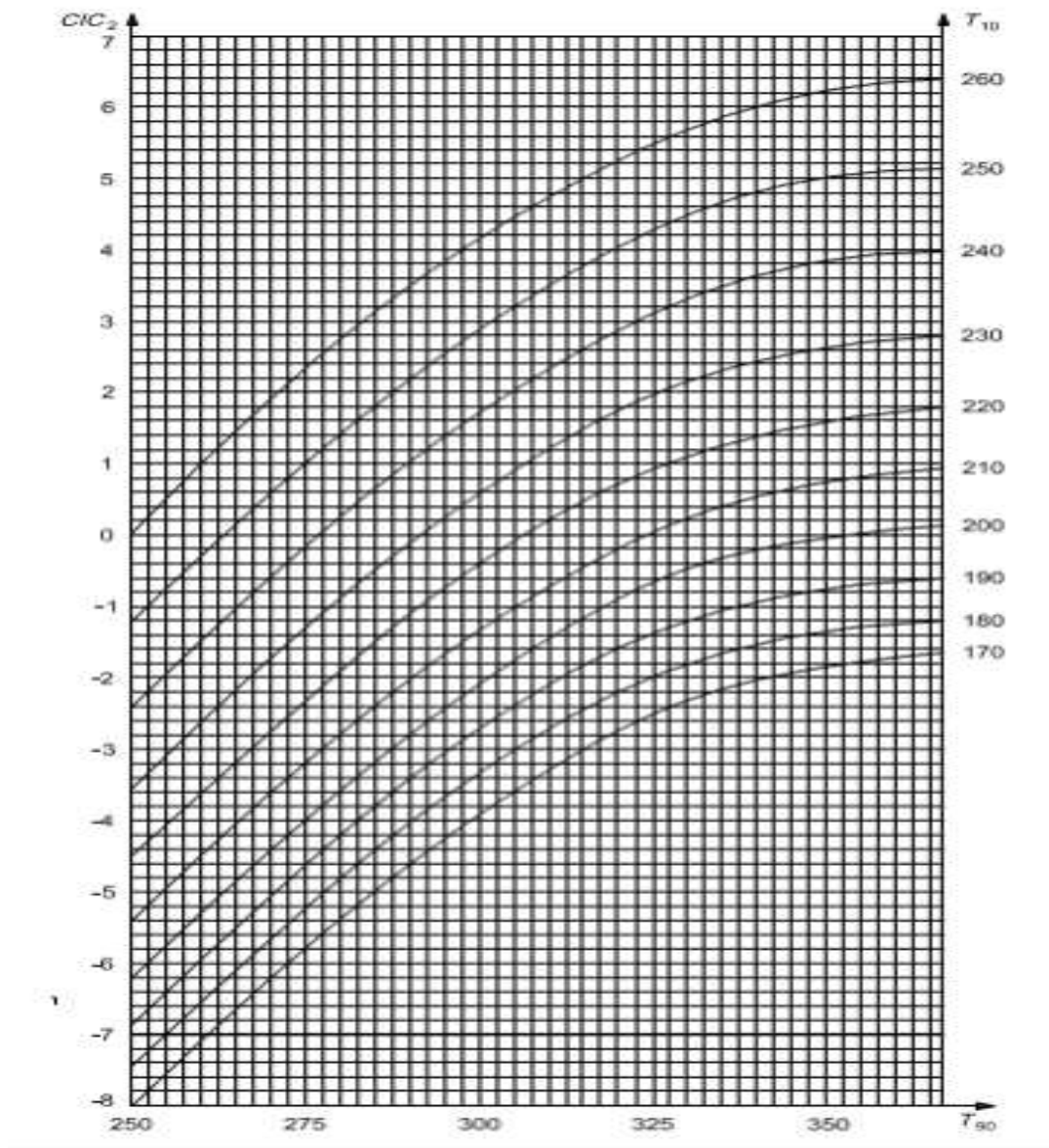
شکل 7: تصحیح شاخص ستان برای انحراف های حاصل از مقادیر میانگین بر اساس چگالی و دمای بازیابی 90% تقطیر

$CIC_1$  تصحیح شاخص ستان

$T_{90}$  دمای بازیابی 90% تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

D چگالی در دمای 15 درجه سانتی گراد بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

پ) مقادیر دماهای بازیابی 10% و 90% (حجمی / حجمی) تقطیر را در شکل 8 وارد گردد تا دومین ضریب تصحیح برای انحراف در این پارامترهای حاصل از مقادیر میانگین تعیین شود.



شکل 8: تصحیح شاخص ستان برای انحراف های حاصل از مقادیر میانگین بر اساس دمای بازیابی 10% و 90% تقطیر

## CIC<sub>2</sub> تصحیح شاخص ستان

T<sub>90</sub> دمای بازیابی 90% تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

T<sub>10</sub> دمای بازیابی 10% تقطیر بر حسب درجه سلسیوس

یک مثال با استفاده از نمودار برای سوخت با عدد ستان 46.0 مطابق جدول نشان داده شده است.

860.0	چگالی در دمای 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )
220	دمای بازیابی 10% (حجمی/حجمی) تقطیر (°C)
290	دمای بازیابی 50% (حجمی/حجمی) تقطیر (°C)
340	دمای بازیابی 90% (حجمی/حجمی) تقطیر (°C)
44.1	تخمین حاصل از شکل 6
+0.4	تخمین حاصل از شکل 7
+1.5	تخمین حاصل از شکل 8
46.0	شاخص ستان (CI)

جدول 5: نتیجه محاسبه شده شاخص ستان برای نمونه سوخت با استفاده از نمودار

### 4- نتیجه گیری

هدف از نگارش این مقاله، نگاهی به استاندارد ملی INSO 8525 جهت تعیین شاخص ستان سوخت های دیزلی و فراورده های نفتی می باشد. تعیین عدد ستان نیاز به موتور مخصوص دارد و از طرفی آزمایش آن پر هزینه و وقتگیر است. لذا برای تخمین درجه ی آرام سوزی سوخت، معمولاً به جای عدد ستان از شاخص ستان استفاده گردد. شاخص ستان، روش جایگزین برای بیان عدد ستان نسبت بلکه ابزاری تکمیلی است که با توجه محدودیت های موجود استفاده می شود.

### 5- سپاسگزاری

از مدیرعامل محترم شرکت مشاوران آزمایش نفت ایرانیان، جناب آقای وحید ابراهیمی جهت ارائه نظرهای ساختاری و حمایت های بی شائبه شان کمال تشکر و قدرانی می شود.

- [1] Allard, L.N.; Webster, G.D.; Ryan, T.W.; Baker, G.; Beregszaszy, A.; Fairbridge, C.W.; Ecker, A.; Rath, J. (1999). "Analysis of the Ignition Behaviour of the ASTM D-613 Primary Reference Fuels and Full Boiling Range Diesel Fuels in the Ignition Quality Tester (IQT) – Part III." SAE Technical Paper 1999-01-3591. Accessed May 30, 2014.
- [2] Serdari, A.; Lois, E.; Stournas, S. (1999). "Impact of Esters of Mono- and Dicarboxylic Acids on Diesel Fuel Quality." *Ind. Eng. Chem. Res.* (38:9); pp. 3543–3548. Accessed May 30, 2014.
- [3] For a more complete discussion, see Obert, E.F. (1973). *Internal Combustion Engines and Air Pollution*. New York: Intext Educational, p. 299ff.
- [4] Dec, J. (1997). "A Conceptual Model of DI Diesel combustion Based on Laser-Sheet Imaging." SAE Technical Paper 970873: Accessed July 31, 2014.
- [5] Boerlage G.D.; Broeze, J.J. (1933). "Knock Rating for High-Speed C.I. Engine Fuels." *World Petroleum Congress Proceedings*, (2); p. 271.
- [6] INSO 197 / ASTM D1298.
- [7] INSO 6261 / ASTM D86.
- [8] INSO 8525 / ISO 4264.