# آنالیز چاه تا چرخ خودرو سواری و موتورسیکلت برقی در کشور و مقایسه با انواع درون‌سوز

**زهرا صبوری**
**کارشناس ارشد مهندسی برق**
**zsabouri۹۲@gmail.com**
**مهدیه علی‌بخشی**
**کارشناس ارشد مهندسی برق**
**malibakhshi@nri.ac.ir**
**محمد اسکویی**
**کارشناس ارشد مهندسی برق**
**moskuoee@nri.ac.ir**

**تاریخ دریافت:**
۱۴۰۱/۹/۲

**تاریخ پذیرش:**
۱۴۰۲/۴/۱۸

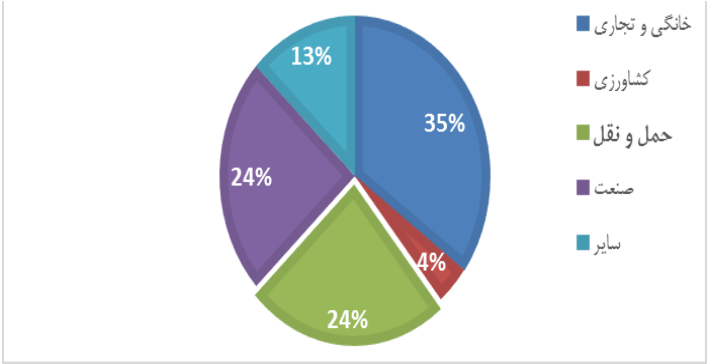
**کلمات کلیدی:**
آنالیز چاه تا چرخ- خودرو برقی- خودرو فسیلی – انرژی الکتریکی

## چکیده

مصـــرف بالای انرژی در ایران به همراه میزان بالای نشـــر آلاینده‌های هوا (آلاینده‌های محلی و گازهای گلخانه‌ای) از جمله مشکلات اصلی در بخش حمل‌ونقل ایران است. اخیرا در ک شورهای پی شرفته دنیا، ا ستفاده از خودروهای کم م صرف و با آلایندگی کم در کنار اسـتفاده از سـوخت مخلوط شـده با اتانول یا اسـتفاده از خودروهای هیبریدی و برقی، به عنوان روش‌هایی برای مقابله با مشکلات بخش انرژی در دستور کار قرار گرفته است. در کشور ما با توجه به اینکه بیشتر برق تولیدی از سوختن منابع فسیلی به دست می‌آید برخی بر این باورند که اســـتفاده از خودروهای برقی انتشـــار زیاد آلاینده‌ها را به همراه خواهد داشـــت. لذا در این مقاله به آنالیز چاه تا چرخ برای انواع خودرو (درون ســـوز، برقی و هیبریدی) در کشـور پرداخته شـده اسـت. در بحث خودرو برقی، میزان مصـرف انرژی و انتشار آلاینده در تولید باتری لیتیوم یون نیز مد نظر قرار گرفته است.

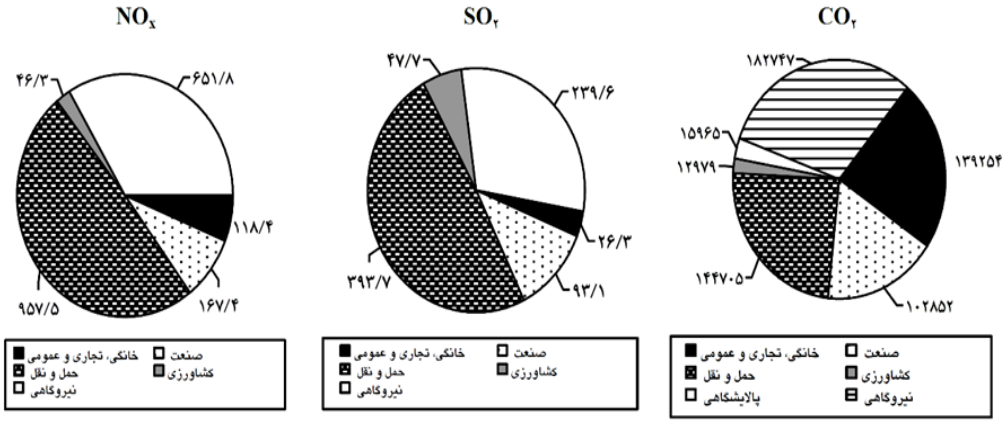
## ۱ مقدمه

کیفیت پایین سوخت و عدم برنامه‌ریزی مناسب در بخش انرژی و حمل ونقل کشور در کنار تکنولوژی ساخت قدیمی خودروهای داخلی، باعث شده خودروهای داخل کشور بسیار پرمصرف و با آلایندگی بالا باشند. این امر علاوه بر معضلاتی مانند آلودگی هوا و مصرف بالای انرژی، کشور را از منابع ارزی که می‌تواند عایدش شود محروم می‌کند. مصرف انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی کشور در نمودار شکل ۱ مشاهده می‌شود. سهم بخش حمل‌ونقل از کل انرژی مصرف شده در کشور حدود یک چهارم محاسبه شده‌است. فراورده‌های اصلی مورد استفاده در این بخش عبارتند از: بنزین، نفت‌گاز (گازوئیل)، CNG و سوخت هوایی.




شکل ۱- سهم بخش‌های مختلف اقتصادی از مصرف کل انرژی در کشور در سال ۹۵ (ماخذ ترازنامه هیدروکربوری سال ۱۳۹۵) [۱]

در گزارش ارائه شده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس، دلیل بالا بودن مصرف در بخش حمل و نقل، بالا بودن میانگین سنی ناوگان حمل‌ونقل عنوان شده است. عمر ناوگان از متوسط جهانی بیشتر است و با گذشت زمان بهره‌وری بخش حمل ونقل نسبت به معیار جهانی پایین تر آمده است. به‌علاوه میزان انتشار آلاینده‌ها در بخش‌های مختلف در سال ۹۶ در ترازنامه انرژی ارائه شده‌است [۲]. شکل ۲ میزان انتشار آلاینده‌های $SO_2$، $CO_2$ و NOx از بخش‌های مختلف انرژی در سال ۹۶ را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد بیشترین سهم در انتشار آلاینده‌ها در کشور مربوط به بخش حمل و نقل می‌باشد.




شکل ۲- میزان انتشار آلاینده‌های $SO_2$، $CO_2$ و NOx از بخش‌های مختلف انرژی در سال ۹۶

در این میان، تغییر استراتژی در استفاده از خودروهای برقی به‌جای خودروهای درون‌سوز، یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای رفع مشکلات ذکرشده است. موضوع این جایگزینی در کشور از دیدگاه انرژی مصرفی و آلاینده‌های تولیدی از چاه تا چرخ قابل بررسی می‌باشد.

این مقاله با هدف توسعه خودروهای پاک در کشور، به بررسی میزان انرژی مصرفی و آلاینده تولید شده در انواع خودرو در پروسه چاه تا چرخ می‌پردازد.

در ادامه به ارائه مفاهیم عمده در خصوص آنالیز چاه تا چرخ به تفکیک مراحل، انواع آلاینده‌های منتشر شده و اثرات مخرب آنها پرداخته و پس از آن آنالیز چاه تا چرخ در دنیا برای انواع سوخت مصرفی در خودروها (درون سوز و خودروی برقی) با توجه به مقالات ارائه می‌گردد. در نهایت آنالیز چاه تا چرخ برای انواع سوخت در داخل کشور با استفاده از داده‌های ترازنامه انرژی [۲] ترازنامه هیدروکربوری [۱] و دیگر مراجع معتبر ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که در آنالیز چاه تا چرخ برای خودروی برقی و هیبریدی، میزان انرژی مصرفی و آلاینده‌های منتشر شده در تولید باتری لیتیوم یون نیز لحاظ شده است.

## ۲. مبانی آنالیز چاه تا چرخ انواع خودرو

تجزیه و تحلیل "چاه تا چرخ (WTW[۱])" نوعی از تجزیه و تحلیل چرخه عمر است که برای ارزیابی میزان انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای تولید شده در بخش حمل‌و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو معیار به نوعی بیان‌گر استفاده بهینه، کارایی و در نهایت صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. این تجزیه و تحلیل به دو مرحله زیر تقسیم می‌شود:

۱. تجزیه و تحلیل چاه نفت به مخزن سوخت (WTT[۲]) وسیله نقلیه

۲. تجزیه و تحلیل مخزن سوخت وسیله نقلیه به چرخ وسیله نقلیه (TTW[۳])

منظور از چاه نخستین گام در تولید انواع سوخت، که همان استخراج سوخت فسیلی از چاه (نفت یا گاز) است می‌باشد. منظور از چرخ نیز آخرین گامی است که طی آن انرژی سوخت به انرژی مکانیکی در چرخ وسیله نقلیه تبدیل شده و منجر به حرکت آن می‌شود بر این اساس آنالیز چاه تا چرخ برای هر نوع سوخت شامل موارد زیر است:

•محاسبات انرژی مورد نیاز برای تولید یک واحد انرژی از سوخت مورد نظر (از مرحله استخراج منبع اولیه انرژی تا پمپاژ به مخزن سوخت وسیله نقلیه)

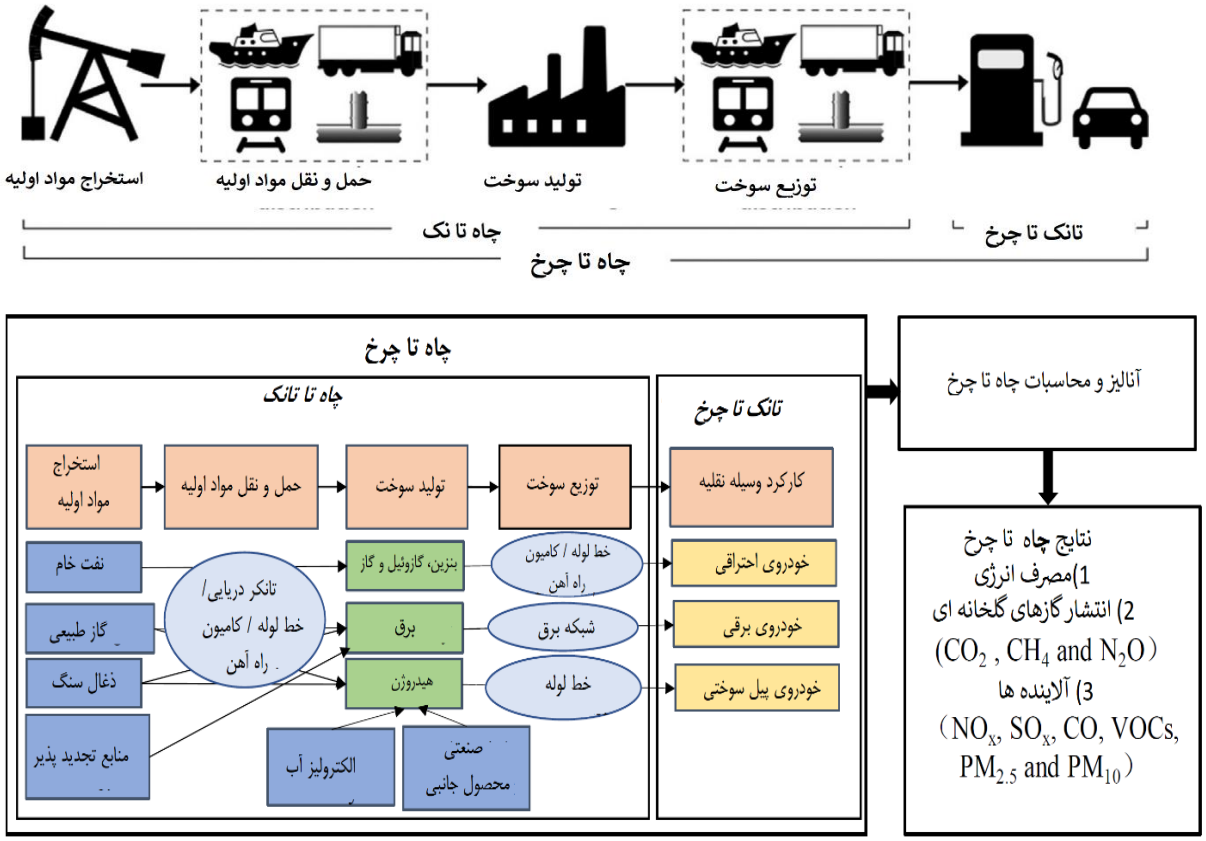
•محاسبه انرژی مصرف شده توسط انواع وسیله نقلیه

محاسبه گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در روند یک واحد انرژی از سوخت مورد نظر (از مرحله استخراج منبع اولیه انرژی تا پمپاژ به مخزن سوخت وسیله نقلیه)

•محاسبه آلاینده‌های تولید شده در روند مصرف سوخت توسط وسیله نقلیه

شکل۳ به طور خلاصه اما کامل، تمامی مواردی که در آنالیز چاه تا چرخ برای انواع خودرو، که لازم است در این آنالیز لحاظ گردد را نشان می‌دهد. در مرحله چاه تا مخزن سوخت (WTT)، ابتدا در بخش استخراج مواد اولیه با توجه به نوع خودرو و سوخت مصرفی، استخراج نفت خام، گاز طبیعی، ذغال سنگ و هم‌چنین منابع تجدید پذیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه با استفاده از تانکرها و خط لوله، این مواد استخراج شده به پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها، جهت تولید سوخت (بنزین، گازوئیل، گاز و برق) منتقل می شوند. سپس سوخت‌های تولیدی به ایستگاه‌های سوخت‌رسانی به انواع خودرو منتقل می شوند. در تمامی این مراحل میزان مصرف انرژی، و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی می شود. آنالیز مخزن سوخت تا چرخ (TTW) به بررسی میزان مصرف انرژی از مخزن سوخت (تانک) تا چرخ خودرو (عملکرد خودرو) و هم چنین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در هنگام کار وسایل نقلیه می‌پردازد.

[۱] Well ti Wheel
[۲] Well to Tank
[۳] Tank To Wheel




شکل ۳- شمای کلی از المان‌های مربوط به آنالیز چاه تا چرخ [۳]

لازم به ذکر است در آنالیز چاه تا چرخ برای خودروبرقی، زنجیره ارزش باتری هم با توجه به شکل ۴ اضافه می‌شود. به عبارت دیگر در آنالیز چاه تا چرخ برای خودروهای برقی میزان انتشار آلاینده‌ها و انرژی مصرفی در مراحل تولید باتری (از استخراج مواد خام تا مونتاژ پک) و کاربرد در خودروی برقی نیز در نظر گرفته می‌شود.

شکل۴- زنجیره ارزش باتری [۴]

## ۲-۱- آلاینده‌ها

وسایل نقلیه موتوری آلاینده‌هایی مضر را در هوا منتشر می‌کنند. اثرات برخی از آلاینده‌ها نظیر ذرات PM۲،۵/۱۰، CO و ... بصورت محلی هستند. درحالی که برخی از آلاینده‌ها ناحیه‌ای و یا جهانی هستند (گازهای گلخانه‌ای) و اهمیت مکانی کمتری دارند. دی‌اکسیدکربن، مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای در ارتباط با به کارگیری انرژی است. درحالی که متان، کلروفلوئور و کربن‌های انتشاریافته از فعالیت‌های بشر، کمتر با به کارگیری انرژی ارتباط دارند. گازهای گلخانه‌ای، تنظیم‌کننده دمای سطح کره زمین هستند که تشدید تجمع این گازها در اتمسفر موجب " اثر گلخانه‌ای" می شود که عامل عمده تغییرات آب وهوای جهان ا ست. تغییر آب وهوا به طور م ستقیم و غیرم ستقیم پیامدهای منفی و مخرب به دنبال دارد. بلایایی چون طوفان، گردباد، سیل و بالا آمدن سطح آب دریاها از نتایج مستقیم این تغییرات است.

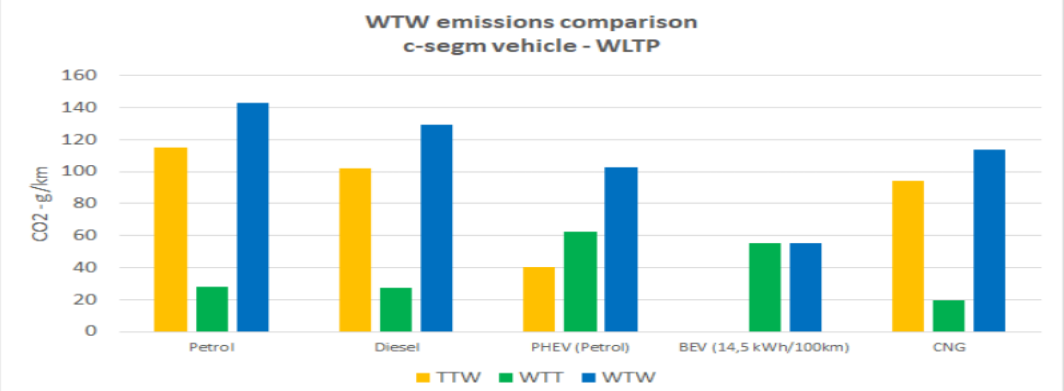
دی‌اکسـیدکربن، متان، دی‌اکسـید نیتروژن، ازن تروپوسـفری و کلروفلوئوروکربن‌ها مجموعاً به عنوان گازهای گلخانه‌ای (GHG[۴]) نامیده می‌شوند. برای سنجش میزان گازهای گلخانه‌ای از مفهوم $CO_2$ معادل استفاده می‌شود [۵]. شاخص میزان انتشار $CO_2$ معادل، از ترکیب وزنی انتشار سه آلایندهٔ با مقادیر موسوم به پتانسیل گرمایش جهانی (GWP[۵]) به دست می‌آید که مقادیرآن به شرح جدول ۱ است. لازم به ذکر است تمرکز آنالیز چاه تا چرخ از نظر آلایندگی، بر انتشار گازهای گلخانه‌ای است. درخصوص آلاینده‌های محلی، از آنجا که آلایندگی خودروبرقی مربوط به تولید برق نیروگاه و در خارج از نواحی شهری است، لذا در مقایسه با خودرو درون‌سوز مزیت ذاتی دارد.

*جدول ۱- وزن انواع آلاینده‌ها در محاسبهٔ معادل دی‌اکسیدکربن معادل [۶]*

| نوع آلاینده | شاخص GWP |
|---|---|
| $Co_2$ | ۱ |
| $CH_4$ | ۲۱ |
| $N_2O$ | ۳۱۰ |

## ۳- مقایسه آنالیز چاه تا چرخ انواع خودرو درکشورهای مختلف دنیا

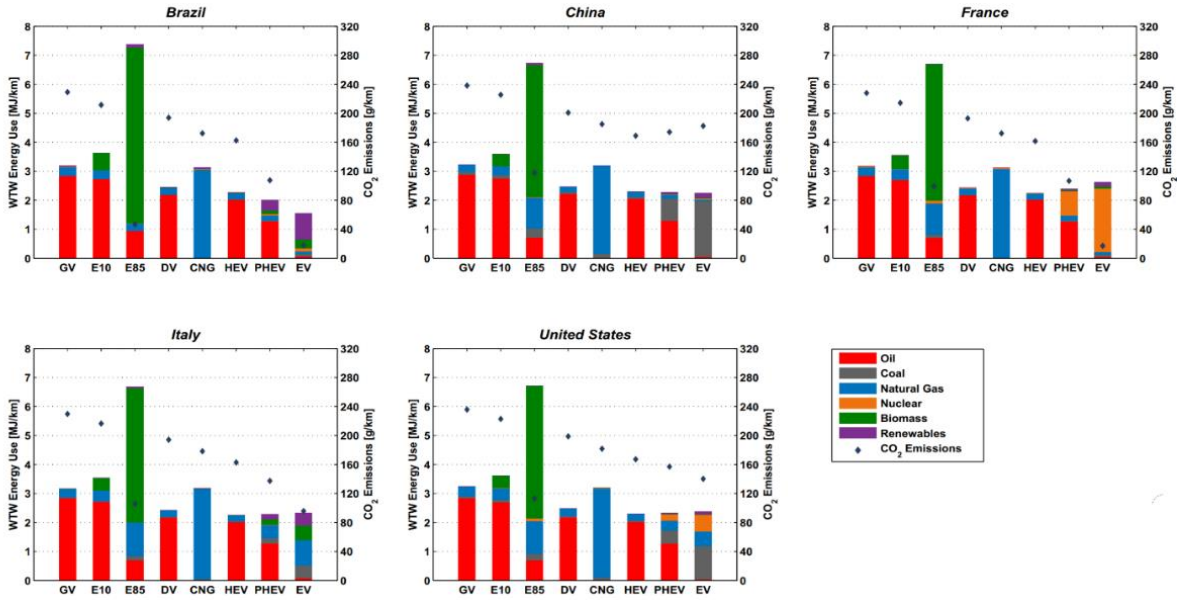
در آنالیز چاه تا چرخ منتشر شده در مرجع [۷]، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در انواع خودرو به صورت شکل ۵ استخراج شده‌است. همانطور که ملاحظه می شود میزان انتشار $Co_2$ معادل از چاه تا چرخ برای خودروی بنزینی از سایر موارد بیشتر بوده و میزان انتشار آن برابر با ۱۴۰ گرم در هر کیلومتر پیمایش می‌باشد. به ترتیب آلایندگی خودروی دیزلی و خودرو CNG در رتبه بعدی از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای چاه تا چرخ قرار دارند. از طرفی خودرو تمام برقی با ۵۵ گرم در هر کیلومتر انتشار $Co_2$ معادل، کمترین آلایندگی چاه تا چرخ را به خود اختصاص داده است و پس از آن خودرو هیبرید پلاگین کم آلاینده ترین خودرو می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این شکل، میزان آلایندگی خودرو CNG می‌باشد که نسبت به نوع تمام برقی، دو برابر انتشار GHG را نشان می‌دهد [۷].




شکل ۵- میزان انتشار آلاینده‌ها در انواع خودرو [۷]

به علاوه شکل ۶ مقایسه انرژی مصرفی و همچنین میزان انتشار $CO_2$ معادل از چاه تا چرخ در ۵ کشور در انواع خودروهای درون سوز، برقی و هیبریدی را در مرجع [۸] نشان می‌دهد.

[۴] GreenHouse Gases
[۵] Global Warming Potential (GWP)




شکل ۶- مقایسه انرژی مصرفی و میزان انتشار $CO_2$ معادل **WTW** در ۵ کشور (برزیل، چین، فرانسه، ایتالیا، آمریکا) و در انواع خودروهای درون سوز، برقی و هیبریدی [۸]

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، به جز خودروی $E_{85}$ (خودروی دوگانه سوز با ۱۵٪ سوخت بنزین و ۸۵٪ سوخت اتانول) انتشار $CO_2$ معادل در خودروهای بنزینی در تمامی ۵ کشور بررسی شده، بیشتر از دیگر انواع خودرو می‌باشد. درمورد خودروی تمام برقی، همانطور که در شکل به خوبی نشان داده شده‌است، در کشور برزیل نسبت به دیگر کشورها که سبد انرژی برق آن بیشتر از نوع تجدید پذیر است، مصرف انرژی و انتشار $CO_2$ معادل کمتری وجود داشته است. در کشور چین که حجم بیشتری از انرژی برق از ذغال سنگ است میزان انرژی مصرفی و انتشار $CO_2$ معادل خودروی برقی بیشتر از سایر کشورها می‌باشد. در فرانسه هم که سبد انرژی برق بیشتر از انرژی هسته‌ای است، میزان انرژی مصرفی در خودروی برقی بیشتر از سایر کشورها بوده؛ اما از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای میزان $CO_2$ معادل بسیار پایین تر از سایر کشورها داشته است.

## ٤. آنالیز چاه تا چرخ برای انواع خودرو در کشور (WTW)

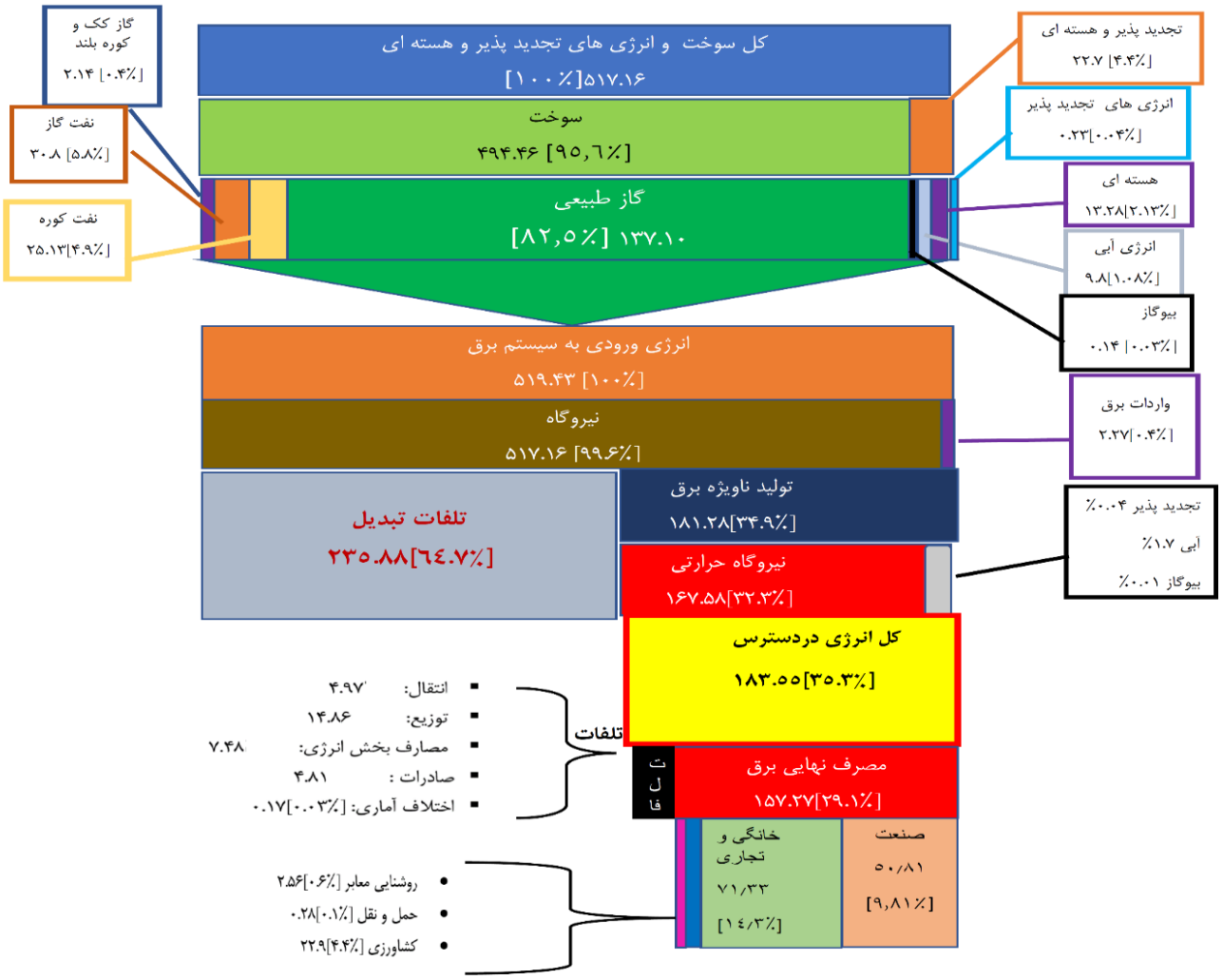
در ادامه آنالیز چاه تا چرخ انواع خودرو سواری و موتورسیکلت در ۲ بخش چاه تا تانک و تانک تا چرخ بررسی و ارائه می‌شود.

### ٤-١- آنالیز چاه تا تانک برای انواع خودرو در کشور (WTT)

آنالیز چاه تا تانک برای خودروهای درون سوز شامل محاسبه انرژی مصرفی و انتشار گازهای گلخانه‌ای برای مراحل استخراج، پالایش و انتقال بنزین تا جایگاه سوخت و باک خودرو می‌باشد. در خودرو برقی نیز آنالیز چاه تا تانک شامل استخراج و پالایش انواع سوخت نیروگاه‌ها، تولید برق و انتقال و توزیع آن تا مصرف‌کننده می‌باشد.

- **آنالیز چاه تا تانک خودرو برقی در کشور**

انرژی مصرفی از جریان تولید، انتقال و توزیع و در نهایت وضعیت مصرف برق در کشور مطابق با ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۶ به صورت خلاصه در شکل ۷ نشان داده شده‌است [۲].




اعدادی بر حسب: میلیون بشکه نفت خام هستند .

اعداد داخل []سهم به ازای درصد است.

شکل ۷- جریان منابع و مصارف برق کشور در سال ۱۳۹۶ [۲]

مطابق با آن مقدار انرژی وارد شده به به شبکه برق مطابق با شکل ۷ معادل ۵۱۷ میلیون بشکه نفت خام بوده که انرژی معادل آن به ترا واتساعت و گیگاژول به صورت روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود. نتایج محاسبه در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین میزان انرژی مصرفی برای تولید هر کیلووات‌ساعت برق طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$E_{Wh} = ۵۱۹ * ۱۰^{۶} * ۱.۷\ MWh = ۸۸۲\ TWh \qquad (1)$$

$$E_{Gj} = ۵۱۹ * ۱۰^{۶} * ٦.۱۲\ Gj = ۳۱۷۵ * ۱۰^{۶}\ GJ \qquad (2)$$

$$E = ۳۱۷۵ \times ۱۰^{۶} / ۲٦٦ \times ۱۰^{۶} = 11.9\ Mj/kWh \qquad (3)$$

جدول ۲ – مقادیر انرژی ورودی به شبکه برق و مصرف نهایی آن [۹]

| تبدیل واحد | بشکه نفت خام | مگا وات ساعت | گیگا ژول |
|---|---|---|---|
| **کل انرژی ورودی به سیستم برق** | ۵۱۷ میلیون | ۸۸۲ میلیون | ۳۱۷۵ میلیون |
| | ۱ | ۱,۷ | ۶,۱۱۷ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **مصرف نهایی برق** | ۱۵۷ میلیون | ۲۶۶ میلیون | ۹۶۰ میلیون |

میانگین شاخص انتشار آلاینده‌های نیروگاهی در سال ۱۳۹۶ در کشور در جدول ۳ نشان داده شده‌است. با توجه به مطالب عنوان شده، بازده شبکه برق در سال ۹۶ حدود ۲۹,۹ درصد و انرژی مصرفی برای هر کیلو وات ساعت معادل ۱۱,۹ مگاژول بوده است. همچنین میزان انتشار آلاینده ها هم معادل ۶۴۶ گرم $CO^{۲}$ معادل در هر کیلووات ساعت می باشد [۲].

*جدول ۳- میانگین شاخص انتشار آلاینده‌ها در سال ۱۳۹۶ در نیروگاه‌های کشور (گرم بر کیلو وات ساعت) [۵]*

| NOx | $SO^{۲}$ | $SO^{۳}$ | CO | SPM | $CO^{۲}$ | $CH^{٤}$ | $N^{۲}O$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲,۲۸ | ۰,۸۴۱ | ۰,۰۰۷ | ۰,۵۴۸ | ۰,۰۸۸ | ۶۴۱,۲۴۵ | ۰,۰۱۳ | ۰,۰۲ | ۱۷۴,۸۸۵ |

- **آنالیز چاه تا تانک برای سوخت‌های فسیلی در ایران**

لازم به تو ضیح ا ست که برای سوخت بنزین پرو سه چاه تا مخزن سوخت شامل ا ستخراج و پرو سس نفت خام، حمل و نقل نفت خام، پالایش، توزیع و پخش و برای CNG شامل مراحل پروسه استخراج و فرآوری گاز طبیعی، حمل و نقل و توزیع گاز طبیعی توسط خط لوله، تبدیل گاز طبیعی به سی ان جی می باشد که با توجه به ترازنامه هیدروکربوری و ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۶، میزان انرژی مصرفی و آلاینده‌های انتشاریافته در پروسه چاه تا مخزن سوخت برای انواع سوخت (بنزین و CNG) به صورت جدول ۴ می‌باشد [۱۰].

*جدول ۴-میزان انرژی مصرفی و آلاینده‌های انتشار یافته برای بنزین و گازطبیعی [۱۰]*

| مرحله | انرژی مصرفی (MJx/MJ f [۶]) | انتشار GHG (g/MJf [۷]) |
|---|---|---|
| **بنزین** | ۰,۱۴ | ۱۲,۵ |
| **CNG** | ۰,۱۱۶۴ | ۱۰,۰۶ |

به عبارت دیگر بازده تولید بنزین در کشور معادل ٪۸۶,۵ و بازده تولید CNG در کشور معادل ٪۸۸,۳۶ می‌باشد.

لازم به توضیح است که در این جداول، میزان انرژی مصرفی برای تولید هریک از انواع سوخت، بر حسب مگاژول انرژی مصرفی بر مگاژول سوخت نهایی می‌با شد. به دلیل پایین بودن بازده نیروگاه‌های برق، تولید برق بسیار انرژی‌بر ا ست. اما سوخت‌های فسیلی از جمله بنزین و گاز طبیعی کمترین میزان انرژی مصرفی را در مرحله چاه تا تانک دارند. در واقع سوخت‌های فسیلی در مرحله تولید از بازدهی بالایی برخوردارند.

- **میزان انرژی مصرفی و گاز گلخانه‌ای منتشر شده در تولید باتری**

در خصوص برر سی میزان انرژی م صرفی و هم چنین آلاینده‌های منت شر شده در تولید باتری لیتیوم یون، لازم ا ست برر سی‌ها در مراحل مختلف صورت گیرند. این مراحل بطور کلی عبارتند از استخراج مواد اولیه از معدن و پالایش، تولید مواد باتری و تولید سلول و مجموعه پک باتری. در برر سی انرژی م صرفی در تولید باتری لیتیوم یون، بخش ا ستخراج مواد ت شکیل‌دهنده باتری بی شترین سهم را در م صرف

[۶] منظور مگاژول انرژی مصرفی برای تولید هر مگاژول انرژی فسیلی است (در واقع یعنی برای تولید هر مگاژول انرژی در هر مرحله از فرایند تولید، چند مگاژول انرژی مصرف می‌شود)

[۷] منظور گرم دی‌اکسیدکربن معادل برای تولید هر مگاژول انرژی است. (به بیانی برای تولید هر مگاژول انرژی چند گرم انتشار دی‌اکسیدکربن معادل تولید می‌شود)

انرژی و همچنین انتشار آلاینده‌ها دارد [۱۱]. حدود ۵۰٪ تولید گازهای گلخانه‌ای مربوط به تولید مواد اولیه باتری (از جمله سلول) است. در جدول ۵ میزان انرژی مصرفی و تولید گازهای گلخانه‌ای برای تولید انواع مختلف باتری لیتیوم یون نشان داده شده‌است [۱۱].

*جدول ۵- انرژی مصرفی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید هر کیلووات‌ساعت باتری لیتیوم یون NMC۱۱۱ [۱۱]*

| Chemistry | Cumulative energy demand for battery production (MJ/kWh) | Greenhouse gas battery production, total (kg $CO_2$ eq /kWh) |
|---|---|---|
| NMC | ۲۰۰-۵۰۰، متوسط ۱۰۳۰ | ۲۴۰-۴۰، متوسط ۱۶۰ |
| LFP | ۳۰۰-۲۵۰۰، متوسط ۹۷۰ | ۲۷۰-۳۰، متوسط ۱۶۱ |
| LMO | ۲۰۰-۱۵۰۰، متوسط ۸۱۰ | ۷۵-۵۰، متوسط ۵۵ |

برای باتری لیتیوم یون نوع NMC۱۱۱ میزان انرژی مصرفی در هر کیلووات ساعت ۱۰۴۸ مگاژول و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای ۱۶۵ گرم برای هر کیلووات‌ساعت می‌باشد [۱۱].

خلاصه نتایج بدست آمده در خصوص انرژی مصرفی و تولید گاز گلخانه‌ای برای تولید هر واحد سوخت جدول۶ مشخص شده‌است.

*جدول ۶- مقایسه انواع منابع انرژی در مرحله چاه تا تانک*

| نوع سوخت | بازده | انرژی مصرفی (مگاژول) | میزان انتشار GHG (گرم) |
|---|---|---|---|
| **تولید هرلیتر بنزین** | ۸۶,۵٪ | ۴,۸ | ۴۳۱ |
| **تولید هرلیتر CNG** | ۸۸,۳۶ ٪ | ۱,۰۵ | ۹۱,۴۵ |
| **تولید هر کیلو وات ساعت برق** | ۲۹,۹٪ | ۱۱,۹ | ۶۴۶ |
| **تولید هر کیلووات ساعت باتری لیتیوم یون نوع NMC۱۱** | - | ۱۰۴۸ | ۱۶۵ |

اکثر تولیدکنندگان باتری لیتیوم‌یون خودرو، ضمانتی ۵ تا ۸ ساله برای طول عمر باتری خود ارائه می‌دهند. برای مثال، کارخانهٔ نیسان ادعا می‌کند که باتری خودروهای برقی این کارخانه ۸ سال معادل ۱۰۰ هزار مایل یا ۱۶۰ هزار کیلومتر عمر می‌کند. درصورتی که متوسط پیمایش یک خودرو برقی در سال ۲۰,۰۰۰ کیلومتر فرض شود و باتری هر خودرو برقی را ۶۰ کیلووات ساعت و باتری هر خودرو هیبریدی را ۱۰ کیلووات‌ساعت فرض کنیم، در دوره عمر ۸ سال، میزان انتشار گاز گلخانه‌ای برای طی هر ۱۰۰ کیلومتر مسافت از رابطه (۴) به ترتیب ۶ گرم و ۱ گرم در هر ۱۰۰ کیلومتر به‌دست می‌آید. برای موتور سیکلت برقی با فرض ۳ کیلووات ساعت باتری و طول عمر ۸ سال، میزان انتشار GHG برای پیمایش ۱۰۰ کیلومتر، معادل ۰,۳ گرم خواهد بود.

$$CO2\ eq\ per\ km = \frac{C\ battry \times CO2\ eq\ per\ kwh}{Y\ battry \times Legth\ per\ year} \qquad (4)$$

همچنین با همین فرض و رابطه مشابه، انرژی مصرفی به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر پیمایش برای خودرو برقی و هیبریدی به ترتیب معادل ۳۹ مگاژول و ۶,۵ مگاژول به‌دست می‌آید. با توجه به مطالب عنوان شده و مقادیر جدول ۶، میزان انرژی مصرفی و انتشار گاز گلخانه‌ای برای انواع خودرو در مرحله چاه تا تانک برای ۱۰۰ کیلومتر پیمایش به صورت جدول ۷ بدست می‌آید. همچنین برای موتور سیکلت برقی با فرض مشابه انرژی مصرفی برای پیمایش ۱۰۰ کیلومتر، معادل ۱,۹ مگاژول خواهد بود. لازم به توضیح است که خودروی هیبریدی بصورت ۳۰ درصد احتراقی و ۷۰ درصد برقی در نظر گرفته شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود، انواع خودروی برقی (سواری و موتورسیکلت) در

مرحله چاه تا چرخ میزان انرژی بیشتری را نسبت به دیگر خودروهای احتراقی مصرف می‌کنند و این مساله متاثر از بازده نسبی پایین فرایند تولید برق است. لازم به ذکر است تولید برق حرارتی راندمان بسیار پایینی را نسبت به منابعی از جمله منابع تجدیدپذیر دارد.

*جدول ۷- میزان انرژی مصرفی در انواع خودرو در مرحله چاه تا تانک (**WTT**) در ۱۰۰ کیلومتر پیمایش*

| انرژی(مگاژول) | میزان سوخت مصرفی در ۱۰۰ کیلومتر | مجموع میزان انرژی مصرفی (مگا ژول) در ۱۰۰ کیلومتر | مجموع میزان انتشار GHG (گرم) در ۱۰۰ کیلومتر |
|---|---|---|---|
| **خودروی سواری بنزینی** | ۸,۴ لیتر | ۴۰ | ۳,۶۲۰ |
| **خودروی سواری CNG** | ۱۱ لیتر | ۱۲ | ۱,۰۰۶ |
| **خودروی سواری هیبریدی بنزینی** | ۲,۵۲ لیتر | ۱۵۶ | ۸۵۴۸ |
| | ۱۱,۵۵ کیلو وات ساعت مصرف برق | | |
| | تولید باتری (۱۰ کیلووات ساعت) | | |
| **خودروی سواری برقی** | ۱۶,۵ کیلو وات ساعت مصرف برق | ۲۳۵ | ۱۰,۶۶۵ |
| | تولید باتری (۶۰ کیلووات ساعت) | | |
| **موتورسیکلت بنزینی** | ۲,۶ لیتر | ۱۲,۵ | ۱,۱۲۱ |
| **موتورسیکلت برقی** | ۴ کیلو وات ساعت مصرف برق | ۴۹,۵ | ۲,۵۸۴ |
| | تولید باتری (۳ کیلووات ساعت) | | |

## ٤-۲- آنالیز تانک تا چرخ انواع خودرو در کشور (TTW)

مصرف سوخت خودرو پارامتر اصلی تعیین‌کننده میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مرحله TTW است. خودروهای برقی هیچ آلاینده‌ای در مرحله کار خودرو در هوا منتشر نمی‌کنند و در این مرحله فقط از منظر انرژی مصرفی مورد بررسی قرار می‌گیرند. اما خودروهای احتراقی در هنگام کار آلاینده‌های مختلفی را منتشر می‌کنند که لازم است مورد بررسی واقع شوند. لازم به ذکر است اقتصاد سوخت در دنیای واقعی تحت تأثیر عوامل زیادی مانند شرایط ترافیکی و عادت‌های رانندگی راننده قرار دارد.

در بررسی ضرایب انتشار آلایندگی برای انواع سوخت، اعداد گوناگونی وجود دارد. نتایج آلایندگی مستخرج ترازنامه انرژی، در رابطه با بنزین (حاصل از تقسیم کل آلاینده‌های ناشی از سوخت بنزین بر کل بنزین مصرفی در سال۱۳۹۶) در مقایسه با ضرایب انتشار در اطلاعات حمل و نقل ایران [۱۲] و مرجع خارجی [۱۳] در جدول ۸ نشان داده شده‌است. (لازم به ذکر است مرجع خارجی [۱۳] ضریب انتشار آلایندگی را برای شهر تهران اعلام نموده است).

*جدول ۸- مقایسهٔ ضرایب انتشار GHG بنزین در مراجع مختلف[۱۴]*

| مراجع | (gr/litr) $CO_2$-eq |
|---|---|
| مرجع خارجی [۱۳] | ۲۳۴۷,۲۴۲ |
| مرجع داخلی [۱۲] | ۱۹۲۸,۶ |
| استخراج از مرجع [۲] | ۲۴۳۶,۸ |

مشاهده می‌شود ضریب انتشار آلاینده بنزین در مرجع خارجی [۱۳] به عدد محاسبه شده با اطلاعات ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۶ نزدیک‌تر است. لذا به منظور انجام محاسبات از مرجع [۱۳] استفاده می‌شود. لازم به‌ذکر است که داده‌ها در مرجع اصلی به صورت (g/Kgfuel) است که در اینجا برای تسهیل در محاسبات، به (gr/lit) تبدیل شده است (جدول ۹). همچنین به منظور محاسبه $CO_2$ eq از ضرایب جدول ۱ استفاده شده است. ضرایب انتشار آلاینده مطابق با جدول ۱۰ می‌باشد. [۱۴]

جدول ۹- تبدیل کیلوگرم به لیتر

| نوع سوخت | جرم یک لیتر سوخت (Kg) |
|---|---|
| بنزین | ۰,۷۳ |
| گازوئیل | ۰,۸۵ |
| CNG | ۰,۷۱۴ |

جدول ۱۰- ضرایب انتشار برای انواع خودرو (gr/lit) [۱۳]

| آلاینده | سواری | | موتورسیکلت |
|---|---|---|---|
| | بنزین | CNG | بنزین |
| $CO^{۲}$-eq | ۲۳۴۷,۲۴ | ۲۴۳۷,۳۱ | ۲۴۱۳,۴ |
| $SO^{۲}$ | ۱,۰۹۵ | – | – |
| Nox | ۱۹,۷۱ | ۱۳,۵۷ | ۱,۹۹ |
| $PM^{۱۰}$ | ۰,۴۴ | – | ۰,۴۴ |
| CO | ۴۰۱,۵ | ۲۵,۷۸ | ۵۳۲,۹ |
| HC | ۴۵,۹۹ | ۳,۲۱ | ۳۸۶,۹ |

در خصوص محاسبه میزان انرژی مصرفی در انواع خودرو، به چگالی انرژی منابع سوخت نیاز می‌باشد که در محاسبات برای بنزین ۳۴,۲ و برای CNG ۹، مگاژول بر لیتر لحاظ شده است. همچنین هر کیلووات ساعت برق معادل ۳,۶ مگاژول انرژی است. در این آنالیز میزان انرژی مصرفی و آلاینده¬های انتشار یافته در زمان کار انواع خودرو با درنظرگیری میزان مصرف سوخت هر خودرو در پیمایش ۱۰۰ کیلومتری در روز، به صورت جدول ۱۱ بدست آمده است.

جدول ۱۱- میزان مصرف انرژی و انتشار GHG انواع خودرو از تانک به چرخ

| | مصرف سوخت در ۱۰۰ کیلومتر | مجموع مصرف انرژی (Mj/۱۰۰km) | مجموع انتشار GHG (kg/۱۰۰km) |
|---|---|---|---|
| خودروی سواری بنزینی | ۸,۴ لیتر | ۲۸۷ | ۱۹,۷ |
| خودروی سواری CNG | ۱۱ لیتر | ۹۹ | ۲۶,۸۱ |
| خودروی سواری هیبریدی (بنزین / برق) | ۲,۵۲ لیتر | ۱۲۵,۱ | ۵,۸۷ |
| | ۱۱,۵۵ کیلووات‌ساعت | | |
| خودروی سواری برقی | ۱۶,۵ کیلو وات ساعت | ۵۹,۴ | ۰ |
| موتورسیکلت بنزینی | ۲,۶ لیتر | ۸۸,۹۲ | ۶,۲۸ |
| موتور سیکلت برقی | ۴ کیلووات ساعت | ۱۴,۴ | ۰ |

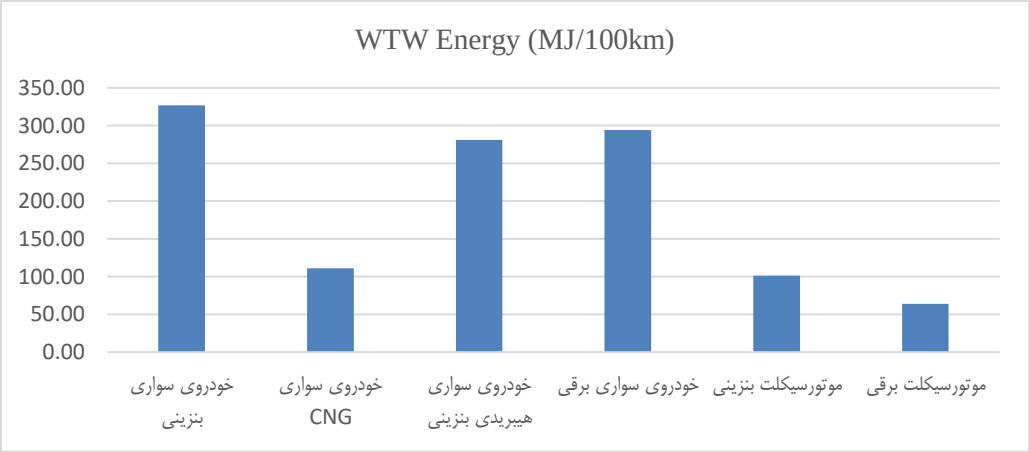
## ٤-۳- نتایج آنالیز چاه تا چرخ انواع خودرو در کشور (WTW)

میزان مصرف انرژی در فرایند WTW در جدول ۱۲و شکل ۸ و میزان انتشار آلاینده‌ها در جدول ۱۳ و شکل ۹ ارائه شده و نتایج زیر بدست آمد:

- خودروی سواری نوع بنزینی نسبت به نوع برقی و CNG در آنالیز چاه تا چرخ میزان انرژی بیشتری مصرف می‌کند.
- انتشار گازهای گلخانه‌ای در آنالیز چاه تا چرخ در مورد خودروی سواری و موتور سیکلت برقی بسیار کمتر از انواع دیگر خودروو موتورو سیکلت می‌باشد.
- خودروهای گاز سوز علیرغم صرف انرژی معادل کمتر و انتشار آلاینده‌های محلی بسیار کمتر نسبت به نوع بنزینی، انتشار گاز گلخانه‌ای بیشتری نسبت به نوع بنزینی دارند.

*جدول ۱۲- میزان مصرف انرژی در فرایند چاه تا چرخ برای انواع خودرو*

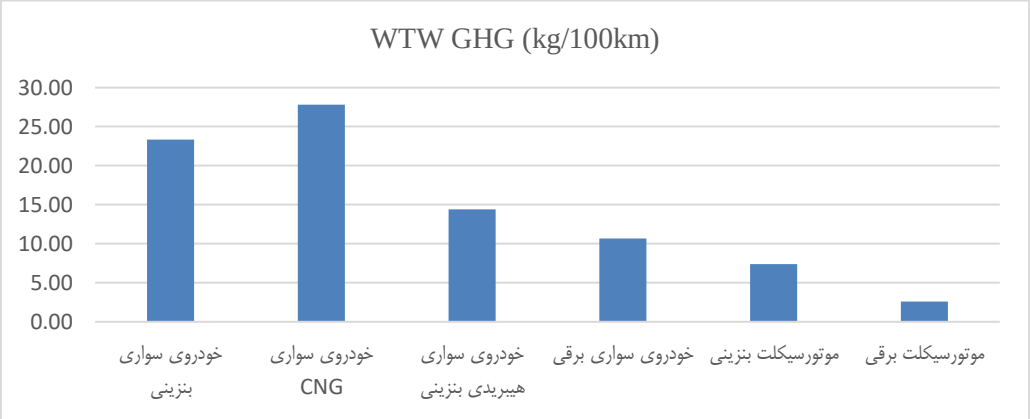
| انرژی(مگاژول) | WTT (MJ/۱۰۰km) | TTW (MJ/۱۰۰km) | WTW (MJ/۱۰۰km) |
|---|---|---|---|
| خودروی سواری بنزینی | ۴۰ | ۲۸۷ | ۳۲۷ |
| خودروی سواری CNG | ۱۲ | ۹۹ | ۱۱۱ |
| خودروی سواری هیبریدی بنزینی | ۱۵۶ | ۱۲۵,۱ | ۲۸۱ |
| خودروی سواری برقی | ۲۳۵ | ۵۹,۴ | ۲۹۴ |
| موتورسیکلت بنزینی | ۱۲,۵ | ۸۸,۹۲ | ۱۰۱ |
| موتورسیکلت برقی | ۴۹,۵ | ۱۴,۴ | ۶۴ |




شکل ۸- میزان انرژی مصرفی برای انواع خودرو از چاه تا چرخ

*جدول ۱۳- میزان انتشار GHG در فرایند چاه تا چرخ برای انواع خودرو*

| انرژی(مگاژول) | WTT GHG (Kg/۱۰۰km) | TTW GHG (Kg/۱۰۰km) | WTW GHG (Kg/۱۰۰km) |
|---|---|---|---|
| خودروی سواری بنزینی | ۳,۶۲ | ۱۹,۷ | ۲۳,۳۲ |
| خودروی سواری CNG | ۱,۰۱ | ۲۶,۸۱ | ۲۷,۸۲ |
| خودروی سواری هیبریدی بنزینی | ۸,۵۵ | ۵,۸۷ | ۱۴,۴۲ |
| خودروی سواری برقی | ۱۰,۶۷ | ۰ | ۱۰,۶۷ |
| موتورسیکلت بنزینی | ۱,۱۲ | ۶,۲۸ | ۷,۴ |
| موتورسیکلت برقی | ۲,۵۸ | ۰ | ۲,۵۸ |




شکل ۹- میزان دی‌اکسیدکربن معادل انتشار یافته در مرحله چاه تا چرخ انواع خودرو

## ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله به آنالیز چاه تا چرخ انواع خودرو از دو منظر مصـرف انرژی و انتشـار گازهای گلخانه‌ای پرداخته شـد. در خصـوص خودروهای برقی و هیبریدی زنجیره ارزش باتری لیتیوم یون که پرکاربردترین باتری برای اســتفاده در خودروهای برقی می‌باشـــد نیز در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که خودروی سواری نوع بنزینی نسبت به نوع برقی و CNG در آنالیز چاه تا چرخ میزان انرژی بیشتری مصرف می‌کند. همچنین دی‌اکسیدکربن معادل در آنالیز چاه تا چرخ در مورد خودروی برقی بسیار کمتر از خودروی سواری بنزینی و CNG می‌باشد.

نکته مهمی که باید به آن اشـاره کرد این اسـت که، خودروی برقی می تواند میزان انتشـار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای را در مقایسـه با خودروهای درون سوز تا حد بیشتری نیز کاهش دهد و میزان کاهش به سطح اقتصاد سوخت و شدت انتشار کربن شبکه برق بستگی دارد. وهر چه منابع تامین برق از سمت سوخت های فسیلی به سمت انرژی پاک پیش رود این کاهش انتشار آلاینده چشمگیرتر خواهد بود.

با توجه به اینکه استفاده از سوخت هیدروژنی برای تغذیه خودرو بحث جدیدی است و در سال های اخیر مورد بحث‌ها و آنالیزهای زیادی در دنیا واقع شده این مهم هم با در نظرگیری انواع روش تولید سوخت هیدروژن می تواند در کارهای بعدی مورد بررسی قرار بگیرد.

## سپاسگزاری

این تحقیق در مرکز توسـعه فناوری خودروبرقی پژوهشـگاه نیرو و تحت حمایت مالی آن مرکز انجام شـده اسـت که به این وسـیله مراتب قدردانی از آن به عمل می‌آید.

## منابع

[۱] ترازنامه هیدروکربوری- وزارت نفت-۱۳۹۴

[۲] ترازنامه انرژی ۱۳۹۶

[۳] Qun Wang, Mianqiang Xue, Bin-Le Lin, Zhongfang Lei, Zhenya Zhang “Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutant emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China” ELSEVIOR ۲۰۲۰

[٤] Richard Schmuch, Ralf Wagner, Gerhard Hörpel, Tobias Placke & Martin Winter “Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries” Nature Energy volume ۳, pages۲٦۷–۲۷۸ (۲۰۱۸)

[٥] Transportation Cost and Benefit Analysis II – Air Pollution Costs Victoria Transport Policy Institute (www.vtpi.org) - ۲۰۲۰

[٦] Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, ۲۰۱۳ : Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In : Climate Change ۲۰۱۳

[۷] https://gmobility.eu/what-is-well-to-wheel/ ۲۰۱۹

[۸] A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions : Primary energy consumption, CO۲ emissions, and economic cost” ELSEVIOR ۲۰۱٦

[۹] https://kitset.ir/conversion/energy-converter/barrel-of-oile-quivalent-us-to-gigajoule#input-content

[۱۰]نوید کلانتری، علی یزدی‌زاده، نو شین سعادت‌خواه، "تجزیه و تحلیل چرخه عمرچاه تا چرخ در بخش حمل و نقل ایران، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، ۱۳۹۲

[۱۱]Mia Romare, Lisbeth Dahllöf, IVL Swedish Environmental Research Institute “The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries” , IVL Swedish Environmental Research Institute ۲۰۱۷

[۱۲]اطلاعات حمل و نقل و انرژی کشور "سال ۱۳۹۰"، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی.

[۱۳] H. Farzaneh, J. A. Puppim de Oliveira, B. McLellan and H. Ohgaki, “Towards a Low Emission Transport System : Evaluating the Public Health and Environmental Benefits”, Energies, ۲۰۱۹.

[۱۴]" هزینه اجتماعی آلاینده های منتشر شده توسط انواع خودرو" اولیا خلعتبری، مرکز توسعه فناوری خودروهای برقی، پژوهشگاه نیرو ۱٤۰۱