

# موانع و چالش‌های جایگزینی گاز طبیعی فشرده در چرخه حمل و نقل

مهران شکیبائی<sup>۱</sup>، امید مجنون<sup>۲</sup>، قنبرعلی شیخ زاده نوش آبادی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک - حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی مکانیک - حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [sheikhz@kashanu.ac.ir](mailto:sheikhz@kashanu.ac.ir)

## مقاله علمی-ترویجی

صفحه ۲۱ - ۳۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

## چکیده

گسترش حمل و نقل همواره با چالش‌های اساسی به دلیل فشار ناشی از رشد تقاضای انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن مواجه بوده است. ترکیبات گاز طبیعی دارای متان بالاتری هستند که باعث افزایش کیفیت احتراق می‌شود. مطالعه حاضر به بررسی گاز طبیعی فشرده به‌عنوان سوخت پاک و مناسب برای کاهش آلاینده‌گی هوا در میان مدت پرداخته و چالش‌ها و موانعی که برای استفاده از آن به‌عنوان جایگزین بنزین وجود دارد را بررسی می‌نماید. با توجه به منابع غنی گاز طبیعی در ایران، اهمیت و نقش CNG به‌عنوان سوخت جایگزین در خودروها می‌تواند تانرازی تولید بنزین را کنترل کرده و امنیت انرژی را افزایش دهد. به علت قیمت پایین و بارانه‌ای بنزین، مدیریت و اصلاح روش‌های مصرف همواره دچار مشکل می‌باشد؛ به‌طوری‌که کشور ایران دارای رتبه ششم میزان انتشار CO<sub>2</sub> دنیا بوده و یک روند صعودی را در پیش گرفته است. از جمله موارد و چالش‌هایی که باعث کاهش مصرف CNG در سال‌های اخیر شده‌اند؛ می‌توان به استهلاک جایگاه‌های عرضه سوخت CNG و گاهای ایمنی پایین، فاصله قیمتی کم CNG با بنزین نسبت به مسافت طی شده، مصرف بالای برق و رطوبت موجود در گاز که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد، اشاره نمود. جایگزینی بنزین و استفاده بیشتر از CNG به لحاظ اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه بوده و می‌تواند هزینه‌های مربوط به واردات بنزین را کنترل کند.

کلیدواژه‌ها: گاز طبیعی فشرده، آلاینده‌گی، ایستگاه سوخت‌رسانی، صنعت حمل و نقل، خودروی گازسوز

## ۱. مقدمه

در جهان مدرن با کلان‌شهرهایی پر از خودرو و بزرگراه‌هایی که برای جابجایی نفرات و کالا ساخته شده‌اند، شگفت نیست که بخش حمل و نقل یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر باشد. با گسترش صنعت حمل و نقل و مصرف روزافزون انرژی، مشکلاتی از قبیل آلودگی زیست‌محیطی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله CO<sub>2</sub> به وجود





آمده است که پیامدهایی چون گرم شدن کره زمین را در پی دارد.

آلودگی هوا یکی از موضوعات اصلی مورد توجه در سراسر جهان است. ذرات معلق ریز با قطر ۲/۵ میکرومتر یا کمتر (PM<sub>2.5</sub>)، به عنوان یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا و آسیب‌های جسمی شناخته می‌شود [۱].

مهم‌ترین مسئله در کنترل و کاهش گازهای گلخانه‌ای، شناسایی صحیح منابع انتشار و برآورد دقیق میزان انتشار از این منابع می‌باشد [۲]. در سال ۲۰۰۵، بخش حمل‌ونقل ۲۳ درصد انتشار CO<sub>2</sub> جهانی مربوط به انرژی را به خود اختصاص داد [۳]. این میزان بالا، ضرورت استفاده از انرژی جایگزین را ایجاب می‌نماید زیرا پایداری محیط‌زیست یک الزام برای سیستم‌های حمل‌ونقل شهری مدرن به‌شمار می‌آید [۴]. صنعت حمل‌ونقل همواره نقش مهمی در مصرف انرژی دارد. این بخش عمدتاً انرژی‌های تجدیدناپذیر را مصرف می‌کند که باعث ایجاد تأثیر منفی بر محیط‌زیست شده و همچنین سهم عظیم و رو به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان را به خود اختصاص می‌دهد [۵]. رشد جمعیت شهرنشینی و افزایش سرانه درآمدها به‌طور ناخواسته منجر به افزایش استفاده از خودرو می‌شود. افزایش تقاضای انرژی در حمل‌ونقل به دلیل استفاده بیشتر خودروهای موجود از سوخت فسیلی، به معنای آلودگی بالاتر است؛ بنابراین نیاز به جایگزین نمودن با سوخت پاک‌تر وجود دارد [۶].

در سال ۲۰۲۳ حدود ۷۶ درصد از انرژی مورد نیاز منطقه خاورمیانه از گاز طبیعی و ۱۸ درصد نیز از سایر سوخت‌های فسیلی (نفت و زغال‌سنگ) تأمین می‌شد [۷]. در چنین شرایطی استفاده از سوختی پاک و ارزان که بتواند جایگزین سوخت‌های مرسوم مانند بنزین و گازوئیل باشد، ضرورت می‌یابد. گاز طبیعی به‌عنوان سوخت پاک، با راندمان بالا و کربن کم، منبع سوخت بسیار مهمی محسوب می‌شود [۸].

طبق پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، بخش حمل‌ونقل ۴۶/۴۷ درصد از رشد مصرف نفت بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۰ را به خود اختصاص خواهد داد. در سال ۲۰۱۸، ۴۳/۵۵ درصد از نفت خام مصرفی و

۲۴/۵ درصد از انتشار CO<sub>2</sub>، مربوط به بخش حمل‌ونقل بوده است [۹]؛ بنابراین، سیاست سوخت جایگزین در سیستم حمل‌ونقل، به‌عنوان یکی از سیاست‌های اصلی برای کاهش انتشار CO<sub>2</sub> مطرح است [۱۰]. طبق تعهد ایران به توافق‌نامه پاریس، انتشار CO<sub>2</sub> در ایران باید در سال ۲۰۳۰، به‌طور معمول و در مقایسه با مقدار آن در سناریوی تداوم روند موجود (BAU) <sup>۱</sup> به میزان ۴ درصد کاهش یابد؛ بنابراین، ایران تنها با جایگزینی سوخت بنزین و دیزل با گاز طبیعی می‌تواند به راحتی به تعهدات خود در بخش حمل‌ونقل شهری عمل کند [۱۱].

منابع گاز طبیعی موجود، باعث تمایل برخی کشورها مانند ایران، روسیه، عراق و ... به استفاده از این سوخت در خودروها گردیده است. استفاده از گاز طبیعی فشرده که به اختصار سوخت CNG <sup>۲</sup> نامیده می‌شود، به جای بنزین در موتورهای احتراق داخلی، باعث کاهش چشم‌گیر آلاینده‌ها می‌شود که یکی از مزایای مهم این سوخت است [۱۲]. گاز طبیعی سوختی است که معمولاً اثرات زیان‌آور کمتری نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی دارد [۱۳]. استفاده از CNG در صنعت حمل‌ونقل می‌تواند به بهبود هوای شهری و کاهش اثرات نامطلوب سلامتی و اجتماعی منجر شود [۱۴]. علاوه بر این، کشور ایران سرشار از منابع گاز طبیعی است و با فراهم نمودن زیرساخت‌های مناسب برای استفاده از CNG، ظرفیت استفاده گسترده از آن در بخش حمل‌ونقل وجود دارد.

لی و همکاران [۱۵] تأثیر مصرف گاز طبیعی روی آلودگی هوا را در شهرهای مختلف کشور چین بررسی کردند و نشان دادند که افزایش ۱ درصدی مصرف گاز طبیعی، انتشار PM<sub>2.5</sub> را در مناطقی با مصرف بالای گاز طبیعی، به میزان ۰/۱۷ درصد مهار می‌کند؛ بنابراین، گسترش مصرف گاز طبیعی یک راه حل مؤثر برای مقابله با انتشار آلاینده‌ها در مناطقی با مصرف بالای گاز طبیعی است. اسکویاتو و همکاران [۱۶] پیشنهاد کردند که به‌منظور کاهش انتشار PM<sub>2.5</sub>، مصرف گاز طبیعی برای تولید برق افزایش یابد. هانگ و محمود بیان نمودند که استفاده از CNG، انتشار CO را به میزان ۷۰ درصد، NO<sub>x</sub> را تا ۸۷ درصد و CO<sub>2</sub> را تا ۲۰ درصد نسبت به بنزین کاهش می‌دهد [۱۷]. نتیجه مطالعه او و ژانگ [۱۸] که در کشور چین انجام شد، این واقعیت را آشکار کرد که با

1. Business as usual (BAU)

2. Compressed Natural Gas (CNG)

تغییر خودروهای بنزینی به خودروهایی با سوخت CNG و گاز طبیعی مایع<sup>۱</sup> می‌توان به ترتیب به کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی و ۵ تا ۱۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای دست یافت. هاگوس و اهلگرن [۱۹] خودروهای گاز طبیعی را انتخاب کرده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای آن‌ها را با استفاده از روش چاه تا چرخ بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت گاز طبیعی فشرده و مایع در حمل‌ونقل جاده‌ای و دریایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را برای انواع خودروها ۱۵ تا ۲۷ درصد در هر کیلومتر کاهش می‌دهد. جیان چای و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۸ در مطالعه‌ای تشریح نمودند که مصرف گاز طبیعی با کاهش قیمت گاز و زغال‌سنگ و همچنین افزایش قیمت برق و نفت، در کوتاه‌مدت افزایش می‌یابد. موسایی و همکاران [۲۱] مدل جامعی برای انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی برای کشور ایران طراحی نمودند و نتایج نشان داد بهترین گزینه برای کشور گاز طبیعی مایع و بعد از آن، گاز طبیعی فشرده می‌باشد. شمساپور و همکاران [۱۱] سیستم ناوگان حمل‌ونقل شهر تهران را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم مدل‌سازی کردند. آن‌ها جایگزینی سوخت بنزین در بخش خودروهای شخصی و تاکسی‌ها و همچنین سوخت دیزل در ناوگان اتوبوس‌رانی با سوخت CNG را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که جایگزینی سوخت CNG با سوخت‌های با انتشار کربن بالا می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش انتشار CO<sub>2</sub> داشته باشد.

با توجه به مرور انجام شده و مطالبی که بیان شد؛ هدف از انجام این مطالعه، بررسی آمار مصرف CNG و روند گسترش آن در ایران و سایر کشورها و همچنین موانع جایگزینی آن با سایر سوخت‌ها مانند بنزین می‌باشد که می‌تواند به بهبود آلاینده‌گی هوا و صرفه‌جویی در مصرف بنزین که در کشور ایران بخش مهمی از ناترازی‌ها را به همراه دارد، منجر شود. علاوه بر این به چالش‌های صنعت CNG از جمله استهلاک جایگاه‌ها و عدم قابلیت اطمینان این جایگاه‌ها در سال‌های آتی پرداخته می‌شود. همچنین، ارزیابی میزان آلاینده‌گی و امکان‌سنجی اقتصادی جایگزینی گاز طبیعی فشرده به جای بنزین در بخش حمل‌ونقل ایران به‌عنوان راهبرد میان‌مدت برای کاهش انتشار CO<sub>2</sub> و بهبود امنیت انرژی، از دیگر اهداف

این پژوهش است. نوآوری مطالعه حاضر در این است که ابعاد زیرساختی، زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از CNG در ایران به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است و چالش‌های عملیاتی نظیر مصرف برق، ایمنی جایگاه‌ها و رطوبت گاز، در کنار عوامل سیاستی، به‌صورت تلفیقی تحلیل شده‌اند. یک تحلیل اقتصادی با مقایسه بین هزینه تبدیل خودروها به CNG و هزینه واردات بنزین نیز ارائه شده است.

## ۲. آمار وسایل نقلیه گازسوز و مصرف سوخت گاز طبیعی فشرده

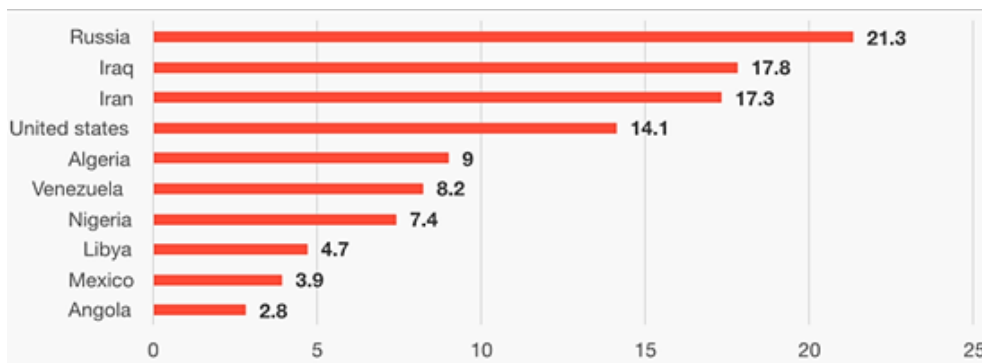
در (شکل ۱)، ده کشور برتر (از نظر مصرف) گازسوز در جهان در سال ۲۰۱۸ نشان داده شده است؛ که در آن ایران به‌عنوان سومین کشور گازسوز جهان با مصرف ۱۷/۳ میلیارد فوت مکعب مشخص می‌باشد [۲۲]. بر اساس اطلاعات اطلس جهانی کربن و طبق آخرین آمار جهانی از کشورهایی با بیشترین میزان انتشار CO<sub>2</sub> تا سال ۲۰۲۳ [۲۳]، ایران به‌ترتیب بعد از کشورهای چین، امریکا، هند، روسیه و ژاپن در رتبه ششم میزان انتشار CO<sub>2</sub> دنیا قرار دارد (شکل ۲).

بنابراین، ایران نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه در شهرهای پرجمعیت دارد. نگرانی‌های فزاینده در مورد پایداری انرژی و محیط‌زیست اخیراً منجر به افزایش علاقه عموم به استفاده از حمل‌ونقل پاک‌تر و مؤثرتر شده است [۲۴]. با توجه به پیامدهای بسیار مخرب آلودگی‌های زیست‌محیطی بر سلامت بشر، اغلب کشورهای دنیا به مسئله آلودگی هوا ناشی از سوخت خودروها و همچنین اعمال استانداردهای آلودگی بر خودروهای تولیدی، توجه خاصی مبذول داشته‌اند. استفاده صحیح از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت خودرو می‌تواند باعث کاهش آلاینده‌های تولیدی توسط خودروها گردد [۲۵].

بیش از ۲۶۶۷۷ جایگاه سوخت‌رسانی CNG مربوط به وسایل نقلیه گازسوز در سراسر جهان وجود دارد. (شکل ۳)، ده کشور برتر جهان با بیشترین تعداد وسایل نقلیه با سوخت گاز طبیعی (NGV)<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد که ایران با بیش از ۴ میلیون خودروی گازسوز در جایگاه نخست جهان است [۲۶].

1. Liquefied Natural Gas (LNG)
2. Natural Gas Vehicle (NGV)

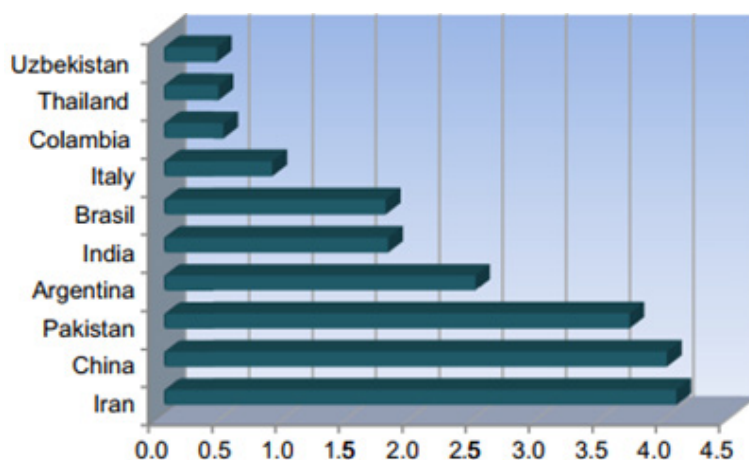




شکل ۱: ده کشور برتر گازسوز جهان در سال ۲۰۱۸ (مصرف برحسب میلیارد فوت مکعب) [۲۲]

Rank	Country	MtCO <sub>2</sub>
1	China	11903
2	United States of America	4911
3	India	3062
4	Russian Federation	1816
5	Japan	989
6	Iran	818
7	Saudi Arabia	736
8	Indonesia	733
9	Germany	596
10	South Korea	577

شکل ۲: کشورهای دارای بیشترین میزان انتشار CO<sub>2</sub> (برحسب مگا تن) [۲۳]

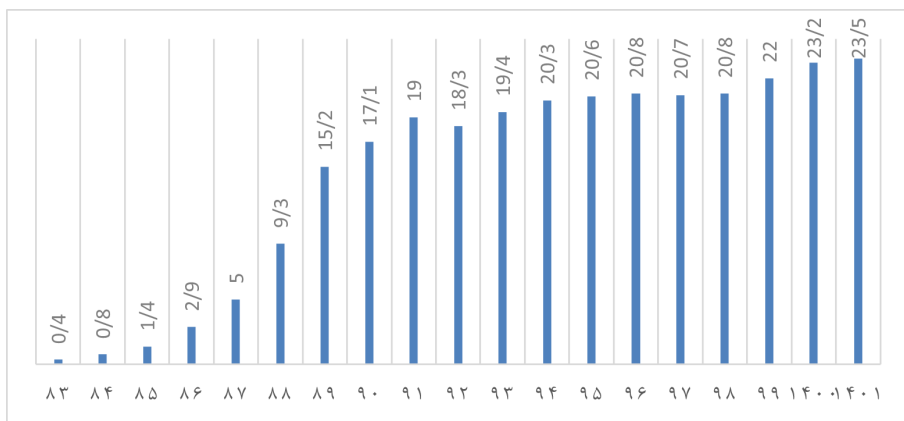


شکل ۳: تعداد وسایل نقلیه با سوخت گاز طبیعی در کشورهای مختلف (برحسب میلیون) [۲۴]

CNG از روزانه ۰/۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۳ به روزانه ۱۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۱ رسیده که حاکی از افزایش ۴۷ برابری مصرف این سوخت است؛ اما پس از آن و طی سال‌های اخیر دولت توجه کمتری را به توسعه CNG داشته، به طوری که میزان مصرف روزانه CNG از ۱۹ میلیون مترمکعب در روز در سال ۱۳۹۱ به ۲۳/۵ میلیون مترمکعب در روز در سال ۱۴۰۱ رسیده است و رشد چندانی نداشته است [۲۸].

در سال ۱۴۰۱ مصرف گاز طبیعی فشرده (CNG) در خودروها در ایران روزانه به سطح ۲۳/۵ میلیون مترمکعب رسید که تنها یک درصد نسبت به سال ۱۴۰۰ افزایش داشته است. مجموع تعداد جایگاه‌های عرضه کننده گاز طبیعی نیز طی چند سال اخیر ثابت بوده است [۲۷].

در (شکل ۴) میزان مصرف CNG طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ در ایران نشان داده شده است. بر این اساس مصرف



شکل ۴: میزان مصرف روزانه CNG در ایران در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ برحسب میلیون مترمکعب در روز [۲۸]

آلاینده‌های سوختی به وجود می‌آید را کاهش دهد. مطابق آمار ارائه شده توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) 'آلودگی هوا که پنجمین عامل مرگ‌ومیر زودرس در جهان بوده، فقط در سال ۲۰۱۷ منجر به مرگ بیش از ۴/۹ میلیون نفر و از دست دادن ۱۴۷ میلیون سال زندگی سالم در جهان شده است [۳۲].

بر اساس اعلام وزارت بهداشت ایران، سالانه ۲۰ هزار مرگ منتسب به آلودگی هوا در ایران وجود دارد. بیش از نیمی از جمعیت کشور در معرض آلودگی هوا قرار دارند و خسارات آلودگی هوا در ایران سالانه به ۷ میلیارد دلار می‌رسد. فقط در شهر تهران سالانه بیش از ۳۷۰۰ نفر به علت آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند و خسارت این پدیده در تهران بالغ بر ۲/۳ میلیارد دلار است.

### ۳-۲. امنیت انرژی

امنیت انرژی از کشوری به کشوری دیگر متفاوت است. امنیت انرژی در کشوری که به شدت به واردات نفت و گاز وابسته است به مفهوم امنیت عرضه است. در حالی که امنیت انرژی در کشوری که نفت و گاز صادر می‌کند به مفهوم امنیت تقاضا است [۳۳].

در ایران همواره با ناترازی تولید بنزین به علت مصرف بالای آن مواجه هستیم. به علت قیمت پایین و یارانه‌ای بنزین، مدیریت مصرف و اصلاح روش‌های مصرف همواره دچار مشکل می‌باشد. کل یارانه انرژی در سال ۱۳۸۴ معادل ۴۶/۲۵ میلیارد دلار بوده که بیش از ۲۲ درصد آن صرف بنزین شده است. به این ترتیب یارانه بنزین از ۷/۶ میلیارد دلار در سال ۱۳۸۴ به ۱۰/۲ میلیارد دلار در سال ۱۳۸۵ رسید. این در

ملاحظه می‌شود که پس از جهش مصرف طی دهه هشتاد شمسی و افزایش آرام و تدریجی در دهه نود شمسی، در سال‌های اخیر مقدار مصرف CNG خودروها تقریباً ثابت باقی‌مانده و به مرور میزان سرمایه‌گذاری در این حوزه کمتر شده است که یکی از دلایل آن را می‌توان به افزایش هزینه‌های جایگاه CNG مربوط دانست در حالی که قیمت گاز طبیعی طی این سال‌ها ثابت مانده است.

### ۳. مزایای CNG به عنوان سوخت خودرو

گاز طبیعی به دو صورت گاز طبیعی فشرده و گاز طبیعی مایع در خودروها مورد استفاده قرار می‌گیرد. گاز طبیعی موجود در ایران دارای متان با درصد مولی ۹۸/۵۷ می‌باشد [۲۹]. مزایای استفاده از گاز طبیعی فشرده به عنوان سوخت در خودرو عبارتند از:

#### ۳-۱. کاهش آلاینده‌گی هوا

خودروهایی که از سوخت بنزین و گازوئیل استفاده می‌کنند آلاینده‌ها و ذرات خطرناکی منتشر می‌کنند. در مقایسه با بنزین و گازوئیل، CNG انتشار CO<sub>2</sub> کمتری دارد [۳۰]. در سال ۲۰۱۲ آلاینده‌های خروجی موتور دیزل توسط سازمان بهداشت جهانی به عنوان عامل سرطان‌زا شناخته شده‌اند [۳۱].

بنابراین انتخاب سوخت پاک و در دسترس در بخش حمل‌ونقل در هر سیستم شهری بخصوص در بخش عمومی می‌تواند منجر به توسعه پایدار در حمل‌ونقل شهری گردد. کاهش آلاینده‌گی هوا می‌تواند بخش زیادی از هزینه‌های اجتماعی که انسان امروزی با آن مواجه است مانند انواع سرطان‌ها و مرگ‌ومیرهایی که در اثر

1. World Health Organization (WHO)



حالی است که درآمد نفتی ایران در سال ۱۳۸۴ معادل ۸۵ میلیارد دلار بوده یعنی در آن سال بیش از ۱۰ درصد کل درآمد کشور صرف یارانه بنزین شده است [۳۴].

بررسی‌ها نشان می‌دهد مصرف بنزین ایران در سال ۱۴۰۲ به‌طور متوسط روزانه ۱۱۲ میلیون لیتر بوده است. درحالی‌که تولید بنزین روزانه بین ۹۸ تا ۱۰۴ میلیون لیتر می‌باشد که ناترازی ۸ تا ۱۴ میلیون لیتر در روز را نشان می‌دهد؛ بنابراین استفاده از سوخت CNG به‌عنوان یک سوخت جایگزین حمل‌ونقل با انتشار کربن کم، امنیت انرژی را افزایش خواهد داد [۶]. بررسی‌ها در ایران نشان می‌دهد که توسعه مصرف گاز طبیعی فشرده در ناوگان حمل‌ونقل می‌تواند روزانه بین ۳۰ تا ۴۰ میلیون لیتر در مصرف بنزین کشور صرفه‌جویی ایجاد کند.

#### ۴. قیمت گاز طبیعی و ارزیابی اقتصادی

در ایران قیمت‌گذاری توسط دولت جهت‌گیری می‌شود و از زمان بهره‌برداری تاکنون قیمت گاز طبیعی نوسانات چندانی نداشته است و برای تشویق مصرف‌کننده قیمت آن تقریباً افزایش نداشته است.

در کشور چین سیاست قیمت‌گذاری گاز طبیعی بسته به نوع مصرف از جمله کاربری مسکونی، استفاده برای وسایل نقلیه و کاربری تجاری فرق می‌کند و قیمت CNG برای استفاده در خودرو به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از قیمت CNG برای سایر مصارف است [۳۵]. مصرف گاز طبیعی چین ۱۸۰ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۴ بود که حدود ۶ درصد از کل مصرف انرژی اولیه را تشکیل می‌داد [۳۶]. چین باید استانداردهای بهسازی خودروهای CNG را بهبود داده و نظارت و بازرسی کیفیت را تشدید نماید تا بتواند ایستگاه‌های سوخت‌رسانی گاز طبیعی را با راندمان بسیار بالاتر ایجاد کند [۲۶].

در ارمنستان، قیمت CNG، ۳ تا ۴ برابر ارزان‌تر از بنزین و نیمی از قیمت گازوئیل است [۳۷]. ژانگ نشان داد که قیمت انرژی تأثیرات قابل‌توجهی بر روی فناوری و بهره‌وری انرژی دارد [۳۸].

در ایران از آبان سال ۱۳۹۸ به بعد فاصله قیمت گاز طبیعی با قیمت بنزین آزاد به یک هفتم رسید. قیمت نسبی بنزین به CNG از ۲ به بیش از ۳ افزایش یافت. این شکاف قیمتی، محرک مناسبی برای تبدیل خودروهای سبک معمولی به خودروهای دوگانه‌سوز بود. در نتیجه مصرف

CNG از حدود ۱۹ به ۲۴ میلیون مترمکعب در روز افزایش یافت [۳۹]. اما در سال‌های پس از آن استقبال چندانی از CNG صورت نگرفت و باوجود ارزان بودن این سوخت، مصرف آن طی سالیان اخیر نسبتاً ثابت بوده است.

#### ۵. زیرساخت مورد نیاز برای استفاده از CNG در صنعت حمل‌ونقل

گاز طبیعی با استفاده از تجهیزات فشرده‌سازی به سوخت حمل‌ونقل خودرو تبدیل می‌شود [۴۰] (شکل ۵)، تا بتوان در کمترین زمان سوخت‌گیری را انجام داد. بدین ترتیب تمایل مصرف‌کننده به استفاده از این سوخت پاک افزایش می‌یابد [۲۷].

به‌منظور سرویس‌دهی به ناوگان بزرگ حمل‌ونقل و رقابت با سایر سوخت‌ها باید زمان سوخت‌گیری را کاهش داد. در این حالت از طراحی جایگاه با سیستم سوخت‌گیری سریع<sup>۱</sup> که دارای سه خط فشار است، استفاده می‌شود. در این سیستم گاز به‌طور مستقیم از مخازن ذخیره جایگاه به مخازن خودرو انتقال می‌یابد و این حالت دارای عملکرد بیشینه بوده، به‌طوری‌که دبی جرمی در توزیع‌کننده‌ها قابل مقایسه با دبی جرمی توزیع‌کننده‌های سوخت‌های مایع متداول خواهد بود [۲۵]. در این نوع جایگاه‌ها زمان سوخت‌گیری معمولاً بین ۳ تا ۵ دقیقه می‌باشد.

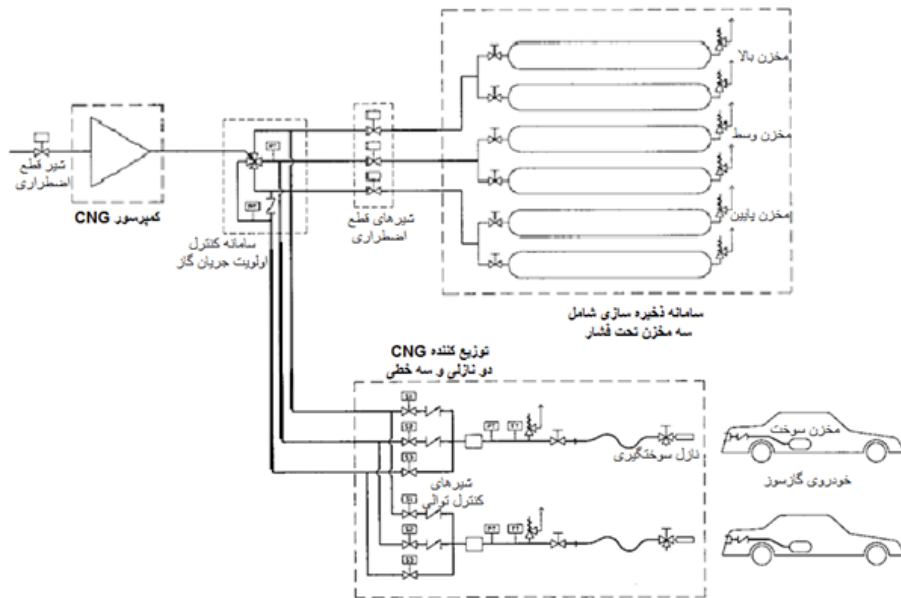
برای کشور در حال توسعه مانند ایران، با توجه به ذخایر عظیم و شبکه گسترده خط لوله گاز طبیعی، ایجاد سیاست‌گذاری انرژی و توسعه آن در بخش حمل‌ونقل می‌تواند به بهره‌وری انرژی کمک کند. ایران با داشتن بیش از ۲۴ تریلیون مترمکعب ذخایر گاز طبیعی، پس از کشور روسیه در جایگاه دوم قرار دارد [۲۵]؛ بنابراین روش شناسایی و توسعه استفاده از گاز طبیعی و عمومی‌سازی خودروهای گازسوز به‌ویژه برای کشورهایی که منابع غنی دارند، می‌تواند به دوام اقتصادی و پایداری انرژی کمک شایانی کند. پژوهش‌های متعدد پژوهشگران در سطح جهان نشان می‌دهد که سرعت روند رشد مصرف انرژی در کشورهای جهان تا حدود زیادی به سطح رشد اقتصادی بستگی دارد.

یک چالش منحصربه‌فرد در استفاده مداوم منابع مختلف انرژی در صنعت حمل‌ونقل نیاز به ذخیره انرژی در وسیله نقلیه است تا بتواند پیمایش بیشتری با صرف هزینه کمتر داشته باشد [۴۱]. با احداث ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG این امر محقق می‌شود. ایران با مصرف متوسط ۲۳/۵ میلیون مترمکعب سوخت CNG در روز و دارا بودن ۲۵۵۶ ایستگاه CNG در میان پنج

1. Fast Filling Station



کشور نخست جهان از لحاظ این ایستگاه‌ها قرار دارد [۲۷]. جایگزین برای کاهش وابستگی به بنزین و گازوئیل به‌عنوان سوخت حمل‌ونقل وجود دارد. گاز طبیعی به‌عنوان سوخت پل<sup>۱</sup> برای انتقال به انرژی پاک عمل می‌کند [۴۲]. گاز طبیعی به‌عنوان سوختی تمیز و پاک، می‌تواند جایگزین مناسبی باشد و فراوانی گاز طبیعی در ایران در طیف وسیعی از صنایع از جمله صنعت حمل‌ونقل کاربرد پیدا کرده است.



شکل ۵: سیستم سوخت‌رسانی سریع سه خط [۴۰]

## ۶. چالش‌های صنعت CNG

در این بخش به چالش‌های موجود در صنعت CNG شامل مصرف برق، رطوبت گاز و ایمنی ایستگاه‌های سوخت‌رسانی اشاره می‌شود.

### ۶-۱. مصرف برق

بیشتر ایستگاه‌های موجود در ایران با واگذاری یک ساله به بخش خصوصی مدیریت می‌شوند و به دلیل قیمت پایین CNG، استهلاک جایگاه‌ها و هزینه بالای برق برای راه‌اندازی کمپرسور، جایگاه‌داران گاهاً با مشکلاتی مواجه می‌شوند که کاهش سرمایه‌گذاران را به دنبال دارد؛ بنابراین تلاش برای کاهش هزینه برق ایستگاه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. رشد ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG در شهرها، هزینه برق فوق‌العاده زیادی را به همراه داشته است؛ به‌عنوان مثال یک ایستگاه سوخت CNG شهری در چین در سال ۲۰۱۴، حدود ۶۱۹۹۶۸ کیلووات ساعت مصرف می‌کرد [۴۳].

محققان تحقیقات مرتبطی را در مورد بهینه‌سازی عملکرد اولین نوع جایگاه‌های سوخت‌رسانی CNG و کاهش برق مصرفی کمپرسورها انجام داده‌اند. بررسی‌هایی در مورد رفتار ترمودینامیکی کمپرسور رفت و برگشتی در طول تغییر فشار مخزن در [۴۴] انجام شده است. چارلز کاگیری و همکاران [۴۵] یک استراتژی مدیریت انرژی بهینه برای کمپرسور و مخازن در ایستگاه CNG، که انرژی مصرفی کمپرسور را کاهش می‌دهد پیشنهاد کردند. یانگ و همکاران [۴۶] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه را توسط یک الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی بهبودیافته توسعه دادند و نتایج نشان داد که هزینه‌های عملیاتی برق به‌طور مؤثر ۳۴/۶۲ درصد کاهش یافته است.

پایین بودن قیمت برق به‌طور مؤثر هزینه عملیاتی ایستگاه CNG را کاهش می‌دهد و هزینه صرفه‌جویی شده می‌تواند برای کاهش قیمت گاز طبیعی استفاده شود. هزینه‌های کمتر



می‌تواند جذابیت CNG را به‌عنوان سوخت خودرو افزایش دهد [۴۶]. حتی در برخی موارد می‌توان از گاز طبیعی برای تولید برق بیشتر استفاده کرد؛ اما با توجه به وجود ناترازی گاز در کشور، این امر در شرایط کنونی قابل تحقق نیست. ناترازی گاز در ایران تنها ناشی از کمبود برداشت نیست؛ بلکه مجموعه‌ای از عوامل فنی، مدیریتی و اقتصادی در آن نقش دارند. ضعف در فناوری‌های پیشرفته استخراج و عدم حفظ فشار مخازن در میدان‌های گازی، منجر به کاهش تدریجی تولید شده است. سرمایه‌گذاری ناکافی در زیرساخت‌ها نیز شکاف میان تولید و مصرف را تشدید کرده و باعث کاهش میزان برداشت از میداین گازی شده است.

### ۲-۶. رطوبت گاز

رطوبت موجود در گاز طبیعی در سیستم‌های انتقال، ایستگاه‌ها و خودروها یکی از عوامل مؤثر در خوردگی، آسیب دیدن تجهیزات و کاهش عمر کاری آن‌ها می‌باشد؛ بنابراین با توجه به حساسیت‌های موجود در سیستم‌های ایستگاه سوخت‌رسانی CNG و همچنین وجود دستگاه‌هایی نظیر کمپرسورهایی با نسبت تراکم بالا که رطوبت هرچند ناچیز موجود در گاز را به نقطه شبنم و چگالش می‌رساند؛ استفاده از سیستم‌های خشک‌کن به امری ضروری تبدیل می‌شود. طی مطالعات انجام گرفته مشخص شده است که آب در گاز طبیعی به‌صورت رطوبت معمولی رفتار نمی‌کند، بلکه موجب تشکیل هیدرات یا یخ متان می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۱۰ درصد آن را هیدروکربن و ۹۰ درصد آن را آب تشکیل می‌دهد. هیدرات‌ها به‌راحتی می‌توانند موجب انسداد جزئی یا کامل در سیستم سوخت‌رسانی گردند. همچنین تشکیل هیدرات‌ها در فشارهای بالاتر شدت می‌گیرد. یکی دیگر از مضرات وجود آب را می‌توان از این دیدگاه بررسی نمود که وجود بخار آب و گوگرد در گاز موجب تولید اسیدسولفوریک و خوردگی در اجزای تجهیزات سوخت‌رسانی می‌گردد؛ بنابراین برای جلوگیری از این پدیده نامطلوب (خوردگی) باید یکی از دو عامل رطوبت یا گوگرد را از بین برد. این امر ضرورت وجود خشک‌کن‌ها را در ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG نشان می‌دهد که به‌منظور کاهش محتوای رطوبت موجود در گاز طبیعی و رساندن آن به سطح قابل‌قبول مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین دلیل وجود تجهیزاتی که بتواند رطوبت موجود در گاز را بگیرد تا از آسیب‌های احتمالی جلوگیری کند الزامی است [۲۵].

درخشان و اسفندیاری [۴۷] بیان کردند که دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار بهترین شرایط فرایندی جهت جلوگیری از تشکیل هیدرات است. همچنین انتقال گاز با خوراک با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۰ بار، بیشترین احتمال تشکیل هیدرات مسیر انتقال را داراست.

### ۳-۶. ایمنی ایستگاه‌ها و خودروهای CNG

مقرون‌به‌صرفه بودن گاز طبیعی فشرده و سهمیه‌بندی بنزین منجر به افزایش توجه به استفاده از CNG به‌عنوان سوخت جایگزین شده است [۴۸]. با این حال، خطر انفجار در جایگاه‌های CNG تهدیدی جدی برای مصرف‌کنندگان و پرسنل است [۴۹]. همچنین ساخت جایگاه‌های CNG در مناطق مسکونی (به‌ویژه در نزدیکی ساختمان‌ها) چالش‌های مختلفی را به همراه دارد که رعایت مقررات ایمنی را ایجاب می‌نماید [۵۰].

از این نظر، اگرچه پارامترهای ایمنی بسیار مهم هستند، اما به‌تنهایی نمی‌توانند ایمنی مطلق جایگاه‌های سوخت‌گیری را تضمین کنند. درواقع عوامل دیگر، از جمله موقعیت ایستگاه، آسیب‌پذیری و عناصر خارجی (مانند بلایای طبیعی و تحریم‌ها) بر بحران تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند خطر ایمنی موجود در جایگاه‌های سوخت‌گیری CNG را افزایش دهد [۵۱].

ایمنی تجهیزات نیز بسیار مهم است و از دستورالعمل‌های ایمنی پیروی می‌کند. در اینجا، تضمین ایمنی تجهیزات گاز، مانند سیلندر گاز و تجهیزات ایستگاه، یک ضرورت انکارناپذیر است. هر دو مورد، پارامترهای ایمنی مربوط به متصدیان ایستگاه CNG هستند. با این حال، سایر شاخص‌های ایمنی خارجی (به‌عنوان مثال، ایمنی راننده و ایمنی وسایل نقلیه) به‌طور قابل‌توجهی بر ایمنی جایگاه‌های سوخت‌گیری تأثیر می‌گذارد و خارج از کنترل متصدیان جایگاه است. عدم ایمنی در کپسول‌های CNG خودروهای دوگانه‌سوز، خطر انفجار آن‌ها را افزایش می‌دهد [۵۱].

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که الگوریتم‌های داده‌کاوی در دستیابی به اهداف پژوهش نقش مؤثری دارند [۵۲]. چائو و همکاران [۵۳] در سال ۲۰۲۲ ریسک ایستگاه‌های انتقال گاز را با استفاده از مدل شبکه چند سطحی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مواردی چون

دریچه‌های هوای بسته، نقص سیستم کنترل، آسیب ابزار ناشی از گاز، آسیب دریچه و یکپارچگی ضعیف تجهیزات و ابزار، بیشترین تأثیر را بر نشت گاز دارند. اسریواستوا و همکاران [۵۴] از تکنیک‌های فازی برای کاهش خطر در ایستگاه‌های CNG استفاده کردند. آن‌ها یک مدل استنتاج فازی بر اساس قوانین فازی ایجاد کردند و این سیستم آشکار نمود که حالت‌های خرابی پنهان، درنهایت به تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم کمک می‌کند.

مجنونی و شیخ زاده [۲۷] مدل‌سازی انفجار مخازن جایگاه CNG، به صورت تکی و دسته‌ای را انجام دادند؛ نتایج مدل‌سازی در هر دو حالت بسیار نگران کننده بود و پیامدهای جانی و اثرات تخریب بسیار فاجعه بار را پیش‌بینی کردند. طبق نتایج در هر دو حالت مدل‌سازی، مقدار تشعشع حرارتی به  $37/5 \text{ kW/m}^2$  رسیده و تشعشعات تا نزدیک شعاع ۱۸ متری در انفجار مخزن تکی و تا شعاع ۵۵ متری در انفجار دسته‌ای مخازن گسترش یافته و منجر به آسیب رساندن به ساختمان‌های اطراف و افراد در این محدوده شده است.

سازمان ملی استاندارد سالانه ایمنی جایگاه‌های سوخت‌گیری CNG را برای اطمینان از رعایت ایمنی ارزیابی می‌کند. با وجود استانداردها، نتایج بازرسی نشان داد که بسیاری از ایستگاه‌هایی که در ابتدا معیارهای ایمنی را برآورده می‌کردند طی یک سال با مشکلات عدم انطباق مواجه شدند و مورد تأیید قرار نگرفتند.

از نکات مهم در به‌کارگیری خودروهای گازسوز، موضوع ایمنی مخازن تحت فشار CNG است. این مخازن معمولاً در فشار کاری حدود ۲۰۰ بار عمل می‌کنند و به دلیل ذخیره‌سازی گاز در حجم بالا، در صورت عدم رعایت استانداردهای طراحی و نگهداری، می‌توانند خطرآفرین باشند. با این حال، مخازن CNG مطابق با استانداردهای بین‌المللی طراحی و آزمایش می‌شوند و پیش از نصب روی خودرو، تحت آزمون‌هایی قرار می‌گیرند تا از مقاومت آن‌ها در برابر ضربه، حرارت و فشار اطمینان حاصل شود. با وجود ایمنی ذاتی بالا در طراحی مخازن، بروز عواملی چون نقص فنی، نصب غیراستاندارد یا بازرسی نشدن دوره‌ای، باعث ایجاد ریسک بالقوه خواهد شد. در این شرایط، نشت گاز یا پوسیدگی مخزن ممکن است منجر به حادثه شود. از این رو، اجرای برنامه‌های

بازرسی دوره‌ای مخازن و تعویض مخازن فرسوده پس از عمر مفید (معمولاً ۱۵ تا ۲۰ سال) الزامی است. در مجموع، در صورتی که استانداردهای نصب، بازرسی و نگهداری به‌درستی رعایت شوند، احتمال وقوع حادثه بسیار پایین می‌باشد اما در صورت عدم رعایت الزامات ایمنی، خطرات بالقوه آن باید جدی گرفته شود.

## ۷. ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، مطالعات قبلی در این زمینه نشان داده‌اند که در حالت کلی CNG نسبت به بنزین آلاینده‌گی کمتری داشته و سوخت مناسب‌تری برای محیط‌زیست می‌باشد. تلفیق سیاست‌های توسعه خودروهای شخصی با سوخت CNG و حمایت دولت از این سوخت برای بخش حمل‌ونقل عمومی و هم‌زمان رقابتی کردن قیمت CNG، مؤثرترین روش افزایش سهم خودروهای سواری از این سوخت می‌باشد. اجرای این سیاست در شهر تهران موجب کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  به میزان ۱۱/۴۲ درصد تا سال ۲۰۳۰ نسبت به سناریوی تداوم روند موجود خواهد شد [۱۱]. (جدول ۱) میزان انتشار آلاینده‌های مختلف برای سوخت بنزین و CNG را نشان می‌دهد [۵۵ و ۵۶].

در (جدول ۲) مقایسه‌ای بین این دو سوخت از لحاظ ایمنی، زیرساخت و قیمت صورت گرفته است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین قیمت بنزین (با در نظر گرفتن میزان پیمایش) حدود ۶ تا ۷ برابر CNG می‌باشد که با در نظر گرفتن قیمت فعلی بنزین و گاز محاسبه شده است و اختلاف قابل توجهی است. البته در حال حاضر به دلیل پایین بودن قیمت بنزین نسبت به سایر کشورها، استفاده از CNG در کشور مورد استقبال چندانی قرار نمی‌گیرد و رقابتی‌تر شدن قیمت می‌تواند توجهات را به سمت گاز طبیعی فشرده بازگرداند.

بر اساس داده‌های منتشرشده در منابع و وبسایت‌های صنعتی و تجاری مختلف، قیمت مخزن گاز طبیعی فشرده (CNG) با ظرفیت حدود ۱۰۰ لیتر در بازار جهانی بین ۷۵ تا ۲۵۰ دلار آمریکا متغیر است؛ به‌طور میانگین، قیمت این نوع مخزن حدود ۱۵۰ دلار آمریکا برآورد می‌شود. طبق گزارش منتشر شده از سازمان‌های معتبر در ماه مارس سال ۲۰۲۵، قیمت بنزین فوب خلیج فارس حدود ۰/۶ تا ۰/۷ دلار آمریکا (بین ۶۰ تا ۷۰ سنت) به‌ازای هر لیتر گزارش شده است [۵۷].



جدول ۱: مقایسه میزان آلودگی سوخت بنزین و CNG [۵۵ و ۵۶]

نوع آلاینده	سوخت بنزین (گرم بر کیلومتر)	سوخت CNG (گرم بر کیلومتر)	درصد کاهش نسبت به بنزین
کربن مونوکسید (CO)	۸/۵ - ۱/۲	۲/۵ - ۰/۰	۷۵ تا ۸۰
کربن دی‌اکسید (CO <sub>2</sub> )	۲۳۰ - ۲۰۰	۱۷۰ - ۱۵۰	۲۰ تا ۲۵
هیدروکربن‌های نسوخته (HC)	۲/۴ - ۰/۰	۱/۳ - ۰/۰	۲۵ تا ۵۰
اکسیدهای نیتروژن (NOX)	۱۵/۲۵ - ۰/۰	۱/۲ - ۰/۰	۲۰ تا ۳۰
ذرات معلق (PM)	۰/۰۲-۰/۰۳	کمتر از ۰/۰۰۵	۸۵ تا ۹۰

جدول ۲: مقایسه ایمنی، زیرساخت و قیمت بنزین و CNG

ایمنی و زیرساخت‌های مورد نیاز		
ایمنی / زیرساخت	سوخت بنزین	سوخت CNG
فشار کاری مخزن	بسیار کمتر و در حدود فشار اتمسفر	بسیار بالا و حدود ۲۰۰ بار (نیازمند نگهداری دقیق)
ایمنی احتراق در تصادفات	در صورت پخش بنزین روی زمین، خطر آتش‌سوزی وجود دارد	در صورت طراحی استاندارد و صحیح، خطر کمتری وجود دارد
زیرساخت توزیع و جایگاه‌ها	گسترده و در دسترس	محدودتر در مقایسه با بنزین
قیمت تمام شده سوخت برای مصرف‌کننده		
قیمت فعلی	سوخت بنزین	سوخت CNG
سه‌میه‌ای آزاد	۱۵,۰۰۰ ریال / لیتر	۵,۷۰۰ ریال / مترمکعب
هزینه تقریبی در هر صد کیلومتر پیمایش	۲۰۰,۰۰۰ تا ۲۵۰,۰۰۰ ریال (براساس قیمت آزاد)	۳۰,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ ریال

مثال یک میلیون دستگاه خودرو در طول یک سال به این مخازن مجهز شوند، هزینه کل آن برابر با ۱۵۰ میلیون دلار خواهد بود. همچنین اگر در حالت خوش‌بینانه، کسری تراز بنزین ۱۵ میلیون لیتر در روز و قیمت آن ۰/۶ دلار به‌ازای هر لیتر باشد، روزانه حداقل ۹ میلیون دلار صرف واردات بنزین می‌شود. با توجه به تعداد خودروهای موجود در کشور (حدود ۲۲ میلیون دستگاه) و فرض مصرف ۱۱۰ میلیون لیتر بنزین در روز، هر یک میلیون خودروی سواری به‌طور میانگین حدود ۵ میلیون لیتر در روز مصرف دارند؛ بنابراین، در صورت گازسوز کردن یک میلیون خودرو، روزانه حدود ۵ میلیون لیتر صرفه‌جویی در مصرف بنزین حاصل می‌شود که معادل ۳ میلیون دلار در روز است. به‌عبارتی، هزینه ۱۵۰ میلیون

با توجه به این داده‌ها و کسری تراز بنزین در کشور که حدود ۱۵ تا ۲۰ میلیون لیتر در روز تخمین زده می‌شود، جایگزینی سوخت بنزین با CNG از لحاظ اقتصادی می‌تواند مثر و واقع‌گردد. به‌عبارتی، پایین بودن قیمت انرژی در کشور موجب افزایش مصرف و در نتیجه وابستگی به واردات بنزین شده است؛ در حالی که می‌توان این مشکل را با گسترش استفاده از CNG تا حد زیادی برطرف نمود. راهکار منطقی در این زمینه آن است که هزینه واردات بنزین به سرمایه‌گذاری در زمینه تأمین مخازن CNG و تولید خودروهای گازسوز اختصاص یابد و با پرداخت یارانه به این تجهیزات، هزینه نهایی برای مصرف‌کنندگان کاهش یابد. بر این اساس، با فرض قیمت ۱۵۰ دلار برای هر مخزن صد لیتری، چنانچه برای



دلاری برای تجهیز یک میلیون خودرو به سوخت گاز، معادل هزینه ۵۰ روز واردات بنزین برای همان تعداد خودرو است؛ در حالی که این مخازن نه تنها برای ۵۰ روز، بلکه حداقل ۱۵ سال قابل استفاده هستند. لذا از نظر اقتصادی، این اقدام بسیار مقرون به صرفه بوده و می تواند در حل مشکل ناترازی بنزین نقش مهمی ایفا کند. البته در این مسیر چالش هایی وجود دارد که در بخش های دیگر مقاله به آن ها اشاره شده است، اما در مقایسه با هزینه های واردات و مصرف بنزین، حرکت به سمت گسترش استفاده از CNG با هزینه ای به مراتب کمتر امکان پذیر است. همچنین، با اجرای طرح هایی مانند پرداخت یارانه برای مخازن CNG و ارائه گارانتی های بلندمدت برای خودروهای گازسوز، می توان مصرف کنندگان را به استفاده از این سوخت پاک تر و اقتصادی تر ترغیب نمود.

#### ۸. نتیجه گیری

مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> در ایران طی سال های متمادی به طور پیوسته رشد داشته است. با توجه به شرایط اقلیمی کشور و منابع عظیم گاز طبیعی که قبلاً به خوبی شناخته شده اند، قابلیت زیادی برای تأمین انرژی بدون انتشار همان نسبت CO<sub>2</sub> در اتمسفر، وجود دارد. استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت پاک با قیمت مناسب در بخش حمل و نقل می تواند همواره برای مصرف کننده جذاب باشد. از جمله چالش هایی که در عرضه CNG وجود دارد می توان به مصرف بالای برق در جایگاه ها، وجود رطوبت در گاز طبیعی و بحث ایمنی در ایستگاه های سوخت رسانی و مخازن خودروها اشاره نمود. با مدیریت و طراحی صحیح و احداث ایستگاه های با تجهیزات به روز تر از نظر ایمنی که به تسریع در روند سوخت گیری نیز کمک می کند، می توان این چالش ها را به فرصت تبدیل نمود. بررسی ها نشان می دهد جایگزین نمودن سوخت هایی مانند بنزین و گازوئیل با CNG در کوتاه مدت می تواند علاوه بر کاهش مرگ و میر با انتشار کربن کم، امنیت انرژی را نیز افزایش دهد. برای گسترش استفاده از گاز طبیعی در حمل و نقل باید تحقیقات در موتورهای CNG سوز با حجم موتور پایین تسریع شود. همچنین با توجه به هزینه بالای نگهداری ایستگاه های عرضه CNG، مدل بهینه انرژی برای کنترل مصرف برق کمپرسور ارائه گردد تا با صرفه جویی برق تمایل بخش خصوصی به سرمایه گذاری در این بخش افزایش یابد. کاهش مصرف و جایگزینی سوخت بنزین با گاز طبیعی فشرده از منظر اقتصادی نیز اقدامی مقرون به صرفه به شمار می آید زیرا افزایش سهم مصرف CNG در بخش حمل و نقل می تواند وابستگی کشور به واردات بنزین را کاهش

داده و در نتیجه، هزینه های ارزی و مالی مرتبط با تأمین این فرآورده را تا حد قابل توجهی کاهش دهد؛ بنابراین راهکارهای مشخصی شامل اصلاح سیاست های بارانه ای، بازسازی جایگاه ها و حمایت از مصرف کنندگان خودروهای دوگانه سوز با اختصاص بودجه به این خودروها، به عنوان راه حل های اجرایی می تواند مدنظر قرار گیرند.

#### مراجع:

- [1]. Wang, H., Ji, G., Xia, J. (2019). Analysis of regional differences in energy-related PM2.5 emissions in China: Influencing factors and mitigation countermeasures. *Sustainability* 11 (5), 1409. DOI: 10.3390/su11051409
- [2]. کاشفی ک، سیف س ش، یوسف زادگان م ص، قاسمی کفرودی ا، میاندهی م، تسبندی م. (۱۳۹۷). شناسایی منابع و برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه ای از خطوط و تجهیزات انتقال گاز ایران. *مهندسی گاز ایران*، ۵ (۱)، ۶۳-۷۱. DOR: 20.1001.1.25885251.1397.5.1.6.9
- [3]. Vanek, F., Albright, L. and Angenent, L. (2016). *Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation*. Third Edition, New York: McGraw-Hill Education.
- [4]. Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J.R., & Velázquez-Martínez, J.C. (2020). Measuring environmental performance of urban freight transport systems: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101844. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101844
- [5]. Raza, S.A., Shah, N., & Sharif, A. (2019). Time frequency relationship between energy consumption, economic growth and environmental degradation in the United States: Evidence from transportation sector. *Energy*, 1, 20-73. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.077
- [6]. Dioha, M.O. and Kumar A. (2020). Sustainable energy pathways for land transport in Nigeria. *Utilities Policy* 64:

- Mitigating Air Pollution? Fresh Evidence from National and Regional Analysis in China. *Sustainable Production and Consumption*. 27. 325-336. DOI: 10.1016/j.spc.2020.11.010
- [16]. Squizzato, S., Masiol, M., Rich, D.Q., Hopke, P.K. (2018). PM 2.5 and gaseous pollutants in New York State during 2005–2016: Spatial variability, temporal trends, and economic influences. *Atmos. Environ.* 183, 209–224. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.045
- [17]. Haeng, M.C. and Mahmud, M.I. (2009). Benefit analysis of CNG as an automobile fuel. *CLEAN Technol.*, 15(1), 1-8.
- [18]. Ou, X. and Zhang, X. (2013). Life-cycle analyses of energy consumption and GHG emissions of natural gas-based alternative vehicle fuels in China, *Energy*. DOI: 10.1155/2013/268263
- [19]. Hagos, D.A., Ahlgren, E.O. (2018). Well-to-wheel assessment of natural gas vehicles and their fuel supply infrastructures – Perspectives on gas in transport in Denmark. *Transp. Res. Part D Transp. Environ* 65:14–35. DOI: 10.1016/j.trd.2018.07.018
- [20]. Chai, J., Shi, H., Zhou, X. & Wang, S. (2018). The Price Elasticity of Natural Gas Demand in China: A Meta-Regression Analysis. *Energies*. 11. DOI: 10.3390/en11123255
- [21]. موسایی، هاتفی م، ع، حیدری اصل م م (۱۳۹۹). طراحی مدل جامع انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی (مطالعه موردی: کشور ایران)، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳۷. DOI: 10.22054/jice.2022.61414.1852.
- [22]. PWC, assessing the impact of gas flaring on the Nigeria economy. Pricewaterhouse Coopers Limited. (2019). <https://globalcarbonatlas.org/>
101034. DOI: 10.1016/j.jup.2020.101034
- [7]. <https://www.irna.ir/news/85736262>
- [8]. Tahami Pour, M., Abedi, S., Karimi Baba Ahmadi, R. and Ebrahimi Zadeh, M. (2016). The Investigation of Renewable Energy Effects on Iranian Per Capita Real Economic Growth. *Journal of Iranian Energy Economics*, Vol. 5, No. 19, pp. 53-77. (In Persian) DOI: 10.22054/jice.2017.7304
- [9]. IEA. (2019). Data & Statistics – IEA. In *Electricity Information*.
- [10]. Liu, W., Safdari Shadloo, M., Tlili, I., Maleki, A., Bach, QV. (2020). The effect of alcohol–gasoline fuel blends on the engines performances and emissions. *Fuel*. 266:117977. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117977
- [11]. Shamsapour, N., Hajinezhad, A. & Noorollahi, Y. (2020). Developing a system dynamics approach for CNG vehicles for low-carbon urban transport: a case study. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 16. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa085. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa085
- [12]. Alrazen, H.A., & Ahmad, K.A. (2018). HCNG fueled spark-ignition (SI) engine with its effects on performance and emissions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 324-342. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.035
- [13]. یساول س، سلاطین پ. (۱۴۰۱). کشش تقاضای گاز در گروه کشورهای منتخب. *مهندسی گاز ایران*، ۹ (۲)، ۲۹-۴۶. DOI: 10.22054/jice.2022.61414.1852.
- [14]. Khan, M.I., Yasmin, T., & Shakoor, A. (2015). International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel. *Energy Systems*, 6, 507-531. DOI: 10.1007/s12667-015-0152-x
- [15]. Li, H., Shahbaz, M., Jiang, H.D. & Dong, K. (2020). Is Natural Gas Consumption



pdf Tippee, B. (2012). Defining Energy Security. Oil and Gas Journal.

[34]. ستاری س، حوری جعفری ح، روشندل ر، ناصری ا، مشایخی م (۱۳۸۷). توجیه فنی اقتصادی CNG در ایران، شرکت هزاره سوم اندیشه، تهران.

[35]. NDRC. (2015). Notification on rationalizing non-residential-use natural gas prices. Beijing: National Development and Reform Commission.

[36]. NBS. (2015). China statistical yearbook 2000-2014. Beijing: National Bureau of Statistics.

[37]. Harutunian, M. (2006). Isolated Armenia leads the way in using cleaner car fuel. industryweek, Dec. 05, 2006.

[38]. Zhang, K. (2012). Target versus price: improving energy efficiency of industrial enterprises in China. [Doctoral dissertation]. The Pennsylvania State University. etda. libraries.psu.edu/paper/13729/

[39]. عادل برخوردار ز س، وهرامی و. (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر جایگزینی سوخت در بخش حمل‌ونقل بر انتشار گازهای گلخانه‌ای. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۱ (۱)، ۹۰-۹۹. DOI: 10.22034/jrenew.2024.186881.

[40]. Paul, C. Hanlon (2001). COMPRESSOR HANDBOOK.

[41]. مجنونى ا، شیخ زاده ق ع، شکیبائی م. (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل انفجار مخزن ذخیره گاز مایع (LPG) در یک خودروی جاده‌ای بر اثر پدیده بخار مایع در حال جوش (BLEVE). مهندسی مکانیک مدرس. ۲۴ (۷): ۴۲۱-۴۳۱. DOR: 10.22054/jee.2022.61414.1852.

[42]. Paltsev, S., Jacoby, H., Reilly, J.M., Ejaz, Q.J., O'Sullivan, F., Morris, J., Rausch, S., Winchester, N., & Kragha, O.C. (2011). The future of U.S. natural gas production, use, and trade. Energy Policy, 39, 5309-5321. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.05.033

emissions/carbon-emissions/

[23]. Holmberg, K. & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO<sub>2</sub> emission globally and in combustion engine and electric cars. Tribology International, 135, 389-396. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.024

[24]. اصفهانیان و بهرامی بالاجاده ح، کردی م (۱۳۸۵). ایستگاه سوخت‌رسانی CNG، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، تهران.

[25]. Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., & Li, W. (2016). Natural gas as vehicle fuel in China: A review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 62, 521-533. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.015

[26]. مجنونى ا، شیخ زاده ق ع (۱۴۰۳). مدل‌سازی و مطالعه انفجار مخازن ذخیره گاز در ایستگاه‌های سوخت گاز طبیعی فشرده (CNG)، نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۱۴، شماره ۲، ۴۵-۶۳.

[27]. DOI: 10.22044/jsfm.2024.13730.3802

[28]. <https://farsnews.ir/news/14020715000328>

[29]. Neeraas, O.b., Hennine, E. and Stenersen, D. (2002). NGV Master Plan for Iran, Conceptual of Filling Station and Vehicle System, Marintek Report.

[30]. Akbar, S. and Kojima, M. (2000). International experience with CNG vehicles. World Bank Tech. Pap. No. 516, vol. Paper No., pp. 3-6.

[31]. Geng, P., Yao, C., Wei, L., Liu, J., Wang, Q., Pan, W., & Wang, J. (2014). Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel. Fuel, 123, 1-11. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.056

[32]. Health Effects Institute (2019). State of Global air 2019.

[33]. [https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga\\_2019\\_fact\\_sheet](https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_fact_sheet).



- M. (2021). Safety systems for the oil and gas industrial facilities: Design, maintenance policy choice, and crew scheduling. *Reliability Engineering & System Safety*. DOI: 10.1016/j.res.2021.107545
- [51]. Khan, M., Yasmin, T. & Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.053
- [52]. Liu, Y., Alzahrani, I., Adnan Jaleel, R. & Sulaie, S. (2023). An efficient smart data mining framework based cloud internet of things for developing artificial intelligence of marketing information analysis. *Information Processing & Management*. DOI: 10.1016/j.ipm.2022.103121
- [53]. Gao, P., Li, W., Sun, Y., & Liu, S. (2022). Risk assessment for gas transmission station based on cloud model based multilevel bayesian network from the perspective of multi-flow intersecting theory. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 887-898. DOI: 10.1016/j.psep.2022.01.036
- [54]. Srivastava, P., Agarwal, M., Narayanan, A., Tandon, M. & Tulsian, M. (2019). Mitigation of Risk in CNG Station Using Fuzzy-Integrated Technique. DOI: 10.1007/978-981-13-6577-5\_50
- [55]. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. Washington, D.C. Retrieved.
- [56]. International Energy Agency (IEA). (2023). The Role of Natural Gas in Transport— Comparative Emissions Analysis. Paris: IEA Publications.
- [57]. <https://petrorate.com/price-per-liter-of-gasoline-fob-persian-gulf/>
- [43]. Xiaoye Han, P.D., Zhang, X., Zheng, M., & Tjong, J. (2022). Energy efficiency improvements and CO<sub>2</sub> emission reduction by CNG use in medium- and heavy-duty spark-ignition engines. *Energy*, 263, 125769. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125769
- [44]. Mäkká, K., Kampová, K., Lovecek, T., Petřlová, K. (2021). An Environmental Risk Assessment of Filling Stations Using the Principles of Security Management. A Case Study in the Slovak Republic. *Sustainability*. DOI: 10.3390/su132212452
- [45]. Kagiri, C., Zhang, L. & Xia, X. (2019). A Hierarchical Optimisation of a Compressed Natural Gas Station for Energy and Fuelling Efficiency under a Demand Response Program. *Energies*. DOI: 10.3390/en12112165
- [46]. Liang, Y.L., Guo, C.X., Li, K.J. & Li, MY. (2021). Economic scheduling of compressed natural gas main station considering critical peak pricing. *Applied Energy*. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116937
- [47]. درخشان م، اسفندیاری ن. (۱۳۹۸). مدل سازی شرایط تشکیل هیدرات گازی در خط انتقال دریایی سروش- ابوذر. *مهندسی گاز ایران*، ۶(۱)، ۳۵-۴۰. DOR: 20.1001.1.25885251.1398.6.1.4.4
- [48]. Sadeghi Yarandi, M. & Karimi, A. (2018). Evaluation of Consequence Modeling of Fire and Explosion on Methane Storage Tanks in a CNG refueling Station. *Injury Control and Safety Promotion*. 6. 236-247.
- [49]. Altuwair, I. & Khan, F. (2020). Safety analysis of instantaneous release of compressed natural gas from a cylinder. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104284
- [50]. Redutskiy, Y., Camitz-Leidland, C., Vysochyna, A., Anderson, K. & Balycheva,



## Barriers and Challenges to the Adoption of Compressed Natural Gas (CNG) in the Transportation Sector

Mehran Shakibaei<sup>1</sup>, Omid Majnoui<sup>2</sup>, Ghanbar Ali Sheikhzadeh Nooshabadi<sup>3\*</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering-Heat and Fluid, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
2. Ph.D. Student, Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Mechanical Engineering-Heat and Fluid, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

### ARTICLE INFO

REVIEW PAPER

#### Article History:

Received: 14 October 2025

Revised: 03 November 2025

Accepted: 11 November 2025

#### Keywords:

Compressed Natural Gas (CNG)

Pollution

Fuel station

Transportation industry

Natural Gas Vehicle (NGV)

### ABSTRACT

The expansion of the transportation sector has consistently faced significant challenges due to rising energy demand and increasing carbon dioxide emissions. Natural gas, with its higher methane content, offers superior combustion quality. This study investigates compressed natural gas (CNG) as a clean and viable fuel for reducing air pollution in the medium term and examines the challenges and barriers associated with its adoption as a substitute for gasoline. Considering Iran's abundant natural gas resources, CNG can play a critical role as an alternative vehicular fuel, contributing to the optimization of gasoline production and enhancing energy security. Nonetheless, due to the low and subsidized price of gasoline, managing and reforming consumption patterns remains challenging, placing Iran among the top six CO<sub>2</sub>-emitting countries globally and following an upward emission trend. Key factors limiting CNG adoption in recent years include the deterioration and occasional safety concerns of refueling stations, the relatively small price differential between CNG and gasoline relative to travel distance, high electricity consumption, and moisture content in the gas affecting system performance. Economically, substituting gasoline with increased CNG usage is cost-effective and can help reduce expenses related to gasoline imports.

DOR: [20.1001.1.2510.1110.1404.08.20](https://doi.org/10.1001.1.2510.1110.1404.08.20)

#### How to cite this article

M. Shakibaei, O. Majnoui, G.A. Sheikhzadeh Nooshabadi, Barriers and Challenges to the Adoption of Compressed Natural Gas (CNG) in the Transportation Sector. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 12(4): 21-35. ([https://ijge.irangi.org/article\\_735801.html](https://ijge.irangi.org/article_735801.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [sheikhz@kashanu.ac.ir](mailto:sheikhz@kashanu.ac.ir), (M. Sheikhzadeh Nooshabadi).

Available online 11 March 2026

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

