بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق

گروه قدرت

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق- قدرت

گرایش سیستم‌های قدرت

عنوان:

مدل‌سازی فنی- اقتصادی رویکردهای تشویقی استفاده از خودروهای الکتریکی و تأثیر آن بر روی توان الکتریکی موردنیاز

دانشجو:

سید احمد موسوی

استاد راهنما:

دکتر محسن اصیلی

استاد مشاور:

دکتر علی دهقانی

۱۳۹۳

شماره : ۱۲۵۵/آ.ت.ب
تاریخ : ۹۳/۱۱/۲۰
ویرایش : ــــــ

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

سید احمد موسوی رشته : **بـــرق – قدرت** گرایش : **سیستمهای قدرت**

تحت عنوان : **مدلسازی فنی – اقتصادی رویکردهای تشویقی استفاده از خودروهای الکتریکی و تأثیر آن بر روی توان الکتریکی مورد نیاز**

که در تاریخ **۹۳/۱۱/۲۸** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹/۳۹) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹) ۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)

۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶) ۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضـــاء
۱ـ استاد راهنما محسن اصیل	محسن اصیل	استادیار	
۲ـ استاد مشاور	[illegible]	[illegible]	
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	[illegible]	[illegible]	
۴ـ استاد ممتحن	[illegible]	[illegible]	
۵ـ استاد ممتحن	مرتضی رحیمیان	استادیار	

رئیس دانشکده :

تقدیم به:

چشمه های جوشان محبت

جلوه های مهر و عطوفت الهی

لبخندهای پر مهر زندگیم

پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی، به من راه و رسم درست زیستن را آموختند.

تقدیر و تشکر:

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. اینجانب بر خود لازم می‌دانم در این چند خط محدود از تلاش‌ها و زحمات اساتید راهنما و مشاور گرامی، آقایان دکتر محسن اصیلی و دکتر علی دهقانی، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم که در مسیر انجام این پایان‌نامه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند.

تعهد نامه

اینجانب **سید احمد موسوی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/ قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **مدل‌سازی فنی-اقتصادی رویکردهای تشویقی استفاده از خودروهای الکتریکی و تأثیر آن بر روی توان الکتریکی موردنیاز** تحت راهنمایی دکتر محسن اصیلی و مشاوره‌ی دکتر علی دهقانی متعهد می‌شوم .

- **تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .**
- **در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .**
- **مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می گردد.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .**

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.**

چکیده فارسی

با افزایش نگرانی‌ها درباره‌ی مشکلات زیست‌محیطی و منابع انرژی، بحث‌های زیادی در مورد چگونگی غلبه بر مشکلاتی مانند گرم شدن زمین، آلودگی هوا و منابع محدود سوخت‌های فسیلی، به وجود آمده است. در سال‌های اخیر، استفاده از خودروهای الکتریکی در بخش حمل‌ونقل به‌عنوان راه‌حلی برای این مشکلات موردتوجه قرار گرفته است. در این پایان‌نامه، عوامل اثرگذار بر فروش خودروهای الکتریکی معرفی می‌شود و به کمک روش دینامیک سیستم، یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی برای بررسی و تجزیه‌وتحلیل فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی پیشنهاد می‌گردد. مدل ارائه‌شده، با در نظر گرفتن عوامل اجتماعی- اقتصادی، تکنولوژیکی و تعامل آن‌ها با یکدیگر، فروش خودروهای الکتریکی را برای سه دهه‌ی آینده پیش‌بینی می‌نماید. به‌علاوه، اثرات استفاده از خودروهای الکتریکی بر بخش انرژی و محیط زیست ارزیابی می‌گردد. در پایان با شناخت عواملی که قدرت تأثیرگذاری بیش‌تری بر فروش خودروهای الکتریکی دارند، چند رویکرد تشویقی برای افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی موردبررسی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: خودروهای الکتریکی، دینامیک سیستم، انتشار خودروهای الکتریکی، گازهای گلخانه‌ای و آلاینده، توان الکتریکی.

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه ۱

۱-۱ انگیزه‌های تحقیق ۲

۱-۲ تعریف مسئله و اهداف تحقیق ۵

فصل دوم- مروری بر ادبیات موضوع ۱۱

۲-۱مقدمه ۱۲

۲-۲ مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی ۱۲

۲-۲-۱مدل عامل محور ۱۲

۲-۲-۲ مدل انتخاب مصرف‌کنندگان ۱۳

۲-۲-۳ مدل سری‌های زمانی و نرخ انتشار ۱۴

۲-۳ روش های شبیه‌سازی دینامیکی ۱۵

۲-۳-۱ رویکرد مدل‌سازی دینامیک سیستم ۱۳

۲-۳-۲ رویکرد مدل‌سازی عامل محور ۱۷

۲-۴جمع‌بندی ۱۹

فصل سوم- توصیف مدل ۲۱

۳-۱ مقدمه ۲۲

۳-۲ توصیف مدل ۲۲

۳-۲-۱ بخش ناوگان خودروها ۲۷

۳-۲-۲ بخش بازار خودرو ۳۰

۳-۲-۳ بخش جذابیت خودروها ۳۱
۳-۲-۴ بخش آشنایی مشتریان ۳۷
۳-۲-۵ بخش زیرساخت‌ها ۴۰
۳-۲-۶ تخمین پارامترها و مفروضات ۴۳
۳-۳ اثرات خودروهای الکتریکی ۴۹
۳-۳-۱ اثر خودروهای الکتریکی بر بخش انرژی ۴۹
۳-۳-۲ اثرات زیست‌محیطی خودروهای الکتریکی ۵۰
۳-۴ جمع‌بندی ۵۴
فصل چهارم- عوامل مؤثر بر انتشار خودروهای الکتریکی و رویکردهای تشویقی ۵۵
۴-۱ مقدمه ۵۶
۴-۲ بررسی عوامل تأثیر گذار بر انتشار خودروهای الکتریکی ۵۶
۴-۲-۱ سناریو مبنا ۵۶
۴-۲-۲ توسعه‌ی تکنولوژیکی (سناریو ۱) ۶۳
۴-۲-۳ قیمت سوخت (سناریو ۲) ۶۶
۴-۲-۴ زیرساخت‌ها (سناریو ۳) ۶۸
۴-۲-۵ عرضه یک نوع خودرو الکتریکی به بازار (سناریو ۴) ۹۷
۴-۲-۶ تبلیغات دهان‌به‌دهان (سناریو ۵) ۷۰
۴-۲-۷ بازاریابی (سناریو۶) ۷۲
۴-۲-۸ مرور سناریوها ۷۳

۴-۳ سیاست‌های تشویقی ۷۵

۴-۳-۱ پرداخت یارانه خرید خودرو (سیاست ۱) ۷۵

۴-۳-۲ افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ (سیاست ۲) ۷۷

۴-۳-۳ استفاده از مفهوم اثرات خارجی (سیاست ۳) ۷۹

۴-۴ جمع‌بندی ۸۲

فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۳

۵-۱ نتیجه‌گیری ۸۴

۵-۲ پیشنهادات ۸۵

ضمیمه آ- معرفی اجمالی دینامیک سیستم و روش مدل‌سازی آن به کمک نرم‌افزار ونسیم ۸۷

منابع ۹۰

فهرست جداول

جدول ۳-۱: ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده برای بنزین و برق ۵۲

جدول ۳-۲: هزینه‌های اجتماعی انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به قیمت‌های سال ۸۱ ..... ۵۳

جدول ۳: مقایسه‌ی سناریوها ۷۴

جدول ۴: نتایج سیاست پرداخت یارانه خرید خودرو در سال ۱۴۲۳ ..... ۷۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱: مروری بر بخش‌های مدل و رابطه‌ی بین آنها ۲۳

شکل ۳-۲: نمودار علّی حلقوی ساده شده ۲۴

شکل ۳-۳: نمودار انباشت- جریان ساده‌شده‌ی بخش ناوگان خودرو ۲۸

شکل ۳-۴: نمودار ساده‌شده‌ی بخش جذابیت خودروها ۳۲

شکل ۳-۵: نمودار ساده شده جریان- انباشت بخش آشنایی مشتریان ۳۸

شکل ۳-۶: نمودار انباشت- جریان ساده شده بخش زیرساخت ها ۴۲

شکل ۳-۷: سرانه خودرو ۴۵

شکل ۳-۸: پیش‌بینی جمعیت تهران ۴۵

شکل ۳-۹: تابع تأثیر زیرساخت بر مطلوبیت زمانی BEV ۴۶

شکل ۴-۱: قیمت خرید انواع خودرو در سناریو مبنا ۵۷

شکل ۴-۲: قیمت سوخت انواع خودرو به ازای هر کیلومتر در سناریو مبنا ۵۷

شکل ۴-۳: زمان سوخت‌گیری انواع خودور در سناریو مبنا ۵۷

شکل ۴-۴: دامنه‌ی رانندگی انواع خودرو در سناریو مبنا ۵۸

شکل ۴-۵: تعداد ایستگاهای شارژ در سناریو مبنا ۵۹

شکل ۴-۶: تمایل به در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی در سناریو مبنا ۵۹

شکل ۴-۷: تعداد کل انواع خودرو در سناریو مبنا ۶۰

شکل ۴-۸: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو مبنا ۶۰

شکل ۴-۹: توان الکتریکی افزوده‌شده به شبکه‌ی برق در سناریو مبنا ۶۱

شکل ۴-۱۰: کاهش مصرف بنزین در سناریو مبنا ۶۱

شکل ۴-۱۱: درصد کاهش انتشار CO_2 در سناریو مبنا ۶۲

شکل ۴-۱۲: کاهش هزینه‌های اجتماعی در سناریو مبنا ۶۲

شکل ۴-۱۳: تعداد کل انواع خودرو در سناریو ۱-۱ ..... ۶۳

شکل ۴-۱۴: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو ۱-۱ ..... ۶۴

شکل ۴-۱۵: قیمت خرید BEV در سناریو ۱-۲ ..... ۶۴

شکل ۴-۱۶: دامنه‌ی رانندگی BEV در سناریو ۱-۲..... ۶۵
شکل ۴-۱۷: زمان سوخت‌گیری BEV در سناریو ۱-۲..... ۶۵
شکل ۴-۱۸: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو ۱-۲ ..... ۶۶
شکل ۴-۱۹: قیمت سوخت انواع خودرو در سناریو ۲..... ۶۷
شکل ۴-۲۰: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو ۲ ..... ۶۷
شکل ۴-۲۱: سهم بازار BEV از فروش در سناریو ۳..... ۶۸
شکل ۴-۲۲: سهم بازار CV و HEV از فروش در سناریو ۴ ..... ۶۹
شکل ۴-۲۳: کاهش انتشار CO_2 در سناریو ۴ ..... ۶۹
شکل ۴-۲۴: سهم بازار خودروهای الکتریکی از فروش در سناریو ۵-۱..... ۷۱
شکل ۴-۲۵: سهم بازار خودروهای الکتریکی از فروش در سناریو ۵-۲..... ۷۱
شکل ۴-۲۶: سهم بازار BEV از فروش در سناریو ۶-۱..... ۷۲
شکل ۴-۲۷: سهم بازار HEV از فروش در سناریو ۶-۲ ..... ۷۳
شکل ۴-۲۸: تعداد کل خودروها در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ ۷۸
شکل ۴-۲۹: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ ۷۸
شکل ۴-۳۰: توان الکتریکی موردنیاز در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ ۷۸
شکل ۴-۳۱: کاهش هزینه‌های اجتماعی در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ ۷۹
شکل ۴-۳۲: تعداد کل خودروها در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی ۸۰
شکل ۴-۳۳: سهم انواع خودرو از فروش سالانه در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی..... ۸۱
شکل ۴-۳۴: کاهش هزینه‌های اجتماعی در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی ۸۱
شکل ۴-۳۵: توان الکتریکی موردنیاز در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی..... ۸۱
شکل آ-۱: نمودار علّی حلقوی مدل جمعیت..... ۸۸
شکل آ-۲: نمودار انباشت- جریان مدل جمعیت..... ۸۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱ انگیزه‌های تحقیق

امروزه در سراسر جهان وسایل نقلیه‌ای که توسط موتورهای درون‌سوز به حرکت درمی‌آیند، نقشی اساسی در صنعت حمل‌ونقل زمینی ایفا می‌کنند. صنعت حمل‌ونقل منبع تولید مقدار زیادی از گازهای گلخانه‌ای و آلاینده است. به همین دلیل، به نظر می‌رسد که وسایل نقلیه‌ی درون‌سوز[۱] یکی از عوامل اصلی آلوده‌کننده هوا باشد. خودروهای درون‌سوز از فرآورده‌های نفتی استفاده می‌کنند که باعث افزایش سطح CO_2 و دیگر آلاینده‌ها در هوا می‌شود. CO_2 یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که با مصرف سوخت‌های فسیلی وارد اتمسفر می‌شود و در طول قرن اخیر باعث گرم شدن زمین و تغییرات آب‌وهوا شده است. طبق گزارش سال ۲۰۱۳ سازمان بین‌المللی انرژی[۲]، حدود ۶۶٪ از CO_2 جهان در سال ۲۰۱۱ توسط دو بخش تولید گرما و الکتریسیته با ۴۲٪ و حمل نقل با ۲۲٪ تولید می‌شود. همچنین بر اساس چشم‌انداز انرژی جهان[۳] پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۵ تقاضای سوخت برای بخش حمل‌ونقل ۴۰٪ رشد داشته باشد [۱]؛ بنابراین برای محدود کردن انتشارات ناشی از این بخش، سیاست‌گذاران نیازمند به اجرا گذاشتن اقدامات تشویقی و بهبود بازده این بخش هستند.

نفت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی، ۳۲٪ از عرضه‌ی انرژی اولیه جهان و ۹۵٪ از کل سوخت بخش حمل‌ونقل را تأمین می‌کند [۱ و ۲]. در این شرایط، کمبود عرضه نفت چالشی جدی برای بخش حمل‌ونقل که به‌شدت به نفت وابسته است، ایجاد خواهد کرد. عدم تأمین تقاضا، افزایش شدید قیمت سوخت و بازار سیاه نفت ازجمله‌ی این چالش‌ها است.

با ظهور نگرانی‌های مربوط به محیط زیست و منابع انرژی، بحث‌های زیادی در مورد چگونگی غلبه بر مشکلاتی مانند گرم شدن زمین، آلودگی هوا و نفت محدود، به وجود آمده است. یکی از گزینه‌ها برای حل این مسائل، جایگزینی وسایل نقلیه درون‌سوز با وسایل نقلیه‌ای است که از سوخت

---

[۱] Internal Combustion Engines

[۲] International Energy Agency

[۳] World Energy Outlook

جایگزین استفاده می‌کنند. وسایل نقلیه با سوخت جایگزین[۱] (AFVs)، وسایل نقلیه‌ای هستند که از سوختی غیر از فرآورده‌های نفتی مانند گازوئیل یا بنزین استفاده می‌کنند. ازجمله‌ی سوخت‌های جایگزین می‌توان به برق، گاز طبیعی فشرده، هیدروژن، گاز مایع و برخی مواد بیولوژیک مانند روغن سویا یا سبزی‌ها اشاره کرد. در مقایسه با AFVs دیگر، خودروهای الکتریکی[۲] (EVs) با توجه به هزینه‌ی سوخت، در دسترس بودن سوخت، تکنولوژی و بازده بالاتر، گزینه‌ی مناسب‌تری به نظر می‌رسند.

در ایران، بخش حمل‌ونقل ۲۳٪ از کل CO_2 کشور را تولید می‌کند که بعد از بخش نیروگاه‌ها با ۳۱٪، بیش‌ترین سهم را دارد [۳]. به‌طور مشابه در ایران نیز به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و آلودگی شهرهای بزرگ، علاقه به خودروهای الکتریکی از سوی دولت افزایش پیدا کرده است؛ بنابراین در این پایان‌نامه از میان انواع AFVs، تمرکز بر خودروهای الکتریکی خواهد بود.

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری درزمینه‌ی اهمیت و مزایای استفاده از خودروهای الکتریکی انجام گرفته است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، بخش حمل‌ونقل حدود ۲۲٪ از CO_2 کل را در جهان تولید می‌کند؛ بنابراین سطح انتشار CO_2 را می‌توان با افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی به‌صورت مؤثر کاهش داد. نتایج پژوهشی که توسط آزمایشگاه ملی آرگون[۳] انجام گرفته است، نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از خودروهای الکتریکی انتشار CO_2 را در بخش حمل‌ونقل ۲۶ تا ۶۴ درصد کاهش داد. علت تغییرات زیاد در نتایج، ناشی از تفاوت در روش تولید الکتریسیته، زمان شارژ روزانه خودروهای الکتریکی باتری‌دار[۴] (BEV) و موقعیت جغرافیایی است [۴]. همچنین

[۱] Alternative Fuel Vehicles
[۲] Electric Vehicles
[۳] Argonne National Laboratory
[۴] Battery Electric Vehicles

خودروهای الکتریکی هیبریدی[1] (HEV) نسبت به خودروهای معمولی[2] (CVs) حدوداً ۲۸٪ انتشار کم‌تری دارند [۵]. علاوه بر این بسیاری از مطالعات دیگر تأییدکننده‌ی اثرات مثبت خودروهای الکتریکی می‌باشند [۵-۱۰]. ازجمله‌ی این مزایا می‌توان به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش مصرف سوخت بخش حمل‌ونقل و درنتیجه کاهش وابستگی به نفت و صرفه‌جویی در هزینه‌های بلندمدت به دلیل بازده بالاتر اشاره کرد. همچنین، محیط زیست پاک‌تر و ساکت‌تری که BEV در مقایسه با CVs فراهم می‌کنند، یکی دیگر از مزایای مهم خودروهای الکتریکی است.

اگرچه به نظر می‌رسد خودروهای الکتریکی راه‌حلی بالقوه برای مشکلات زیست‌محیطی و امنیت انرژی باشد، اما نفوذ آن‌ها به بازار با موانع اقتصادی، فنی و اجتماعی زیادی روبه‌رو است. قیمت بالای باتری و درنتیجه خودرو، تکنولوژی باتری خام و ناقص و همچنین زیرساخت‌های ناکافی برای خودروهای الکتریکی ازجمله موانع اقتصادی و فنی اصلی هستند. موانع اجتماعی را می‌توان عدم آگاهی عمومی درباره‌ی خودروهای الکتریکی و دشواری‌های مربوط به پذیرش یک تکنولوژی جدید برشمرد. برای رفع این موانع، تحقیق و توسعه درباره‌ی خودروهای الکتریکی به‌منظور رفع نواقص آن در سراسر جهان در حال انجام است. از طرف دیگر، دولت‌ها، سیاست‌های قانونی متنوعی را برای کمک به نفوذ خودروهای الکتریکی به بازار در نظر گرفته‌اند و راهبردهای بازاریابی مختلفی را برای بالا بردن سطح آگاهی‌های عمومی در مورد خودروهای الکتریکی اتخاذ کرده‌اند.

در ایران برای رفع موانع استفاده از خودروهای الکتریکی، دولت تعرفه‌ی صفر را برای واردات و استفاده‌ی آن‌ها در کلان‌شهرها در نظر گرفته است. به‌علاوه در تهران بنا بر گفته‌های معاون حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری، سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت حمایت از جایگزینی تاکسی‌های موجود با HEV را در دستور کار قرار داده است.

[1] Hybrid Electric Vehicles

[2] Conventional Vehicles

درنتیجه، مطالعات فوق نشان می‌دهد که خودروهای الکتریکی راهی مهم و در دسترس برای رفع نگرانی‌های مربوط به محیط زیست و انرژی است. بااین‌حال، موانع اقتصادی، فنی و اجتماعی بسیاری در مقابل این تکنولوژی قرار دارد که نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد؛ بنابراین باید تحقیق و توسعه درباره‌ی تکنولوژی خودروهای الکتریکی انجام پذیرد و سیاست‌های قانونی جدید برای آن‌ها در نظر گرفته شود تا پذیرش خودروهای الکتریکی را توسط مشتریان سرعت بخشد. با توجه به این مسائل، در این پژوهش با در نظر گرفتن تمام مزایا و موانع موجود، فرایند نفوذ خودروهای الکتریکی موردبررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲ تعریف مسئله و اهداف تحقیق

اگرچه مزایای فراوان خودروهای الکتریکی از پیشنهاد افزایش نفوذ آن‌ها به بازار خودرو حمایت می‌کند، ولی در حال حاضر شانس این خودروها برای داشتن سهمی قابل‌توجه در بازار، حتی در بلندمدت، در مقایسه با خودروهای معمولی کمتر است. خودروهای الکتریکی در آغاز قرن بیستم در رقابت با خودروهای درون‌سوز با شکست مواجه شدند؛ بنابراین برای نفوذ موفق آن‌ها به بازار، درک چگونگی تأثیر عوامل اثرگذار بر فرآیند پذیرش خودروهای الکتریکی دارای اهمیت است.

همان‌طور که راجرز[۱] [۱۱] بیان کرده است، «انتشار[۲] فرآیندی است که طی آن، یک نوآوری[۳] در طول زمان از طریق کانال‌های مشخص، در میان اعضای سیستم اجتماعی انتقال می‌یابد». نفوذ خودروهای الکتریکی نیز در حوزه‌ی انتشار نوآوری است. مدل‌های انتشار نوآوری در مورد خودروهای الکتریکی با هدف کسب بینش در مورد چگونگی آغاز دوره‌ی رشد این خودروها در بازار گسترش و توسعه یافته‌اند. بااین‌حال، تجزیه‌وتحلیل مسئله انتشار خودروهای الکتریکی به علت عدم قطعیت‌هایی

[۱] Rogers
[۲] Diffusion
[۳] Innovation

که تکنولوژی جدید به ارمغان می‌آورد، دشـــوار اســـت. این عدم قطعیت‌ها که در درجات مختلف در فرآیند انتشار وجود دارد، می‌تواند رفتاری یا تکنولوژیکی باشد و انتشار نوآوری را تحت تأثیر قرار دهد. به‌علاوه تعاملات نامشـخصـی بین عوامل اثرگذار بر فرآیند تقاضـا وجود دارد. عدم قطعیت‌ها در مورد خودروهای الکتریکی ممکن اســت مســتقیماً به خود آن‌ها مربوط باشــد مانند ارزش آینده‌ی هزینه، عملکرد و دامنه خودرو و یا غیرمســتقیم به آن‌ها مربوط باشــد مانند هزینه‌ی ســوخت‌های نفتی در آینده، یارانه‌ها و اولویت‌های مصــرف‌کنندگان. به‌علاوه بازخوردهای مثبت و منفی با جنبه‌های مختلف مانند تبلیغات اجتماعی، زیرساخت‌ها، توسعه و پیشرفت تکنولوژی در دینامیک تقاضای وسایل نقلیه با سوخت جایگزین وجود دارد [۱۲].

چنانچه متغیرهای اثرگذار بر انتشـــار خودروهای الکتریکی و تعامل آن‌ها با یکدیگر با در نظر گرفتن عـدم قطعیـت‌ها و با جزئیات موردبررســـی قرار گیرد، کمک زیادی به درک الگوهای احتمالی انتشـــار خودروهـای الکتریکی و محدوده‌ی آن می‌کند. به‌علاوه این بررســـی به درک این‌که چگونه متغیرها و تعامل میان آن‌ها بر رفتار دینامیک انتشار تأثیر می‌گذارد، نیز کمک می‌کند. این بررسی به شناخت عوامل بی‌اثر یا عواملی که باعث تضعیف یا تقویت انتشار خودروهای الکتریکی می‌شود، کمک می‌نمـایـد. بعـد از تعیین این عوامـل، می‌توان عوامل تضـــعیف‌کننده را رفع کرد و یا تأثیر آن‌ها را با ســیاســت‌های مناســب در جهت حمایت از انتشــار خودروهای الکتریکی، کاهش داد. برعکس، عوامل سودمند را نیز می‌توان برای تسریع فرآیند تقاضا تقویت نمود.

انتشــار خودروهای الکتریکی پروژه‌ای جامع و بزرگ اســت که دولت، بخش‌های خصــوصــی و عمومی، دانشـگاه‌ها و رانندگان را شـامل می‌شـود. این پروژه اسـاساً در مورد زیرساخت‌ها، برنامه‌ریزی ســرمایه‌گذاری، تحقیق و توســعه و پروژه‌های بازاریابی اســت. تجزیه‌وتحلیل و درک عوامل اثرگذار بر رفتار دینامیکی انتشار خودروهای الکتریکی به بسط و توسعه‌ی سیاست‌های قوی و کارآمد برای انتشار آن‌ها کمک می‌کند.

لازم به ذکر است که الگوهای دینامیکی فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی به دلیل تغییرات جمعیت، نیازهای بخش حمل‌ونقل و اولویت‌های مصرف‌کنندگان در نواحی مختلف، متفاوت است. پروژه‌های امکان‌سنجی، برنامه‌ریزی زیرساخت و برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری معمولاً در مورد یک شهر آزمایشی انجام می‌گیرد؛ بنابراین انتخاب شهر مناسب برای ارائه‌ی تجزیه‌وتحلیل بهتر اهمیت دارد. در ایران، تهران به دو دلیل بهترین شهر برای انتشار خودروهای الکتریکی است. اول، تهران پرجمعیت‌ترین شهر در ایران است. همچنین تعداد خودروهای این شهر نیز بیش‌تر از شهرهای دیگر است. به‌عبارت‌دیگر حمل‌ونقل در تهران نسبت به سایر شهرها باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ی بیش‌تری می‌شود. دوم، تهران به دلیل تنوع در مشتریان و تعداد زیاد آن‌ها بازاری مناسب برای خودروهای الکتریکی است؛ بنابراین عاقلانه‌تر است که پروژه‌ی انتشار خودروهای الکتریکی در تهران انجام پذیرد؛ زیرا مقدار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده (به دلیل جایگزینی CVs با خودروهای الکتریکی) با تعداد مشتریان بالقوه‌ای که در تهران برای خودروهای الکتریکی وجود دارد، متناسب است.

یکی از اهداف اصلی این مطالعه پاسخ به این سؤال است که الگوهای محتمل انتشار خودروهای الکتریکی برای تهران تحت سناریوهای مختلف چه هستند؟ این سناریوها با توجه به عوامل اجتماعی- اقتصادی، دولتی، تکنولوژیکی و تعامل آن‌ها با یکدیگر توسعه داده شده‌اند. (سؤال ۱)

برای پاسخ به این سؤال بزرگ، باید آن را به چند سؤال کوچک‌تر که مستقیماً به هم مرتبط هستند، تقسیم کرد. در درجه‌ی اول باید فهمید که کدام متغیرهای تکنولوژیکی، اقتصادی- اجتماعی و دولتی و تعاملات آن‌ها با یکدیگر بر تقاضای خودروهای الکتریکی تأثیرگذارند؟ (سؤال ۱-۱) پاسخ به این سؤال، متغیرهایی را که تأثیرگذاری قابل‌توجه و یا کمی بر انتشار خودروهای الکتریکی دارند را مشخص خواهد کرد. در مرحله‌ی بعد، سعی بر پاسخ به این سؤال است که متغیرهای فوق و حلقه‌های بازخوردی بین آن‌ها به چه مقدار و در چه جهتی فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی را تحت تأثیر قرار

می‌دهند؟ (سؤال ۱-۲) پاسخ به این سؤال به درک این‌که کدام متغیرها و تعاملات میان آن‌ها چه نوع الگوی رفتاری دینامیکی را ایجاد می‌کند، کمک می‌نماید. به‌این‌ترتیب می‌توان متغیرهایی را که تأثیر نامطلوبی بر فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی دارند را شناسایی نمود و در صورت امکان آن‌ها را حذف کرد و یا کاهش داد. همچنین با پاسخ به سؤال دوم می‌توان متغیرهایی را که تأثیر مثبتی بر انتشار خودروهای الکتریکی دارند را تقویت و تسریع نمود.

پرداختن به سؤال ۱-۱ و ۱-۲ بینش و درک بهتری درباره‌ی فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی فراهم می‌آورد؛ بنابراین در این شرایط امکان پاسخ به سؤال سوم وجود دارد؛ مقدار مورد انتظار نرخ انتشار خودروهای الکتریکی برای تهران بعد از سه دهه چقدر است؟ (سؤال ۱-۳) هدف این سؤال تخمین نرخ انتشار تقریبی خودروهای الکتریکی تحت سناریوهای مختلف با توجه به پاسخ سؤال ۱-۱ و ۱-۲ و سیستم فعلی حمل‌ونقل در تهران است.

دومین هدف این پژوهش، پاسخ به این سؤال است که سیاست‌های امکان‌پذیری که برای افزایش نرخ انتشار خودروهای الکتریکی توصیه می‌شوند، چه هستند؟ (سؤال ۲) با مشاهده‌ی پاسخ سؤال ۱، می‌توان سیاست‌های جدیدی برای تسریع فرآیند انتشار و پذیرش خودروهای الکتریکی پیشنهاد داد. پاسخ به این سؤال به مقامات دولتی و تولیدکنندگان خودرو برای درک این‌که چگونه رفتار کنند یا چه اقداماتی انجام دهند تا فرآیند پذیرش خودروهای الکتریکی تسریع شود، کمک می‌کند.

ارزیابی اثرات خودروهای الکتریکی بر بخش انرژی و محیط زیست هدف پایانی این تحقیق است. به‌عنوان‌مثال، با افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی، انتظار داریم مصرف بنزین در بخش حمل‌ونقل کاهش و تقاضا برای توان الکتریکی افزایش پیدا کند؛ بنابراین برای استفاده از خودروهای الکتریکی، باید در اجرای سیاست‌های مختلف از توان الکتریکی موردنیاز آگاهی داشته باشیم تا زیرساخت‌های لازم جهت تأمین آن را فراهم نماییم.

لازم به ذکر اســت که به‌منظور پاســخ به ســؤالات فوق از مدل شبیه‌سازی دینامیکی استفاده می‌گردد. در فصل بعد روش‌های مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی و روش‌های مدل‌سازی دینامیکی انتشــار خودروهای الکتریکی بررســی می‌شــود. ســپس تعدادی از کارهای پژوهشــی در حوزه‌ی انتشار وســایل نقلیه با ســوخت جایگزین که رویکردی مشــابه دارند، ارائه می‌شــود. در فصل سوم، برای درک ســـــاختــار مدل، آن را به‌طور کامل شـــرح خواهیم داد و در فصـــل چهارم، مدل تحت ســـــناریوها و سیاست‌های مختلف شبیه‌سازی می‌شود و در انتها نتیجه‌ی این پژوهش ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی روش‌های مدل‌سازی فرآیند انتشار یک تکنولوژی جدید (در اینجا خودروهای الکتریکی) می‌پردازیم. پیش‌بینی سهم خودروهای الکتریکی از بازار در بخش خودروهای سایز متوسط به دلایل مختلف دشوار و پیچیده است. با توجه به اهمیت خودروهای الکتریکی، مدل‌های پیش‌بینی بازار آن‌ها نیز در سال‌های اخیر توسعه یافته است. این مدل‌ها با دربرداشتن پیچیدگی‌های موجود در فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی، نرخ نفوذ خودروهای الکتریکی به بازار را تخمین می‌زنند. از آنجا که تفاوت اصلی روش‌های بررسی فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی در شیوه‌ی مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی (قسمتی از مدل کلی) است، در ادامه ابتدا به بررسی روش‌های مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی می‌پردازیم. سپس با توجه به هدف تحقیق، روش‌های شبیه‌سازی مناسب شرح داده خواهد شد و مطالعات انجام‌شده در این حوزه‌ها مرور خواهد گردید.

۲-۲ مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی

از آنجا که تفاوت اصلی روش‌های مدل‌سازی فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی در شیوه‌ی مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی (قسمتی از مدل کلی) است، با توجه به روش مدل‌سازی مورداستفاده برای نمایش تعاملات با بازار، مدل‌های بازار خودروهای الکتریکی را می‌توان به سه گروه عمده تقسیم کرد. این سه مدل عبارت‌اند از: مدل‌های عامل محور[۱]، مدل‌های انتخاب مصرف‌کننده[۲] و مدل‌های سری زمانی و انتشار[۳] [۱۳]. در ادامه این رویکردها موردبررسی قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱ مدل عامل محور

مدل عامل محور در گروه مدل‌های محاسباتی قرار می‌گیرد. در این روش، یک سیستم

---

[۱] Agent-based models

[۲] Consumer choice models

[۳] Diffosion and time series models

به‌عنوان مجموعه‌ای از نهادها یا افراد مستقل به نام عامل در فضای مجازی مدل می‌شود. عامل‌ها را می‌توان به اشکال مختلفی از مدل‌های ساده تصمیم‌گیری تا شبکه عصبی، الگوریتم‌های تکاملی و تکنیک‌های یادگیری مدل‌سازی کرد. هر عامل به‌صورت جداگانه و در تعامل با عوامل دیگر، وضعیت خود را ارزیابی می‌کند و با توجه به قوانین موجود تصمیم‌گیری می‌کند. اخیراً مدل‌های عامل محور در حوزه‌های زیادی مانند زیست‌شناسی، تجارت، تکنولوژی، علوم کامپیوتری، اقتصاد و علوم اجتماعی مورداستفاده قرار گرفته است [۱۳ و ۱۴].

استفاده از رویکرد مدل‌سازی عامل محور مزایا و معایبی را به همراه دارد. از مزایای آن می‌توان به استفاده از مشخصات، دیدگاه‌ها، محدودیت‌ها و نیازهای فردی عوامل در شبیه‌سازی اشاره کرد. پیچیدگی مدل‌سازی عامل محور در مراحل مدل‌سازی، بررسی و اعتبارسنجی مدل نیز از معایب این رویکرد به شمار می‌رود [۱۳ و ۱۴].

۲-۲-۲ مدل انتخاب مصرف‌کنندگان

در مدل انتخاب مصرف‌کنندگان فرض بر این است که انتخاب افراد طی یک فرآیند تصمیم‌گیری منطقی صورت می‌گیرد. در این فرآیند، خریداران با توجه به ویژگی‌های انواع خودرو، با هدف دستیابی به بیش‌ترین مطلوبیت، دست به انتخاب می‌زنند. مطلوبیت در این روش تابعی از ویژگی‌های خودروها است. احتمال انتخاب هر خودرو به کمک تابع مطلوبیت، توسط مدل‌های انتخاب گسسته[۱] صورت می‌گیرد. لاجیت چندجمله‌ای[۲] (MNL) یکی از رایج‌ترین این مدل‌ها است. لاجیت چندجمله‌ای تودرتو نیز نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی لاجیت چندجمله‌ای می‌باشد که در مطالعات بسیاری مورداستفاده قرار گرفته است. در این روش گزینه‌های خرید، به چند گروه تقسیم می‌شوند. بعد از انتخاب گروه، خریداران مدل خودرو خود را از میان آن گروه انتخاب می‌نمایند. مدل‌های دیگری نیز

[۱] Disceret Choice Models

[۲] Multinomial Logit

برای انتخـاب مصـــرف‌کننـدگـان وجود دارد. ازجملـه‌ی این روش‌هـا می‌توان بـه مـدل‌هـای لاجیت چندجمله‌ای ترکیبی، پروبیت چندجمله‌ای[۱] و مقدار حدی تعمیم‌یافته[۲] اشـاره کرد. درنهایت با انتخاب یک روش انتخاب، خریداران خودرویی را انتخاب می‌کنند که مطلوبیت دریافتی خود را مشروط به قید بودجه، حداکثر نمایند [۱۳ و ۱۵].

مدل انتخاب مصرف‌کنندگان نسبت به مدل عامل محور از پیچیدگی کمتری برخوردار است؛ امـا توانـایی پیش‌بینی تقـاضـــا در آینـده را نـدارد و معمولاً در کنـار روش‌های دیگر برای پیش‌بینی مورداســـتفاده قرار می‌گیرد. این رویکرد به اطلاعات فروش در گذشـــته نیاز دارد که برای خودروهای الکتریکی، به دلیل جدید بودن تکنولوژی آن‌ها، این اطلاعات وجود ندارد. به همین دلیل، حسـاسـیت تصـمیم مشـتریان به ویژگی‌های خودروهای الکتریکی از روش‌هایی مانند فرضـیات، اظهارنامه‌ها و یا داده‌های نظرسنجی تعیین می‌شود [۱۳ و ۱۵].

۲-۲-۳ مدل سری‌های زمانی و نرخ انتشار

این مدل به بررسـی فرآیند انتشار یک محصول جدید در طول زمان می‌پردازد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، راجرز معتقد است که «انتشار فرآیندی است که طی آن، یک نوآوری از طریق کانال‌های مشخص، در طول زمان در میان اعضای سیستم اجتماعی انتقال می‌یابد». در همین زمینه راجرز چهار عـامل اثرگذار بر گســـترش یک محصـــول یا ایده‌ی جدید را معرفی می‌کند: خود نوآوری، کانال‌های ارتباطی، زمان و سـیسـتم اجتماعی. اکثر نوآوری‌ها در طول زمان منحنی نرخ پذیرش S شکلی دارند. شیب این منحنی برای نوآوری‌ها و سیستم‌های اجتماعی مختلف متفاوت است. مدل انتشار باس[۳] یکی از معروف‌ترین مدل‌های سـری‌های زمانی و نرخ انتشـار می‌باشـد که به‌طور گسترده مورداستفاده قرار

---

[۱] multinomial probit

[۲] Generalized extreme value

[۳] Bass diffusion Model

گرفته اســت. در این مدل، خریداران به دو گروه طبقه‌بندی می‌شــوند. گروه اول، نوآوران هســتند که تحت تأثیر عوامل خارجی مانند رسـانه‌ها اقدام به خرید می‌کنند و گروه دوم، مقلدها می‌باشـند که در اثر عوامل درونی مانند تبلیغات دهان‌به‌دهان برای خرید تصمیم‌گیری می‌نمایند [۱۳ و ۱۶].

مزیـت این روش را می‌توان پیاده‌ســازی آســان و امکان اســتفاده از اطلاعات گذشــته‌ی تکنولوژی‌های مشـابه برای تخمین مدل برشمرد. عدم قابلیت در نظر گرفتن متغیرهای خارجی (مانند اثر کـاهش قیمـت محصــول) و ناتوانی در مدل کردن رقابت بین تکنولوژی‌های مختلف نیز از معایب مدل سری‌های زمانی و نرخ انتشار هستند [۱۳ و ۱۶].

۲-۳ روش‌های شبیه‌سازی دینامیکی

همان‌طور که قبلاً بیان شـد، برای بررسی و تجزیه‌وتحلیل فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی از شـبیه‌سـازی دینامیکی در مدل‌سـازی اسـتفاده می‌شـود. در ادبیات موضوع، دو رویکرد مدل‌سازی متفاوت وجود دارد که از شـبیه‌سـازی دینامیکی اسـتفاده کرده اسـت، رویکرد مدل‌سـازی دینامیک سیستم و رویکرد مدل‌سازی عامل محور. این دو رویکرد و مطالعات انجام‌گرفته در حوزه‌ی آن‌ها را در ادامه مرور خواهیم کرد.

۲-۳-۱ رویکرد مدل‌سازی دینامیک سیستم

این رویکرد مدل‌سازی معمولاً برای تحلیل سیستم‌های اقتصادی– اجتماعی مورداستفاده قرار می‌گیرد و بر شـناسـایی روابط بین اجزا و فهم مسـیرهای دینامیکی در طول زمان تمرکز دارد. روش دینامیک سیستم بیش‌تر برای سیاست‌گذاران و قانون‌گذاران مناسب است تا به کمک آن بتوانند درک بهتری از نوع تصــمیمات خود و اثرات آن‌ها داشــته باشــند. ازآنجاکه انتشــار خودروهای الکتریکی مسـئله‌ای دینامیک، غیرخطی، پیچیده و بزرگ است که شامل حلقه‌های بازخوردی بسیاری می‌باشد، روش دینامیک سـیسـتم در مطالعات بسـیاری مورداسـتفاده قرار گرفته است. در ادامه مروری بر این

مطالعات صورت می‌گیرد.

مراجع [۱۲] و [۱۷] یک مدل دینامیک سیستم که روابط پیچیده‌ی بین مشتریان، خودروسازان و زیرساخت‌ها را توصیف می‌کند را پیشنهاد داده‌اند. مرجع [۱۲] به نقش آگاهی مشتریان درباره‌ی AFVs بر تمایل آن‌ها در خرید AFVs تأکید می‌کند و با توسعه‌ی مفهوم مدل انتشار باس، اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان و بازاریابی را بر افزایش آگاهی در نظر گرفته است. این مطالعه احتمال خرید مشتریان را به کمک مدل MNL و با استفاده از مطلوبیت و تمایل مشتریان به خرید AFVs محاسبه کرده است. در بخش خودروسازان، اثر بهبود تکنولوژی بر هزینه‌ی تولید خودرو و در بخش زیرساخت‌ها اثر توسعه‌ی ایستگاه‌های سوخت‌گیری به بحث گذاشته شده است.

مرجع [۱۸] با ایجاد یک مدل دینامیک سیستم، به بررسی آثار مستقیم و غیرمستقیم سیاست‌های حمایت از AFV بر انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته است. این مطالعه اولویت‌های مصرف‌کنندگان، تصمیمات تولیدکنندگان، دینامیک بازار خودرو و اثرات زیست‌محیطی را در نظر گرفته است. مرجع [۱۹] اثر بازخورد سهم بازار بر ویژگی‌های خودرو مانند قیمت و دسترسی به زیرساخت‌ها را با استفاده از مدل انتخاب گسسته و مدل انتشار باس در نظر گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عوامل خارجی مانند توسعه‌ی زیرساخت‌ها به نسبت توسعه‌ی تکنولوژی خودروها، تأثیر بیش‌تری بر افزایش سهم خودروهای الکتریکی و خودروهای پیل سوختی[۱] (HFCVs) از فروش دارد. مرجع [۲۰] یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی را برای پیش‌بینی نفوذ HFCVs در کره با استفاده از مدل انتشار باس تعمیم‌یافته، پیشنهاد داده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که خریداران اولیه (گروه نوآوران در مدل باس) و در دسترس بودن ایستگاه‌های سوخت‌گیری به نسبت قیمت تکنولوژی نقش بیش‌تری در نفوذ HFCVs به بازار دارد. مرجع [۲۱] یک مدل دینامیک

[۱] Hydrogen Fuel Cell Vehicles

سیستم را برای مطالعه‌ی جایگزینی HFCVs به کار گرفته است که شامل چهار جزء مشتریان، خودروسازان، ایستگاه‌های سوخت‌گیری و سیاست‌گذاران و تعامل میان آن‌ها می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با اختصاص یارانه، معافیت سوخت هیدروژن از مالیات و ایجاد زیرساخت‌های سوخت‌گیری مناسب، HFCVs دوسوم از خودروهای سواری را در آلمان تا سال ۲۰۵۰ تشکیل خواهند داد. مرجع [۲۲] مطالعه‌ای را بر روی اثرات سیستمی کالاهای مکمل، درزمینه‌ی HFCVs و زیرساخت‌های سوخت‌گیری هیدروژن، بر اساس روش دینامیک سیستم انجام داده است. این مطالعه با بسط چهار سناریوی سیاستی مختلف به این نتیجه رسیده است که برای موفقیت HFCVs، باید سیاست‌های تشویقی خرید HFCVs و توسعه‌ی زیرساخت‌ها به‌موازات هم انجام پذیرد. امکان توسعه‌ی حمل‌ونقل پایدار بر اساس HFCVs به کمک توسعه‌ی زیرساخت‌ها و یارانه‌ها در اروپا در مرجع [۲۳] و با به‌کارگیری مدل ASTRA[۱] بررسی شده است. مرجع [۲۴] با ترکیب مدل انتشار باس و انتخاب گسسته در فضای دینامیک سیستم، نرخ و زمان خرید خودروهای الکتریکی را در آلمان پیش‌بینی کرده است. مرجع [۲۵] به بررسی تأثیر قوانین حمایت از خودروهای پاک بر راهبردهای تولیدکنندگان پرداخته است. این مطالعه روی آوردن خودروسازان به تولید خودروهای پاک به‌منظور انطباق با قوانین را ضروری می‌داند. تأثیر موتورسیکلت‌های برقی بر انتشار CO_2 در تایوان در مرجع [۲۶] ارزیابی شده است.

۲-۳-۲ رویکرد مدل‌سازی عامل محور

مدل‌های عامل محور درزمینه‌ی پیش‌بینی تقاضای خودروهای الکتریکی در مطالعات بسیاری مورداستفاده قرار گرفته است. در این رویکرد، عوامل با توجه به دیدگاه محقق و این‌که بیانگر کدام بخش از سیستم هستند، رفتارهای مختلفی را به نمایش می‌گذارند و می‌توانند خریداران خودرو، خودروسازان، سیاست‌گذاران بخش انرژی و ... باشند. در ادامه مطالعاتی که از رویکرد مدل‌سازی عامل

[۱] Assessment of Transport Strategies

محور استفاده کرده‌اند، مرور می‌شود.

مرجع [۲۷] بـا اســـتفـاده از یک مدل عامل محور و با ترکیب رفتارهای فردی عامل و اثرات شـــبکه‌ی اجتماعی، به بررســـی رفتار خریداران AFVs پرداخته اســـت. رفتار فردی عامل بر اســـاس ویژگی‌هایی چون قیمت خرید، قیمت ســـوخت، مصـــرف ســـوخت، عملکرد، دامنه، انتشـــار گازهای گلخانه‌ای و دسـترسـی به سوخت خودروها صورت می‌گیرد. اثرات سیستم اجتماعی در این مطالعه بر اساس مدل انتشار نوآوری باس مدل‌سازی شده است. یک مدل عامل محور چندگانه برای شبیه‌سازی دینامیکی فرآیند انتقال از CVs به AFVs در مرجع [۲۸] پیشـنهاد شده است. نتایج این مطالعه بیان می‌کند که برای خرید عمده‌ی AFVs، قیمت آن حداکثر باید با قیمت CVs برابر باشـد. تفاوت قیمت سـوخت خودروها، اطلاع‌رسـانی، جاویژه‌بازار[۱] جداگانه و سـیاست‌های پایدار نیز سایر عوامل اثرگذار بر فروش AFVs اســت. در مرجع [۱۰] با مدل‌ســازی عامل محور که شـــامل دو عامل تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان خودروها است، به بررسی اثر سیاست‌های کاهش CO_2 بر بازار خودروها می‌پردازد. این مطـالعـه دو نوع خودرو ICEV و BEV و چهـار ویژگی آن‌ها شـــامل هزینه‌ی تولید، بهره‌وری انرژی، ظرفیت انرژی و سـطح کیفی خودروها را در نظر گرفته است. مرجع [۲۹] یک مدل شبیه‌سازی عامل محور را به کار گرفته اسـت تا اثر سیاست‌های اثرگذار بر فرآیند انتخاب یک خودرو جدید توسط افراد را ارزیابی نماید. این مطالعه از یک فرآیند دومرحله‌ای در فرآیند تصمیم‌گیری استفاده کرده است تا دو نگرش شـــهودی و اســـتدلالی در تصـــمیم‌گیری را منعکس نماید. در مرحله‌ی اول مجموعه‌ی انتخابی ایجاد می‌شـــود و در مرحله‌ی دوم، از بین این مجموعه با اســـتفاده از مدل MNL انتخاب صـــورت می‌گیرد. مرجع [۳۰] بـا ارائه‌ی یک مدل عامل محور چندگانه، توزیع مالکیت PHEV[۲] را در ســـطح سـاکنین محلی مدل کرده اسـت تا مناطقی را که احتمالاً مالکیت PHEV با سرعت بیش‌تری افزایش

[۱] Niche market

بخش حاشیه‌ای کوچکی از بازار است که بر روی یک نیاز ویژه یا یک کالای ویژه متمرکز شده است.

[۲] Plug-in Hybrid Electric Vehicle

می‌یابد، شناسایی کند. سپس با شناسایی این نواحی، اثر افزایش تعداد PHEV را بر شبکه‌ی توزیع برق، با راهبردهای شارژ مختلف، بررسی نموده است. در مرجع [۳۱] با ارائه‌ی یک مدل عامل محور، اثر راهبرهای مختلف توسعه‌ی زیرساخت‌ها بر انتشار HFCVs را مطالعه کرده است. الگوهای انتشار در اثر تعامل مشتریان، ایستگاه‌های سوخت‌گیری و بهبود تکنولوژی به وجود می‌آید. این مطالعه به اهمیت در نظر گرفتن اثرات سیستم‌های اجتماعی توسط سیاست‌گذاران تأکید دارد.

۲-۴ جمع‌بندی

در این فصل، روش‌های مدل‌سازی بازار خودروهای الکتریکی و انواع رویکردهای شبیه‌سازی دینامیکی فرآیند انتشار آن‌ها شرح داده شد و مطالعات انجام‌گرفته در این حوزه مرور گردید. در پرتو این مطالعات، متغیرهایی که باید در مدل برای تجزیه‌وتحلیل بهتر تقاضای خودروهای الکتریکی وجود داشته باشند، تقریباً مشخص شدند. طبق این مطالعات، خواص تکنولوژیکی به‌ویژه ظرفیت باتری، قیمت خرید خودرو، زیرساخت‌های سوخت‌گیری، هزینه‌ی بهره‌برداری و آگاهی مشتریان و همچنین مشوق‌های مالی جنبه‌های اصلی هستند که باید در مدل وجود داشته باشند.

لازم به ذکر است که اگرچه در نگاه اول ممکن است مطالعات فوق به هم شبیه باشند، اما از جهات مختلف با هم تفاوت دارند. اولاً منطقه‌ای که مدل‌ها بر اساس آن ساخته شده است، در هر مطالعه متفاوت است. به‌علاوه ساختار مدل و محدوده‌ی آن در هر مطالعه با دیگری متفاوت است. در این مطالعات، اکثر پارامترها، فرضیات، رابطه‌ی بین متغیرها و فرمولاسیون استفاده‌شده در مدل‌ها برای بازار خودرو در تهران مناسب نیستند. به‌علاوه مشخصات، انتظارات و اولویت‌های مشتریان، انواع در دسترس AFVs و قوانین در تهران با مناطقی که مطالعات فوق در آن صورت گرفته است، متفاوت است. همچنین انواع AFVs بررسی‌شده در هر مطالعه فرق می‌کند. پژوهش ما تأکید ویژه‌ای بر خودروهای الکتریکی دارد، درحالی‌که بعضی مطالعات دیگر ممکن است بر سایر خودروها مانند HFCVs تأکید کنند. درنتیجه، اگرچه پژوهش ما و این مطالعات زمینه‌ی مشترکی دارند، اما در اکثر

جهات با یکدیگر تفاوت دارند.

فصل سوم

توصیف مدل

۳-۱ مقدمه

در این فصل، با توجه به هدف تحقیق از روش دینامیک سیستم برای مدل‌سازی استفاده می‌کنیم. علت انتخاب این روش، ماهیت دینامیک و پیچیدگی فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی و همچنین وجود حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی فراوان در آن است. در ادامه ابتدا به شرح کامل مدل شبیه‌سازی‌شده می‌پردازیم. سپس، تغییرات ایجادشده در بخش انرژی و مزایای زیست‌محیطی که در اثر افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی ایجاد می‌شود را بررسی خواهیم نمود.

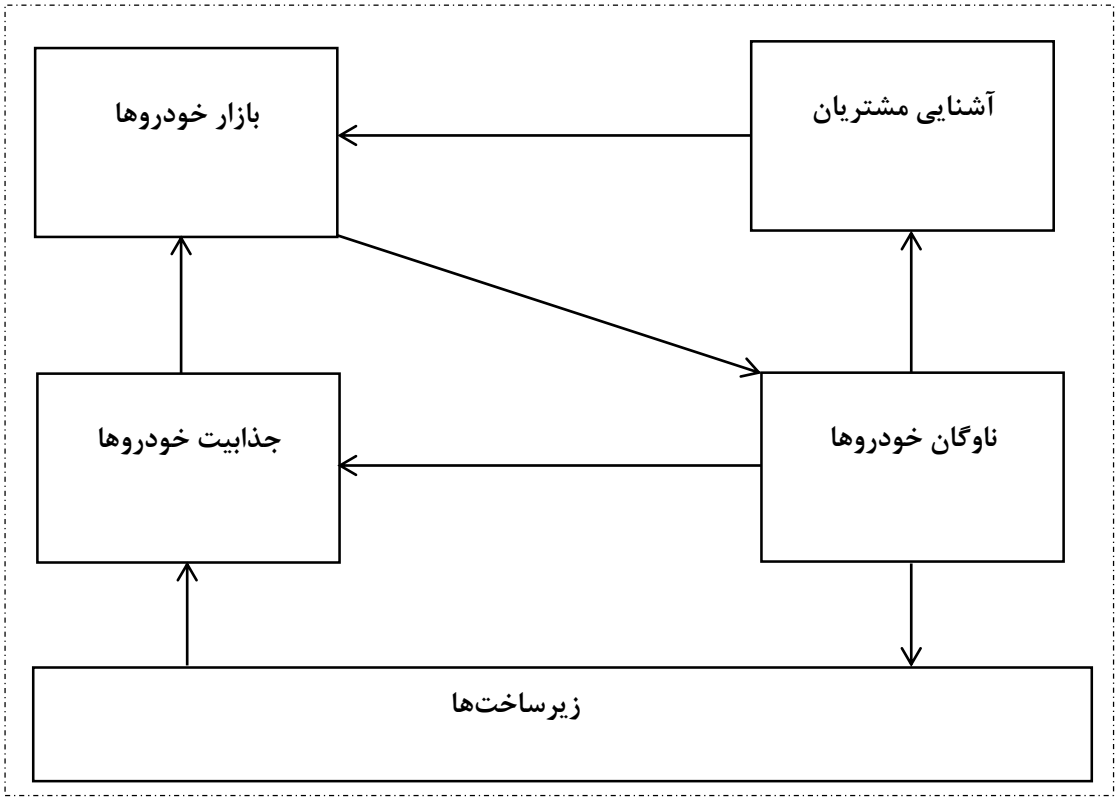
۳-۲ توصیف مدل

در این بخش، با استفاده از مفهوم دینامیک سیستم، یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی برای فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی ساخته می‌شود. مدل با در نظر گرفتن سه نوع خودرو شامل CV، HEV و BEV ایجاد می‌شود. علاوه بر HEV و BEV نوع سومی از خودروهای الکتریکی وجود دارد، PHEV که در بازار خودرو جهانی محبوب و رایج است. ازآنجایی‌که مشخصات فنی PHEV در HEV و BEV وجود دارد، برای ساده‌تر شدن مدل از آوردن آن در مدل صرف‌نظر شده است. همچنین خودروهای معمولی نیز از نظر سوخت، قیمت خرید، هزینه‌ی بهره‌برداری و سایر مشخصات فنی انواع مختلفی دارد. در این مدل، انواع آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای CV بر اساس میانگین ترکیبی اطلاعات حقیقی انواع خودروها تخمین زده شده است؛ بنابراین این پارامترها معرف انواع خودروهای معمولی است.

مدل تنها شامل خودروهای سواری سایز متوسط در تهران است (کامیون‌ها، اتوبوس‌ها، مینی‌بوس‌ها استثنا شده‌اند)؛ بنابراین پارامترهای خودرو مانند دامنه‌ی رانندگی، زمان سوخت‌گیری، هزینه‌ی خرید و بهره‌برداری و نرخ آلایندگی با توجه به این بازار خاص تعیین شده‌اند. همچنین با توجه به سطح درآمد، جنسیت و یا علاقه‌مندی می‌توان بازارها و مشخصات متنوعی برای مشتریان خودروهای سایز متوسط در نظر گرفت. بااین‌حال، مدل طراحی‌شده تنها افراد (خانواده‌ها) با سطح

درآمد متوسط را شامل می‌شود که برای استفاده‌ی شخصی خودرو خریداری می‌نمایند. برای در نظر گرفتن تنها یک گروه در مدل می‌توان سه علت ذکر کرد. اول، افزودن مشخصات تمام مشتریان به مدل باعث پیچیدگی آن می‌شود و در درستی نتایج آن تردید وجود دارد. دوم، مشخصات مشتریان در نظر گرفته‌شده در مدل، قسمت عمده‌ی بازار را پوشش می‌دهد. سوم، انواع خودروهای الکتریکی موجود با این مشخصات مشتریان تطابق دارد. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای مرتبط بر اساس این مشتریان در نظر گرفته شده‌اند.

مدل کلی به‌منظور توصیف جامع مدل به پنج بخش تقسیم می‌شود که عبارت‌اند از: ناوگان خودروها، بازار خودروها، آشنایی مشتریان با خودروها، جذابیت خودروها و زیرساخت‌ها. روابط بین این بخش‌ها در زیر به‌طور کلی آمده است.

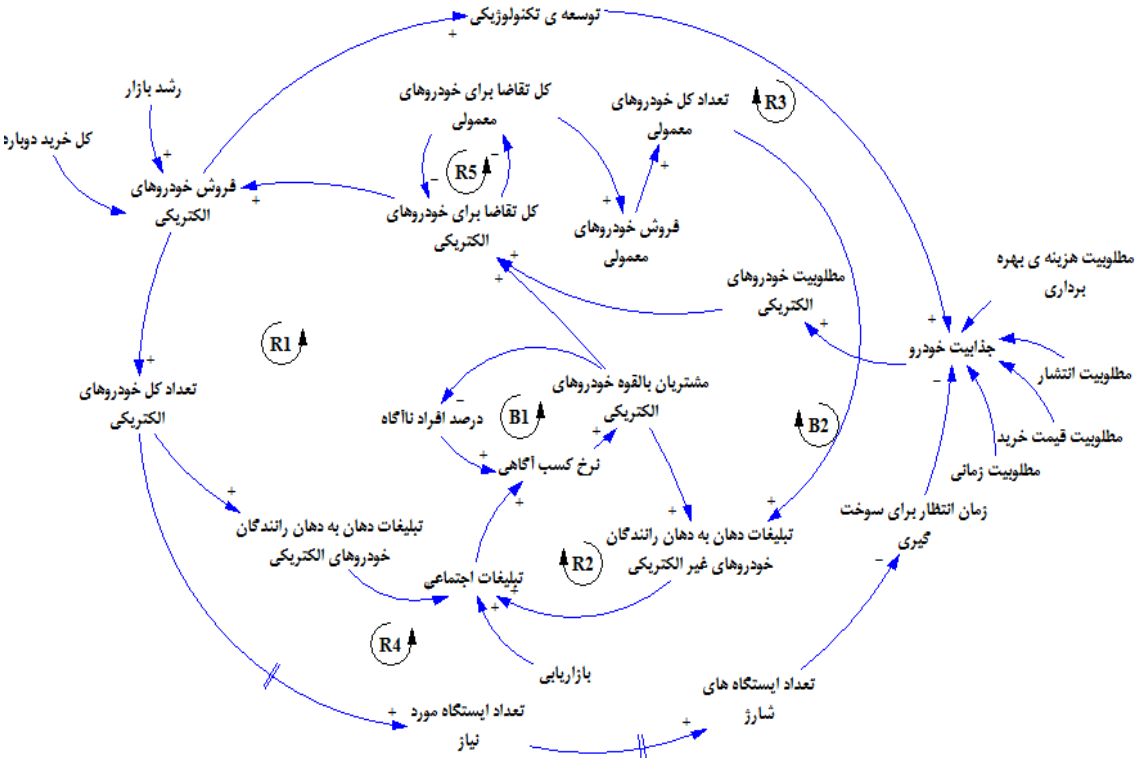


شکل ۳-۱: مروری بر بخش‌های مدل و رابطه‌ی بین آن‌ها

این بخش‌ها با جزئیات در این فصل شرح داده خواهند شد. بااین‌حال قبل از آن، مدل به‌طور

اجمالی برای درک روابط علّی و حلقه‌های بازخوردی بین متغیرها موردبررســـی قرار می‌گیرد. نمودار علّی حلقوی[۱] ساده‌شده‌ای از مدل در شکل ۳-۲ قابل‌مشاهده است.

همان‌طور که در شــکل ۳-۲ مشــاهده می‌شــود، نمودار علّی حلقوی پنج حلقه‌ی بازخوردی تقویت‌کننده[۲] (R) و دو حلقه‌ی متعادل‌کننده[۳] (B) دارد. لازم به ذکر اســت که اگرچه BEV و HEV بــه‌طور جــداگــانــه در مدل در نظر گرفته شــــده‌اند اما در نمودار علّی حلقوی تحت عنوان خودروهای الکتریکی نمایش داده شده‌اند تا تصویری روشن ارائه دهند و به درکی بهتر از مدل منجر شوند. مدل با جزئیــات در بخش‌های بعد توضــــیح داده خواهد شــــد، اما به‌طور مختصــــر مروری کلی بر حلقه‌های بازخوردی اصلی در ادامه صورت گرفته است.



شکل ۳-۲: نمودار علّی حلقوی ساده‌شده

[۱] Casual Loop Diagram
[۲] Reinforcing
[۳] Balancing

حلقـه‌ی بازخوردی R1 بیانگر اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای الکتریکی بر کل خودروهای الکتریکی در تهران می‌باشـد. تبلیغات دهان‌به‌دهان به‌طور خلاصـه تمام فعالیت‌هایی است که به عموم مردم کمک می‌کند تا خودروهای الکتریکی را بشناسند. برای مثال رانندگی با خودروهای الکتریکی در جاده و صحبت درباره‌ی آن‌ها مربوط به اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان است. افزایش تعداد کل خودروهای الکتریکی طبیعتاً به معنای افزایش تعداد رانندگان آن‌ها می‌باشـد. این امر باعث می‌شـود افرادی کـه در معرض تبلیغات دهان‌به‌دهان قرار می‌گیرند نسـبت به آنچه که قبلاً بوده افزایش یابد؛ بنـابراین افراد ناآگاه درباره‌ی خودروهای الکتریکی اطلاعات کسـب می‌کنند و آن‌ها را در مجموعه‌ی انتخابی خود برای خرید قرار می‌دهند. درنتیجه، مشـتریان بالقوه و درنتیجه تقاضـا برای خودروهای الکتریکی افزایش پیدا می‌کند و منجر به افزایش فروش می‌شود. نهایتاً تعداد کل خودروهای الکتریکی در تهران به‌صورت مثبت به‌وسیله‌ی فروش تحت تأثیر قرار می‌گیرد (و برعکس).

حلقه بازخوردی R2 اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی بر مشتریان بالقوه‌ی آن‌ها را نشـان می‌دهد. سـطح تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی در موازات با افزایش مشتریان بالقوه خودروهای الکتریکی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، همان‌طور که قبلاً بیان شـد، مشتریان بالقوه بیش‌تر باعث می‌شود افراد بیش‌تری در مورد خودرو الکتریکی یاد بگیرند، اگرچه بـا آن رانـدگی نکرده بـاشـنـد. بـه‌علاوه رانـدگان خودروهای غیر الکتریکی اطلاعات خود در مورد خودروهـای الکتریکی را بـه دیگران منتقـل می‌کنند که به تبلیغات اجتماعی کمک می‌کند. درنهایت، این تبلیغات اجتماعی به‌صورت مثبت مشتریان بالقوه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (و برعکس).

حلقه بازخوردی R3 نمایشـگر اثر توسـعه‌ی تکنولوژیکی بر فروش خودرو الکتریکی اسـت. توسـعه‌ی تکنولوژیکی در نمودار علی حلقوی به معنای توسـعه و تحقیق (R&D) و یادگیری از طریق انجام دادن می‌باشـد. بالا رفتن فروش باعث می‌شود محققان، تحقیق و توسعه‌ی بیش‌تری انجام دهند که ریشه در دو علت دارد. اول، تقاضا در بازار، تولیدکنندگان را برای کسب سهم بالاتر در بازار تحریک

می‌کند. دوم، به دلیل درآمدی که از فروش حاصل می‌شود پول بیش‌تری به تحقیق و توسعه اختصاص داده می‌شود. در مورد یادگیری از طریق انجام دادن، تولیدکنندگان فرصت این را خواهند داشت تا تمرین بیش‌تری در تولید خودروهای الکتریکی به دلیل افزایش سطح تولید داشته باشند. این شرایط منجر به کاهش قیمت خرید خودرو الکتریکی خواهد شد. بهبود تکنولوژی و کاهش قیمت خرید باعث افزایش جذابیت خودرو و نهایتاً افزایش فروش خودرو الکتریکی می‌گردد (و برعکس).

حلقه بازخوردی R4 تأثیر تعداد ایستگاه‌های شارژ بر تعداد کل خودروهای الکتریکی در تهران را نشان می‌دهد. زمانی که تعداد کل خودروهای الکتریکی در تهران افزایش پیدا کند، تعداد ایستگاه‌های شارژ موجود پاسخگوی تقاضای شارژ برق نخواهند بود؛ بنابراین، نیاز به ساخت ایستگاه‌های شارژ جدید می‌باشد. با ساخت ایستگاه‌های جدید، زمان انتظار در صف برای سوخت‌گیری کاهش و جذابیت خودرو افزایش پیدا می‌کند. با افزایش جذابیت خودرو الکتریکی، خرید آن در اولویت قرار می‌گیرد. درنتیجه ابتدا تقاضا و سپس تعداد کل خودروهای الکتریکی افزایش می‌یابد (و برعکس).

حلقه بازخوردی R5 بیانگر اثر تقاضای خودرو الکتریکی بر تقاضای خودرو معمولی است. اگر تقاضا برای خودرو الکتریکی افزایش یابد، سبب کاهش تقاضا برای خودرو معمولی می‌شود. در این شرایط تقاضا برای خودرو الکتریکی افزایش می‌یابد (و برعکس).

حلقه بازخوردی B1، اثر مشتریان بالقوه‌ی خودروهای الکتریکی را بر نرخ کسب آگاهی نمایش می‌دهد. نرخ کسب آگاهی به معنای تعداد کل افرادی است که در سال با خودروهای الکتریکی آشنا می‌شوند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، با افزایش مشتریان بالقوه خودروهای الکتریکی درصد افرادی که همچنان در مورد خودروهای الکتریکی ناآگاه هستند، کاهش می‌یابد. زمانی که تعداد افراد ناآگاه کاهش یابد، نرخ کسب آگاهی نیز طبیعتاً کاهش می‌یابد. در این شرایط روند افزایش مشتریان بالقوه‌ی خودروهای الکتریکی، کمتر می‌شود (و برعکس).

حلقـه بازخوردی B2 ارائه‌دهنده‌ی اثر تعداد کل خودروهای معمولی بر تقاضـــای خودروهای الکتریکی از طریق تبلیغـات اجتمـاعی اســـت. زمـانی که تعداد کل خودروهای معمولی افزایش یابد، تبلیغـات دهـان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی نیز افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که قبلاً بیان شـــد، افزایش ســـطح تبلیغات دهان‌به‌دهان اســـتفاده‌کنندگان از خودروهای غیر الکتریکی باعث افزایش تبلیغات اجتماعی و درنتیجه افزایش مشـــتریان بالقوه خودروهای الکتریکی می‌شـــود. در انتها تعداد کل خودروهای معمولی کاهش می‌یابد و یا سرعت افزایش آن کمتر می‌شود (و برعکس).

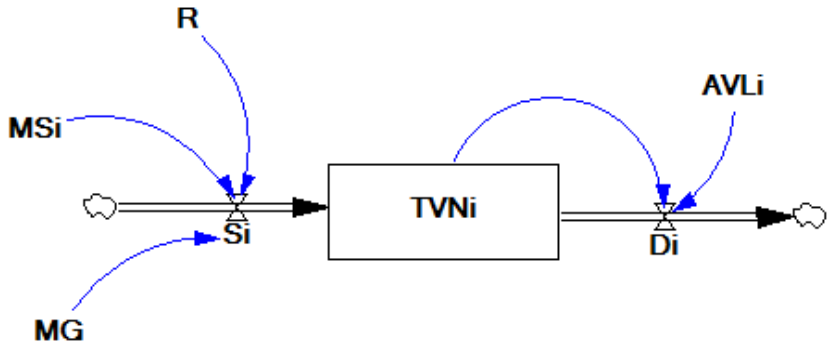
در ادامه ابتدا هر بخش با جزئیات شـرح داده خواهد شد. سپس مفروضات و پارامترهای مدل بیان می‌شود. لازم به ذکر است که تنها متغیرها، پارامترها و فرمول‌های مهم در این فصل خواهد آمد.

۳-۲-۱ بخش ناوگان خودروها

بخش ناوگان خودروها متغیرهایی مانند فروش، تعداد کل خودروها و نرخ از رده خارج شـــدن آن‌ها و همچنین روابط بین این ســـه متغیر را در بر می‌گیرد. این بخش شـــرح جامعی از ارتباطات و فرمولاسیون بین فروش، تعداد کل و نرخ خروج هر یک از انواع خودروها فراهم می‌کند.

تعـداد هر نوع خودرو در یک ناحیه به دو عامل بســـتگی دارد که عبارت‌اند از میزان فروش و نرخ خروج. میزان فروش به‌وســـیله‌ی انتخاب مشـــتریان در خرید و نوع خودرویی که انتخاب می‌کنند، شـکل می‌گیرد. در این مدل فرض شـده اسـت که مصـرف‌کنندگان زمانی که برای اولین بار ماشـین خریداری می‌کنند یا قصد تعویض ماشین فعلی خود را دارند، دست به انتخاب خودرو می‌زنند. از طرف دیگر نرخ خروج، عامل تأثیرگذار مهم دیگری بر تعداد خودروها می‌باشـد که بیانگر تأثیر متوسط طول عمر خودروها اسـت. به‌طور خلاصه، تعداد کل خودروها برای هر نوع در تهران توسط فروش افزایش و توسط خودروهایی که از رده خارج می‌شوند، کاهش می‌یابد.

ساختار انباشت[1] و جریان[2] اصلی بخش ناوگان خودرو در شکل ۳-۳ آمده است [۱۲]. این ساختار برای هر نوع خودرو، به‌طور جداگانه در مدل شبیه‌سازی‌شده تعیین شده است.



شکل ۳-۳: نمودار انباشت- جریان ساده‌شده‌ی بخش ناوگان خودرو

معادلات حاکم بر شکل فوق در ادامه شرح داده خواهد شد.

$$TVN_i(t) = TVN_i(t - dt) + (S_i - D_i) \times dt \qquad (۱-۳)$$

متغیر انباشت $TVN_i(t)$ بیانگر تعداد کل خودروهای سواری نوع i در زمان t در محدوده‌ی تهران می‌باشد که متغیری دینامیکی است. i نوع خودرو را مشخص می‌کند که در اینجا می‌تواند CV، HEV و BEV باشد. جریان ورودی، فروش خودرو نوع i (S_i) و جریان خروجی، خودروهای از رده خارج‌شده‌ی نوع i (D_i) در سال است. dt نیز گام زمانی محاسبات است.

$$S_i = MS_i \times (MG + R) \qquad (۲-۳)$$

S_i بر اساس دو جنبه‌ی سهم خودرو نوع i از بازار فروش (MS_i) و کل تقاضای خودرو جدید محاسبه می‌شود. MS_i به معنای سهم فروش خودرو نوع i از کل حجم فروش سالانه است. این متغیر با جزئیات در بخش بعد شرح داده خواهد شد. متغیر دوم، یعنی کل تقاضای خودرو جدید برابر مجموع رشد بازار (MG) و خرید دوباره (R) است. رشد بازار افزایش سالانه در تقاضا برای یک نوع خودرو می‌باشد.

[1] Stack
[2] Flow

به‌عبارت‌دیگر، اگر شخصی در تهران برای اولین بار خودرو خریداری کند، به رشد بازار کمک کرده است. رشد بازار از طریق رابطه‌ی (۳-۳) محاسبه می‌شود. خودروها زمانی از رده خارج می‌شوند که از کار بیافتند و یا در اثر اتمام طول عمر مفیدشان، بلااستفاده شوند. با از رده خارج شدن خودرو، مشتریان نیازمند خرید دوباره‌اند. بنابراین نرخ از رده خارج شدن خودروها مشارکت مستقیمی در خرید دوباره دارد. به همین دلیل، خرید دوباره برابر مجموع نرخ از رده خارج شدن انواع خودرو می‌باشد. درنتیجه، فروش هر نوع خودرو برابر حاصل‌ضرب کل فروش خودرو جدید و سهم آن در بازار به دست می‌آید.

$$MG = TVD - TVN \qquad (۳-۳)$$

همان‌طور که در بالا اشاره شد، رشد بازار افزایش سالانه در تقاضا برای خودرو است. این متغیر با مقایسه‌ی کل تقاضای خودرو (TVD) در سال و تعداد کل خودروها (TVN) در سال قبل، به دست می‌آید.

$$TVD = VPC \times Pop \qquad (۴-۳)$$

تقاضای خودرو کل با استفاده از حاصل‌ضرب سرانه‌ی خودرو[۱] (VPC) و جمعیت (Pop) در تهران محاسبه می‌شود. سرانه خودرو به تعداد ماشین‌های سواری به ازای هر شهروند اشاره دارد.

$$D_i = \frac{TVN_i}{AVL_i} \qquad (۵-۳)$$

نرخ از رده خارج شدن (D_i) نیز از رابطه‌ی فوق قابل‌محاسبه است. در این رابطه، AVL_i متوسط طول عمر خودرو نوع i می‌باشد.

[۱] Vehicles Per Capita

۳-۲-۲ بخش بازار خودرو

در بخش بازار خودرو، سهم سالانه انواع خودرو از بازار فروش توضیح و معادلات حاکم بر آن، تعیین می‌شود. مصرف‌کنندگان از میان تمام خودروهای جایگزین، برای خرید یک خودرو تصمیم‌گیری می‌کنند. این تصمیم به‌وسیله‌ی ویژگی‌های خودرو مانند قیمت خرید و هزینه‌ی سوخت و همچنین علاقه‌مندی‌های شخصی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به‌علاوه، مشتریان باید در مورد یک نوع خودرو آگاهی داشته باشند تا آن را جزء گزینه‌های خریدشان قرار دهند. به همین علت، آگاهی مصرف‌کنندگان به همراه شکل تصمیم‌گیری مشتریان سهم بازار هر نوع خودرو را مشخص می‌کند.

تصمیم‌گیری مشتریان در این پایان‌نامه بر اساس مدل انتخاب گسسته‌ی MNL صورت می‌گیرد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در این روش بر اساس ویژگی‌های انواع خودرو و مطلوبیتی که از دیدگاه مصرف‌کننده دارند، احتمال انتخاب خودروها مشخص می‌گردد. احتمال انتخاب خودرو نوع i (P_i) از طریق معادله‌ی (۳-۶) تعیین می‌شود [۱۵].

$$P_i = \frac{e^{U_i}}{\sum_{j=1}^{3} e^{U_j}} \qquad i = 1,2,3 \tag{۳-۶}$$

در معادله‌ی فوق، U_i مطلوبیت کل برای خودرو نوع i است که بر اساس ترکیب خطی چهار ویژگی مطلوبیت زمانی، مطلوبیت قیمت خرید، مطلوبیت هزینه‌ی بهره‌برداری و مطلوبیت انتشار گازهای گلخانه‌ای خودرو تخمین زده می‌شود (توضیحات بیش‌تر در بخش بخش جذابیت خودروها ارائه خواهد شد).

با تعیین احتمال خرید هر خودرو، سهم بازار خودرو نوع i (MS_i) را می‌توان از طریق رابطه‌ی (۳-۷) محاسبه کرد.

$$MS_i = P_i \times WTC_i \tag{۳-۷}$$

در رابطه‌ی فوق WTC_i، بیانگر درصد مشتریانی است که با خودرو نوع i آشنایی دارند و در فرآیند خرید آن را در نظر می‌گیرند. (توضیحات بیش‌تر در این خصوص در بخش بخش آشنایی مشتریان بیان می‌شود).

۳-۲-۳ بخش جذابیت خودروها

بخش جذابیت خودروها شرح جامعی در مورد رابطه‌ی بین ویژگی‌های خودرو و درک این ویژگی‌ها توسط مشتریان ارائه می‌دهد. بنابراین این بخش درباره‌ی ویژگی‌های خودروها و مطلوبیتی که توسط رانندگان این خودروها درک می‌شود، صحبت می‌کند.

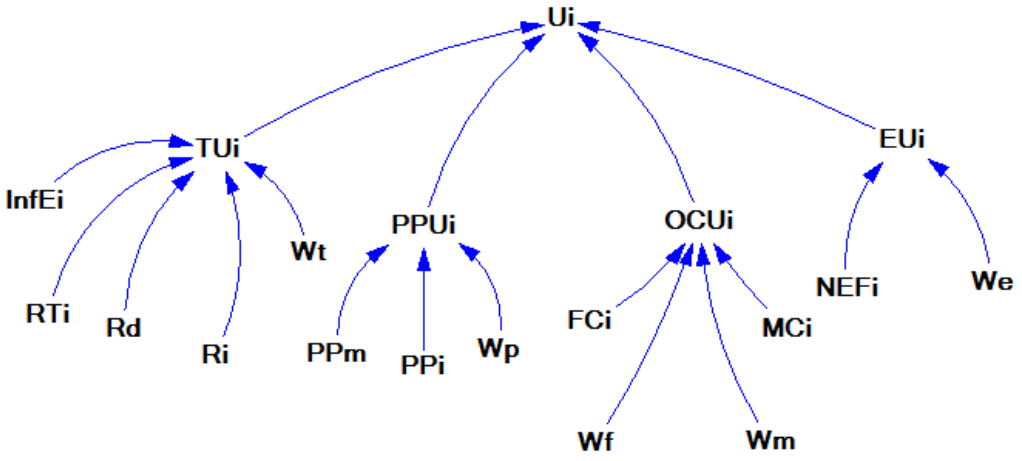
هنگام تصمیم‌گیری درباره‌ی خرید خودرو، مشتریان همه‌ی ویژگی‌های گزینه‌های موجود را مدنظر قرار می‌دهند و با مقایسه‌ی آن‌ها و بر اساس مزایایی که خودروها ارائه می‌دهند، یکی را خریداری می‌نمایند. مطلوبیت دریافتی خودرو بیانگر کل مزایایی است که خودرو از دیدگاه مشتریان ارائه می‌دهد. مطلوبیت خودرو با ویژگی‌های خودرو مانند دامنه‌ی رانندگی، زمان سوخت‌گیری (شارژ) و زیرساخت‌های آن در ارتباط است [۱۰ و ۳۲-۳۴]. به‌علاوه هزینه‌ی خرید خودرو یکی از معیارهای بسیار مهم است که مشتریان هنگام خرید خودرو به آن اهمیت می‌دهند [۱۰ و ۳۲-۳۴]. ضریب انتشار آلودگی و هزینه‌ی بهره‌برداری نیز از دیدگاه مصرف‌کنندگان عوامل مؤثری هستند [۳۲-۳۴]. در همین زمینه، در مدل فرض شده است که مصرف‌کنندگان شش معیار را در خرید در نظر می‌گیرند که عبارت‌اند از هزینه‌ی خرید، هزینه‌ی بهره‌برداری، دامنه‌ی رانندگی، زمان سوخت‌گیری، در دسترس بودن زیرساخت‌ها و ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای. به‌علاوه‌ی این معیارها، خریداران ممکن است ویژگی‌های دیگری مانند رنگ، برند، شتاب یا لوکس بودن خودرو را در زمان تصمیم‌گیری در نظر بگیرند که از آن‌ها صرف‌نظر شده است.

سطح اهمیت هر ویژگی با توجه به دیدگاه مشتریان متفاوت است. به‌عنوان‌مثال، قیمت خرید ممکن است برای بیش‌تر مشتریان اولویت بیش‌تری نسبت به معیار سطح انتشار آلودگی داشته باشد.

به همین دلیل، هنگام محاسبه‌ی مطلوبیت کل، ارزیابی تمام ویژگی‌ها با سطح اهمیت یکسان ممکن است به نتایج درستی منجر نشود؛ بنابراین سطح اهمیت متفاوتی، تحت عنوان وزن، به هر ویژگی در مدل اختصاص داده شده است.

لازم به ذکر است در جهان واقعی سطح اهمیت برای هر فرد متفاوت است و ساخت مدل با در نظر گرفتن اولویت‌های تمام افراد غیرممکن می‌باشد. اول، تشخیص تمایلات تمام افراد غیرقابل دست‌یابی است. دوم، حتی در صورت فهمیدن علایق هر شخص، در نظر گرفتن همه‌ی آن‌ها در مدل، تجزیه‌وتحلیل آن را به‌شدت دشوار و تقریباً غیرممکن می‌کند. سوم، حتی اگر مدلی که تمام سطوح اهمیت تمام خریداران را شامل می‌شود، بتوان تجزیه‌وتحلیل کرد، صحت نتایج آن دور از انتظار است. درنتیجه ما سطح اهمیتی را که ارائه‌دهنده‌ی مشخصات اکثر مشتریان باشد، برای هر ویژگی در مدل در نظر گرفته‌ایم.

قسمت‌های مهم بخش جذابیت خودروها و رابطه‌ی بین آن‌ها در شکل ۳-۴ آمده است. این روابط برای هر نوع خودرو به‌طور مجزا در مدل تعیین شده است.



شکل ۳-۴: نمودار ساده‌شده‌ی بخش جذابیت خودروها

مصرف‌کنندگان خودرو خود را با مقایسه‌ی مطلوبیت کلی که از هر نوع خودرو مشاهده کرده‌اند، انتخاب می‌نمایند. چهار مطلوبیت اصلی در مدل آورده شده است که عبارت‌اند از مطلوبیت

زمـانی، مطلوبیت قیمت خرید، مطلوبیت هزینه‌ی بهره‌برداری و مطلوبیت انتشـــار گازهای گلخانه‌ای. مطلوبیت با اسـتفاده از دو عامل اصلی یعنی ویژگی‌های خودرو و وزن این ویژگی‌ها محاسبه می‌شوند. تعیین دقیق وزن ویژگی‌ها، به مطالعه و استفاده از داده‌های واقعی که توسط اظهارات مصرف‌کنندگان به دسـت می‌آید، نیاز دارد. ازآنجاکه این اطلاعات در دسـترس نیسـت، ما با مرور مطالعات مشـابه و استفاده از فرضیات، این وزن‌ها را تعیین نموده‌ایم.

۳-۲-۳-۱ مطلوبیت زمانی

مطلوبیت زمانی مربوط به ویژگی‌های دامنه‌ی رانندگی، زمان سـوخت‌گیری و در دسـترس بودن جایگاه‌های سوخت‌گیری می‌باشد که عوامل مؤثری بر تصمیم مصرف‌کنندگان است. برای مثال، دامنه‌ی رانندگی کم باعث می‌شـود سـوخت به‌سـرعت به اتمام برسد. در این شرایط رانندگان ناچارند دفعات زیادی به ایستگاه سوخت‌گیری رفته و دوباره سوخت‌گیری نمایند. از دید رانندگان، به‌خصوص برای افراد پرمشـغله، این کار اتلاف زمان است. گذشته از این اگر پیدا کردن ایستگاه سوخت‌گیری نیز دشـوار باشـد، مطلوبیت زمانی کاهش می‌یابد. حتی اگر پیدا کردن ایسـتگاه سـوخت نیز آسـان باشد، ممکن اسـت در ایسـتگاه به دلیل کمبود نقاط شـارژ کافی صف وجود داشته باشد و زمان زیادی برای سـوخت‌گیری اتلاف وقت شـود. به‌طور خلاصـه دامنه‌ی رانندگی کم، زیرسـاخت‌های ناکافی یا زمان سـوخت‌گیری (شـارژ) طولانی ممکن اسـت از نظر زمانی هزینه‌بر باشـند؛ بنابراین مصرف‌کنندگان در زمـان خرید، این عوامل را در نظر می‌گیرند. به همین دلیل، رابطه‌ی مطلوبیت زمانی با در نظر گرفتن اتلاف زمانی متوسـطی که از دامنه‌ی رانندگی، زمان و زیرسـاخت‌های سـوخت‌گیری برای یک فاصـله معین مکانی ناشی می‌شود، بسط داده شده است.

$$TU_i = \frac{R_d}{R_i} \times RT_i \times InfE_i \times W_t \qquad (۳-۸)$$

در رابطه‌ی (۳-۸)، دامنه‌ی مطلوب (R_d)، بیش‌ترین مسـافتی است که مشتریان انتظار دارند

بدون نیاز به فرآیند سوخت‌گیری (شارژ) مجدد، طی کنند. این پارامتر تابع عادات رانندگی روزانه افراد است. دامنه‌ی رانندگی خودرو نوع i (R_i)، میانگین مسافتی است که خودرو با یک‌بار سوخت‌گیری (شارژ) می‌تواند طی کند. به‌عبارت‌دیگر، مسافتی که یک CV یا HEV می‌تواند با یک باک پر از سوخت و یک BEV با باتری پر برحسب کیلومتر می‌تواند طی کند. زمان سوخت‌گیری (شارژ) خودرو نوع i (RT_i)، مدت‌زمانی است که پر کردن باک یا شارژ کامل باتری طول می‌کشد. اثر زیرساخت‌ها ($InfE_i$) بیانگر اثر زیرساخت‌های شارژ بر زمان سوخت‌گیری (شارژ) را نشان می‌دهد. وزن مطلوبیت زمانی (W_t) نیز اهمیت مطلوبیت زمانی را مشخص می‌نماید.

دامنه‌ی رانندگی و زمان شارژ BEV ثابت نیستند. این دو پارامتر توسط اثر منحنی یادگیری[۱] تغییر می‌کند. اثر منحنی یادگیری به معنای در نظر گرفتن بهبود تکنولوژی باتری در مدل است؛ زیرا بهبود در تکنولوژی باتری توسط فرآیند تحقیق و توسعه در طول زمان در جریان است. ما از منحنی یادگیری که معمولاً برای هزینه‌ی تولید استفاده می‌شود [۳۵]، به‌منظور در نظر گرفتن بهبود ویژگی‌های دامنه‌ی رانندگی و زمان شارژ BEV استفاده می‌نماییم. معادله‌ی اثر منحنی یادگیری در زیر آمده است.

$$C_i = C_1 N_i^{-r} \qquad (۹-۳)$$

C_i هزینه‌ی تولید یا مقدار یک ویژگی را برای محصول iام نشان می‌دهد. همچنین N_i تعداد تجمعی محصول در iامین تولید و r، نرخ یادگیری است.

در این پایان‌نامه، اثر منحنی یادگیری فقط برای تکنولوژی BEV در نظر گرفته شده است. به‌عبارت‌دیگر تکنولوژی CV و HEV در مدل با اثر منحنی یادگیری بهبود نمی‌یابند.

اثر زیرساخت‌های خودرو نوع i ($InfE_i$)، تأثیر زیرساخت‌های سوخت‌گیری بر مطلوبیت زمانی

[۱] Learning curve effect

را نشـان می‌دهد. این موضـوع در بخش زیرسـاخت‌ها با جزئیات شـرح داده خواهد شد. W_t نیز بیانگر وزن مطلوبیت زمانی در مطلوبیت کل خودرو است.

۳-۲-۳-۲ مطلوبیت قیمت خرید

همان‌طور که بیان شد، قیمت خرید عاملی مؤثر و اساسی در مرحله‌ی انتخاب ماشین است. به همین دلیل معیار قیمت خرید در مدل با وزن نسـبتاً بالا در نظر گرفته شـده اسـت. به‌علاوه‌ی قیمت خودرو، سطح درآمد مشتریان نیز در مطلوبیت قیمت خرید نقش دارد، زیرا در حساسیت آنان به قیمت خرید تأثیرگذار اسـت؛ اما ازآنجا که ما تنها مشـخصات یک گروه (خانواده‌های با درآمد متوسط) را در نظر می‌گیریم، از نقش آن صـــرف‌نظر کرده‌ایم. مطلوبیت قیمت خرید خودرو نوع i (PPU_i) توســـط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$PPU_i = \frac{PP_i}{PP_m} \times W_P \qquad (۱۰-۳)$$

در رابطه‌ی فوق PP_i و W_P به ترتیب قیمت خرید خودرو نوع i و وزن مطلوبیت قیمت خرید می‌باشد. PP_m نیز قیمت گران‌ترین خودرو در بین گزینه‌های موجود اســـت (در اینجا BEV) و برای نرمالیزه کردن قیمت خرید خودروها اســـتفاده شـــده اســـت. قیمت خرید خودروهای الکتریکی شـــامل قیمت خرده‌فروشـــی ســـازنده[۱]، هزینه‌ی حمل‌ونقل، ســـود بازرگانی، حقوق گمرکی و مالیات بر ارزش افزوده می‌باشد.

لازم به ذکر اسـت که اگرچه در حال حاضر قیمت خرید خودروهای الکتریکی و به‌ویژه BEV نســـبتاً بالاســـت، اما قیمت در اثر منحنی یادگیری که خود ناشـــی از یادگیری به‌وســـیله‌ی انجام دادن تولیدکنندگان و تحقیق و توســـعه اســـت، به‌تدریج کاهش می‌یابد. یادگیری از طریق انجام دادن به تولیدکنندگان کمک می‌کند درباره‌ی تولید خودرو تجربه کسب کنند. این تجربه نهایتاً منجر به کاهش

[۱] Manufacturer's Retail Price

هزینه‌های تولید و درنتیجه کاهش قیمت خرید خودرو می‌شود. تحقیق و توسعه نیز به کاهش هزینه‌ی تولید، مانند هزینه‌ی تولید باتری، کمک می‌کند. بنابراین، فرض شـده اسـت که قیمت خرید در طول زمان به‌تدریج کاهش یابد.

۳-۲-۳-۳ مطلوبیت هزینه‌ی بهره‌برداری

در مـدل، هزینـه‌ی بهره‌برداری هر نوع خودرو شـامل هزینه‌ی سـوخت و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری برای آن خودرو اسـت. هزینه‌ی سـوخت، هزینه‌ی سـوختی اسـت که خودرو برای طی یک کیلومتر اسـتفاده می‌کند. هزینه‌ی تعمیر و نگهداری نیز هزینه‌ی معمولی است که هر خودرو در طول اسـتفاده برای مصرف‌کننده خواهد داشت. بنابراین مطلوبیت هزینه‌ی بهره‌برداری خودرو نوع i (OC_i) برابر جمع جبری هزینه‌ی سوخت (FC_i) و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری (MC_i) آن می‌باشد.

$$OCU_i = FC_i \times W_F + MC_i \times W_M \qquad (۱۱-۳)$$

در رابطه‌ی فوق، W_F وزن مطلوبیت هزینه‌ی سـوخت و W_M وزن مطلوبیت هزینه‌ی تعمیر و نگهداری برای می‌باشـد. به‌وسـیله‌ی این پارامترها می‌توان سـطح اهمیت را برای هزینه‌ی سـوخت و تعمیر و نگهـداری تعیین کرد. لازم به ذکر اسـت ازآنجاکه هزینه‌ی سـوخت و تعمیر و نگهداری خودروهای الکتریکی از CVs کمتر باشد [۳۶]، این دو هزینه برای انواع خودرو، بر مبنای هزینه‌های CV نرمالیزه شده‌اند.

۳-۲-۳-۴ مطلوبیت انتشار گازهای گلخانه‌ای

مطلوبیت انتشـار گازهای گلخانه‌ای به کمک ضـریب انتشـار گازهای گلخانه‌ای انواع خودرو محاسـبه می‌شـود. ضـریب انتشـار گازهای گلخانه‌ای بیانگر مقدار گازهای گلخانه‌ای اسـت که با یک کیلومتر رانندگی با انواع خودرو وارد محیط می‌شود. لازم به ذکر است که اگرچهBEV جزء خودروهای پاک می‌باشـد، اما ضـریب انتشـار آن از طریق نیروگاه‌های برق و در طی فرآیند تولید برق مشـخص

می‌شود. همچنین، در محاسبه‌ی ضریب انتشار، تنها CO_2 در نظر گرفته شده است؛ زیرا بخش عمده‌ی گازهای گلخانه‌ای را CO_2 تشکیل می‌دهد. در ادامه رابطه‌ی محاسبه‌ی مطلوبیت انتشار آمده است.

$$EU_i = NEF_i \times W_E \qquad (۱۲-۳)$$

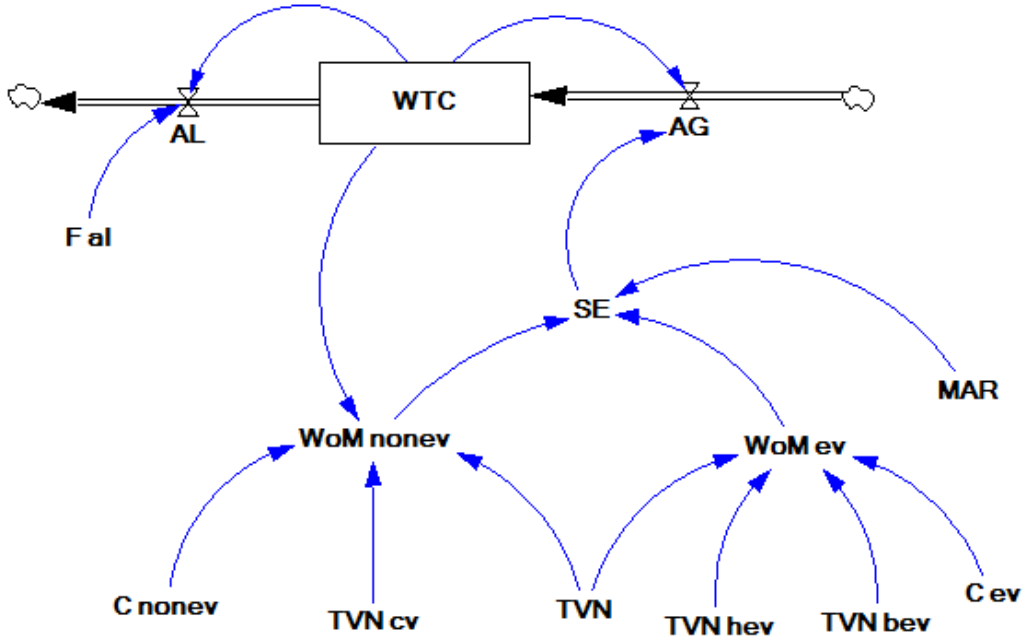
مطلوبیت انتشـار گازهای گلخانه‌ای برای خودرو نوع i (EU_i) از حاصـل‌ضرب نسخه‌ی نرمالیزه شده‌ی ضریب انتشار CO_2 خودرو نوع i (NEF_i) و وزن مطلوبیت انتشار (W_E) به دست می‌آید. برای نرمالیزه کردن، ضریب انتشار CV به‌عنوان مقدار مبنا انتخاب شده و بر طبق آن، نسخه‌ی نرمال شده‌ی ضریب انتشار HEV و BEV محاسبه گردیده است.

۳-۲-۴ بخش آشنایی مشتریان

بخش آشـنایی مشـتریان در مورد کسـب آگاهی مشـتریان از طریق تبلیغات دهان‌به‌دهان و بازاریابی می‌باشد. هر نوع خودرو می‌تواند وارد مجموعه‌ی انتخابی مصرف‌کنندگان شود، اگر و تنها اگر، اول، مصـرف‌کنندگان از وجود آن نوع خودرو آگاهی داشـته باشـند و دوم، با آن آشـنا باشند. بنابراین آشـنایی و آگاهی مشـتریان درباره‌ی خودرو، عاملی مهم و اسـاسی برای تصمیم خرید می‌باشد [۱۲ و ۳۷]. اجزای اصـلی بخش آشـنایی مشـتریان و رابطه‌ی بین این اجزا در شکل ۳-۵ آمده است. لازم به ذکر است که این بخش از مدل با الهام از مدل آشنایی استرابن[۱] [۱۲] مدل‌سازی شده است.

برای خرید یک خودرو در تهران همه از وجود CV آگاهی دارند و با آن آشـــنا می‌باشـــند. از طرف دیگر خودروهای الکتریکی تکنولوژی جدیدی هســـتند و مشـــتریان در ایران به‌صـــورت کامل با مفهوم آن‌ها آشـــنایی ندارند. محصـــولات جدید ، به‌ویژه آن‌هایی که نوآورانه‌اند، برای فروش نیازمند فرآیند یادگیری مشـــتریان می‌باشـــند. خودروهای الکتریکی نیز محصـــولات نوآورانه‌ای می‌باشـــند که نیازمند این فرآیند به‌منظور پذیرفته شدن توسط مشتریان می‌باشند.

[۱] Struben



شکل ۳-۵: نمودار ساده‌شده جریان- انباشت بخش آشنایی مشتریان

اگر مشتریان درباره‌ی خودروهای الکتریکی آگاهی کسب کنند، در طول فرآیند خرید آن‌ها را در مجموعه‌ی مدنظرشان قرار می‌دهند. برای نمایش مجموعه‌ی مدنظر رانندگان از مفهوم تمایل به در نظر گرفتن[۱] (WTC) استفاده می‌شود. درواقع WTC بیانگر فرآیندی ادراکی و احساسی است که از طریق آن مشتریان با کسب اطلاعات و درک کافی درباره‌ی خودروهای الکتریکی، آن‌ها را وارد مجموعه‌ی مدنظرشان برای خرید می‌کنند. بنابراین می‌توان گفت که WTC در اثر کسب آگاهی (AG) افزایش و از طریق از دست دادن آگاهی (AL) کاهش می‌یابد. رابطه‌ی (۳-۱۳) معادلات حاکم بر این متغیر انباشت را نشان می‌دهد.

$$WTC(t) = WTC(t - dt) + (AG - AL) \times dt \qquad (۱۳-۳)$$

کسب آگاهی در اثر تبلیغات اجتماعی[۲] ایجاد می‌شود. تبلیغات اجتماعی به تمام تأثیرات اجتماعی اشاره دارد که به مردم کمک می‌کند تا خودروهای الکتریکی را بشناسند و درباره‌ی آن‌ها

[۱] Willingness To Consider

[۲] Social Exposure

اطلاعات کسب کنند. کسب آگاهی از طریق معادله‌ی (۳-۱۴) مدل شده است.

$$\mathrm{AG} = SE \times (1 - \mathrm{WTC}) \qquad (۱۴-۳)$$

کسب آگاهی (AG) توسط مشتریان از حاصل‌ضرب تبلیغات اجتماعی (SE) و مشتریانی که خودروهای الکتریکی را نظر نگرفته‌اند، حاصل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر فقط افراد ناآشنا با خودروهای الکتریکی از طریق تبلیغات اجتماعی در مورد آن‌ها یاد می‌گیرند.

تبلیغات اجتماعی توسط دو عامل فعالیت‌های بازاریابی و تبلیغات دهان‌به‌دهان[۱] ایجاد می‌شود. فعالیت‌های بازاریابی (MAR) شامل تمام کانال‌های بازاریابی مانند آگهی‌های تلویزیونی، روزنامه‌ها، مجلات، مقاله‌ها و اینترنت می‌باشد. بازاریابی یک استراتژی مهم در فرآیند روانه‌ی بازار کردن یک محصول جدید است که به مردم کمک می‌کند تا آن را بشناسند یا با جنبه‌های سودمند آن آشنا شوند. تبلیغات دهان‌به‌دهان نیز بیانگر تمام فعالیت‌هایی است که در آن، رانندگان خودرو به‌تنهایی آگاهی در مورد خودروهای الکتریکی را گسترش می‌دهند، مانند گفت‌وگو و راندن خودرو الکتریکی در جاده، اینترنت و یا رسانه‌های جمعی. تبلیغات دهان‌به‌دهان از دو جزء تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای الکتریکی (WoM_{EV}) و تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی (WoM_{NonEV}) تشکیل می‌شود. این فعالیت‌ها باعث کسب اطلاعات در مورد خودروهای الکتریکی می‌شود و آن‌ها را وارد مجموعه‌ی مدنظر افراد می‌کند. تبلیغات اجتماعی از طریق رابطه‌ی (۳-۱۵) محاسبه می‌شود.

$$SE = MAR + WoM_{EV} + WoM_{NonEV} \qquad (۱۵-۳)$$

WoM_{EV} و WoM_{NonEV} نیز به ترتیب از روابط (۳-۱۶) و (۳-۱۷) محاسبه می‌شوند.

[۱] Word of Mouth

$$WoM_{EV} = C_{EV} \times \frac{TVN_{BEV} + TVN_{HEV}}{TVN} \quad (۱۶-۳)$$

در رابطه‌ی فوق نسبت تعداد خودروهای الکتریکی به تعداد کل خودروها، عاملی تأثیرگذار بر تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای الکتریکی است، زیرا زمانی که مردم با صاحبان خودرو صحبت می‌کنند یا آن‌ها را در جاده می‌بینند، در دسترس بودن آن را احساس می‌کنند و درباره‌ی آن یاد می‌گیرند. بنابراین خودروهای الکتریکی بیش‌تر در ناوگان حمل‌ونقل منجر به آگاهی افراد بیش‌تری می‌شود. اثربخشی تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای الکتریکی(C_{EV}) بیانگر میزان تأثیری است که رانندگان خودروهای الکتریکی بر سطح آگاهی مشتریان می‌گذارند.

$$WoM_{NonEV} = C_{NonEV} \times \frac{TVN_{CV}}{TVN} \quad (۱۷-۳)$$

تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی از طریق رانندگانی ایجاد می‌شود که درباره‌ی خودروهای الکتریکی آگاهی دارند ولی صاحب یکی از آن‌ها نیستند. به‌طور مشابه، اثربخشی تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی (C_{NonEV}) نیز نمایشگر میزان تأثیری است که رانندگان خودروهای غیر الکتریکی سطح آگاهی مشتریان می‌گذارند.

از دست دادن آگاهی (AL) مشتریان به این دلیل در مدل آمده است که حتی افرادی که با خودروهای الکتریکی آشنایی دارند و آن‌ها را برای خرید مدنظر قرار می‌دهند، ممکن است بعد از مدتی خودروهای الکتریکی را از مجموعه‌ی مدنظرشان خارج کنند، مگر این‌که آگاهی آن‌ها توسط تبلیغات اجتماعی، پیوسته تقویت شود. این موقعیت باعث می‌شود مشتریان بالقوه‌ی خودروهای الکتریکی کاهش یابند. رابطه‌ی (۳-۱۸) این مسئله را بیان می‌کند.

$$AL = WTC \times F_{AL} \quad (۱۸-۳)$$

در رابطه‌ی فوق، نسبت از دست دادن آگاهی (F_{AL}) نشان‌دهنده‌ی درصد سالانه‌ی افرادی است که با

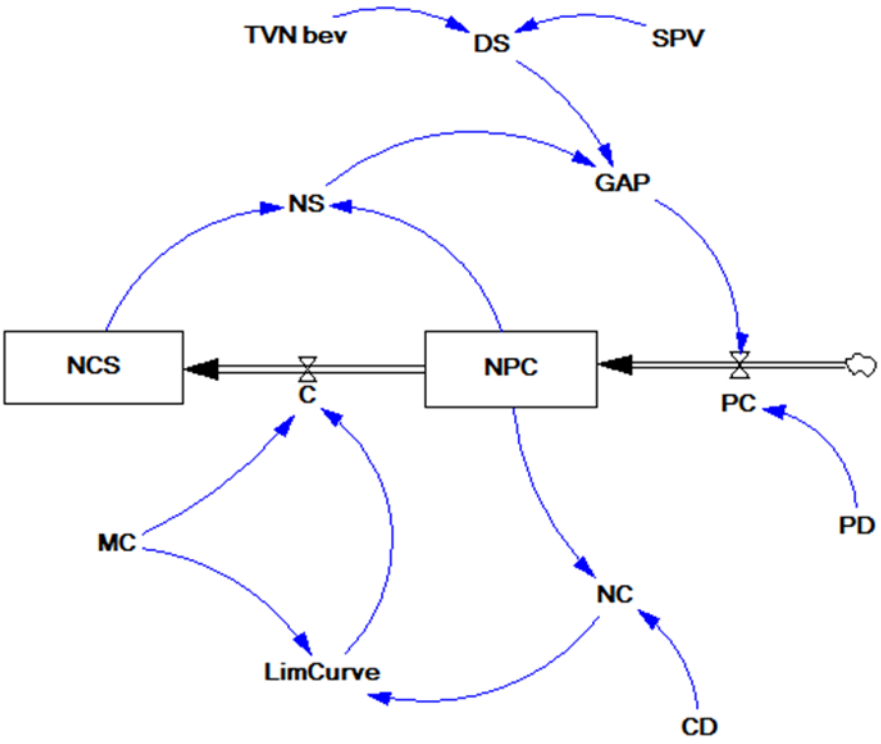
خودروهای الکتریکی آشنا هستند ولی به‌مرور زمان آن‌ها را از یاد می‌برند.

۳-۲-۵ بخش زیرساخت‌ها

بخش زیرساخت‌ها توضیحاتی در مورد زیرساخت‌های سوخت‌گیری (شارژ) مجدد خودروها و تمام اجزای آن ارائه می‌دهد. زیرساخت‌های سوخت‌گیری مجدد کافی به این معناست که تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری به‌صورت مناسب تقاضای سوخت‌گیری مجدد تمام خودروها را تأمین می‌کند. این متغیر عاملی اساسی برای راحتی رانندگان است، زیرا زیرساخت‌های ناکافی باعث ایجاد مشکلات زیادی برای رانندگان در شرایط اتمام سوخت می‌شود. درنتیجه زیرساخت‌های کافی معیاری مهم برای مشتریان است و باید در مدل گنجانده شود.

BEV با CV و HEV از نظر نقاط سوخت‌گیری مجدد متفاوت هستند. سوخت CV عمدتاً بنزین است و رانندگان آن از ایستگاه‌های سوخت‌گیری بنزین استفاده می‌کنند، درحالی‌که BEV خودروهایی با نیرومحرکه الکتریسیته هستند و از نقاط شارژ الکتریسیته استفاده می‌کنند. HEV نیز از ایستگاه‌های سوخت‌گیری بنزین استفاده می‌کنند، زیرا باتری آن‌ها از طریق منبع خارجی قابل شارژ نیست. نکته در این است که ایستگاه‌های سوخت‌گیری برای CV و HEV در تهران در حال حاضر کافی می‌باشد؛ بنابراین رانندگان CV و HEV از جهت سوخت‌گیری نگرانی ندارند؛ اما زیرساخت‌های ناکافی یکی از نگرانی‌های اساسی مشتریان BEV می‌باشد. ازآنجاکه تقاضایی روبه رشد و بالقوه برای BEV وجود دارد، توسعه‌ی زیرساخت‌های موجود برای تأمین این تقاضا ضروری به نظر می‌رسد. ساخت نقاط شارژ برای BEV باید با توجه به نیاز صورت گیرد؛ بنابراین، تعداد ایستگاه‌های شارژ کل متغیری دینامیک است و باید با جزئیات بیش‌تری موردبررسی قرار گیرد؛ درحالی‌که تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری بنزین برای CV و HEV کافی فرض شده است.

اجزای مهم بخش زیرساخت‌ها و رابطه‌ی بین این اجزا در شکل ۳-۶ آمده است.



شکل ۳-۶: نمودار انباشت- جریان ساده‌شده بخش زیرساخت‌ها

در ابتدا نقاط شارژ خودروهای الکتریکی یا وجود ندارد یا بسیار اندک و ناکافی است. زمانی که تقاضا برای خودروهای الکتریکی افزایش یابد و نفوذ آن‌ها به بازار افزایش یابد، به‌موازات آن، ساخت ایستگاه‌های شارژ نیز آغاز خواهد شد؛ بنابراین، تعداد ایستگاه‌های شارژ موجود (NCS) یک متغیر انباشت می‌باشد و توسط نرخ ساخت (C) افزایش می‌یابد.

$$NCS(t) = \mathrm{NCS(t - dt) + C \times dt} \qquad (۱۹-۳)$$

نرخ ساخت عبارت است از تعداد ایستگاه‌های شارژی که در هرسال تکمیل می‌شود. ایستگاه‌های جدید در شرایطی ساخته می‌شود که ایستگاه‌های فعلی تمام تقاضا را به‌صورت کامل پوشش ندهد.

$$DS = TVN_{BEV} \times SPV \qquad (۲۰-۳)$$

تعداد مطلوب ایستگاه‌های شارژ BEV (DS) به تعداد ایستگاه‌های لازم در تهران، به‌طوری‌که رانندگان BEV بتوانند به‌راحتی نقاط شارژ را پیدا کنند و به مدت طولانی در صف منتظر نمانند، اشاره دارد. در رابطه‌ی فوق، نسبت مطلوب ایستگاه به ازای هر خودرو (SPV) به تعداد ایستگاهی که باید به ازای هر خودرو در دسترس باشد تا زیرساخت‌ها کافی و مناسب باشند، اشاره دارد.

تعداد ایستگاه‌های شارژ (NS)، از جمع تعداد ایستگاه‌های شارژ موجود (NCS) و تعداد ایستگاه‌هایی که قصد ساخت آن‌ها را داریم (NPC)، به دست می‌آید. اختلاف تعداد ایستگاه‌های شارژ و تعداد ایستگاه‌های مطلوب بیانگر متغیر فاصله (Gap) است. از تقسیم فاصله بر پارامتر تأخیر برنامه‌ریزی (PD)، تعداد ایستگاه‌هایی که باید در سال ساخته شوند (PC)، مشخص می‌گردد. تعداد ایستگاه‌هایی که قصد ساخت آن‌ها را داریم (NPC) نیز یک متغیر انباشت است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$NPC(t) = NPC(\mathrm{t} - \mathrm{dt}) + (\mathrm{PC} - \mathrm{C}) \times \mathrm{dt} \qquad (۲۱-۳)$$

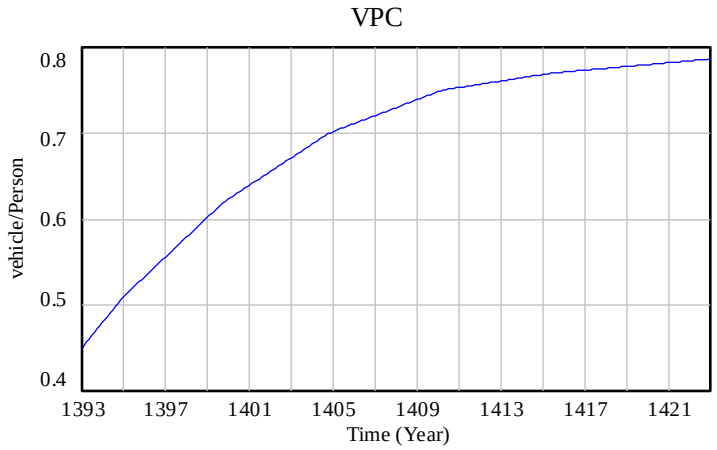
همچنین باید توجه شود فاصله‌ی بین تعداد مطلوب ایستگاه‌ها و تعداد موجود ایستگاه‌ها ممکن است آن‌قدر بزرگ باشد که به دلیل محدودیت بودجه ساخت آن غیرممکن باشد. این مسئله به کمک منحنی محدودیت (LimCurve) در مدل در نظر گرفته شده است. این منحنی با توجه به تعداد ایستگاه موردنیاز جهت ساخت در سال (NC) و پارامتر حداکثر ایستگاه قابل ساخت در سال (MC)، تعداد ایستگاه‌های قابل ساخت در سال (C) را مشخص می‌کند. تعداد ایستگاه موردنیاز جهت ساخت در سال (NC) نیز از تقسیم تعداد ایستگاه‌هایی که قصد ساخت آن‌ها را داریم بر پارامتر تأخیر ساخت (CD) به دست می‌آید.

۳-۲-۶ تخمین پارامترها و مفروضات

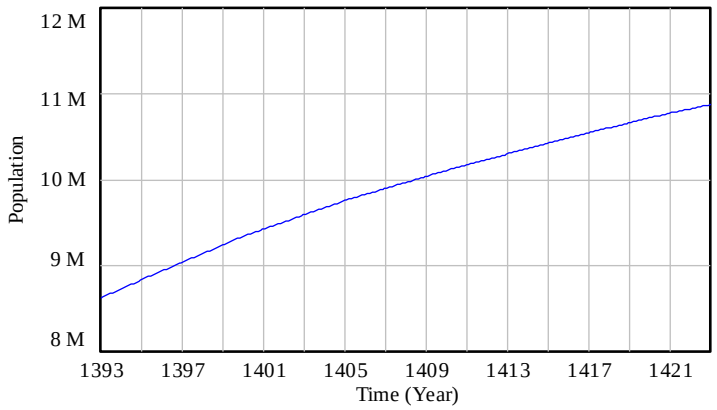
واحد زمانی مدل سال و افق آن از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۲۳ انتخاب شده است تا اثرات مستقیم،

غیرمستقیم و دارای تأخیر متغیرها و بازخورد آن‌ها را نشان دهد. گام زمانی نیز ۰/۱۲۵ سال در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه متغیر انباشت تعداد کل خودرو نوع i (TVN_i) و سرانه خودرو بر اساس اطلاعات واقعی که از آمار سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران استخراج‌شده، منظور شده است [۳۸]. تقاضای خودرو کل به عواملی مانند جمعیت، قیمت خودرو، قیمت کالای جانشین و مکمل، درآمد سرانه و ثروت افراد بستگی دارد. با این‌حال در مدل، تقاضا تابعی از جمعیت و سرانه‌ی خودرو در نظر گرفته شده است. سرانه‌ی خودرو و جمعیت متغیرهایی دینامیکی هستند و به‌مرور زمان تغییر می‌کنند. ما در این پایان‌نامه سرانه‌ی خودرو را به‌صورت شکل ۳-۷ فرض کرده‌ایم. جمعیت تهران (حدود ۱۱ درصد جمعیت کشور) در سه دهه‌ی آینده نیز بر اساس پیش‌بینی‌های جمعیتی سازمان ملل (سناریوی رشد جمعیت ثابت) برآورد شده است [۳۹] که در شکل۳-۸ مشاهده می‌شود.

قیمت خرید BEV و HEV با توجه به دو نوع پرفروش این خودروها یعنی نیسان لیف برای BEV و تویوتا پریوس برای HEV تعیین شده است. قیمت مدل سال ۲۰۱۴ این دو نوع خودروها با توجه به قیمت عرضه توسط سازنده (۲۸۹۸۰ دلار برای نیسان لیف و ۱۹۰۸۰ دلار برای تویوتا پریوس)، ۱۰٪ هزینه‌ی حمل‌ونقل، سود بازرگانی صفر و حقوق گمرکی ۴٪، مالیات بر ارزش افزوده‌ی ۸٪ و ارز آزاد تعیین شده‌اند. قیمت CV نیز به‌طور متوسط ۴۰۰ میلیون ریال فرض شده است. دامنه‌ی رانندگی BEV و HEV نیز بر مبنای این دو خودرو به ترتیب ۱۳۵ و ۷۶۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. دامنه‌ی مطلوب برای مصرف‌کنندگان هم ۳۰۰ کیلومتر فرض شده است.



شکل ۳-۷: سرانه خودرو



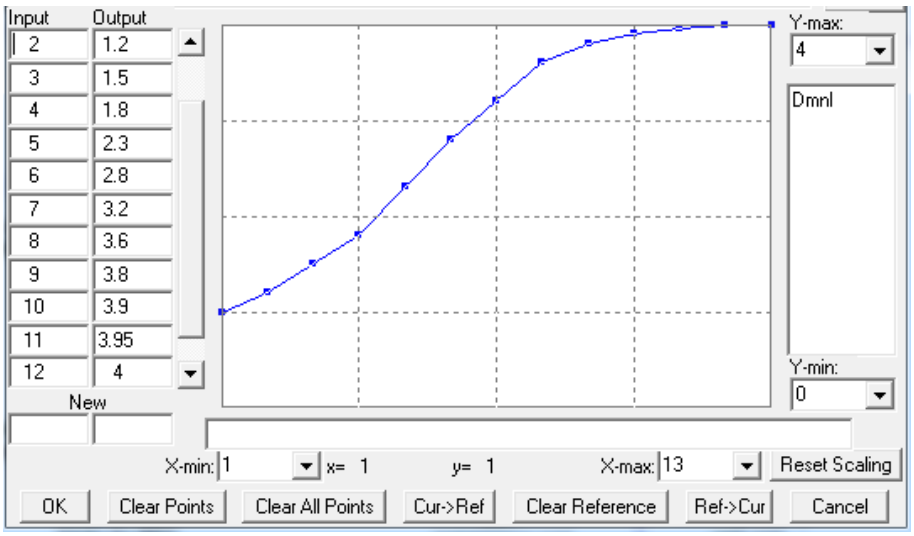
شکل ۳-۸: پیش‌بینی جمعیت تهران

به‌طور کلی سه سطح شارژ استاندارد بر اساس توان برای خودروهای الکتریکی وجود دارد. در سطح ۱، با استفاده از برق شهری و با توان شارژ ۳ کیلووات و در سطح ۲، با استفاده از برق سه فاز و توان ۲۴ کیلووات می‌توان یک باتری ۲۴ کیلووات ساعتی را به ترتیب در هشت ساعت و یک ساعت شارژ کرد. در سطح ۳ که به سطح شارژ سریع معروف است، با استفاده از برق جریان مستقیم می‌توان این زمان را به ۲۰-۳۰ دقیقه کاهش داد [۴۰].

از شارژرهای سطح ۱ معمولاً به‌عنوان شارژ خانگی و در حالتی که خودرو در حال استفاده نیست (معمولاً به‌صورت شبانه)، استفاده می‌شود. شارژرهای سطح ۲، در خانه، پارکینگ‌های بزرگ و مراکز خرید قابل‌استفاده است. از شارژرهای سطح ۳ نیز برای شارژ سریع باتری و در ایستگاه‌های شارژ سریع عمومی استفاده می‌شود. شارژ طولانی معمولاً زمانی مورداستفاده قرار می‌گیرد که خودرو در

حال سکون و عدم استفاده باشد، درحالی‌که شارژ سریع بیش‌تر در حالت بهره‌برداری خودرو مورداستفاده قرار می‌گیرد. در مدل، مطلوبیت زمانی خودرو در طول بهره‌برداری مدنظر قرار دارد. بنابراین برای تخمین زمان شارژ BEV، ایستگاه‌های شارژ سریع عمومی مدنظر قرار گرفته‌اند. با توجه به ظرفیت ۲۴ کیلوواتی باتری نیسان لیف، زمان سوخت‌گیری BEV به‌طور میانگین یک ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است نقاط شارژ به‌صورت یکسان در تهران توزیع شده‌اند.

در ضمن اثر زیرساخت‌ها ($InfE$) بر مطلوبیت زمانی، به کمک تابع تأثیر مدل شده است که در شکل۳-۹ قابل‌مشاهده است.



شکل ۳-۹: تابع تأثیر زیرساخت بر مطلوبیت زمانی BEV

$$InfE = F\left(\frac{TVN_{BEV}/\mathrm{NCS}}{NR_{BEV}}\right) \qquad (۲۲-۳)$$

تابع تأثیر (F) به نمایش رابطه‌ی غیرخطی بین تعداد BEV و مطلوبیت زمانی کمک می‌کند. تعداد BEV مرجع به ازای هر ایستگاه (NR_{BEV})، تعداد نرمال و معمول BEV به ازای هر ایستگاه است. تعداد BEV به ازای هر ایستگاه از تقسیم تعداد کل BEV (TVN_{BEV}) بر تعداد ایستگاه‌های موجود (NCS) به دست می‌آید. اگر تعداد BEV به ازای هر ایستگاه از مقدار طبیعی بیش‌تر شود،

مطلوبیت زمانی تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرد. برای مثال، f(1) موقعیتی است که تعداد BEV به ازای هر ایستگاه برابر مقدار مرجع باشد. شکل ۳-۹ نشان می‌دهد که اگر تعداد BEV به ازای هر ایستگاه ۱۲ برابر بیش‌تر از مقدار مرجع باشد، زمان شارژ BEV به چهار برابر f(1) افزایش می‌یابد. وجود سطح اشباع برای منحنی به این دلیل است که با ناکافی بودن زیرساخت‌ها و افزایش زمان شارژ در ایستگاه‌های شارژ، رانندگان خودروهای خود را در مکان‌های دیگر مانند خانه یا پارکینگ‌های بزرگ (در صورت وجود)، شارژ می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر، زمان شارژ به‌هیچ‌وجه از یک مقدار مشخص بیش‌تر نمی‌شود. در ضمن زمان سوخت‌گیری HEV و CV حدود ۵ دقیقه در نظر گرفته شده است.

هزینه‌ی سوخت بر اساس قیمت‌های فعلی بنزین و برق تخمین زده شده است. مصرف سوخت CVs حدود ۸/۵ لیتر به ازای هر صد کیلومتر می‌باشد. قیمت فعلی بنزین در تهران به‌طور متوسط ۸۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. بنابراین هزینه‌ی سوخت CVs به ازای هر کیلومتر ۷۲۲/۵ریال می‌باشد. هزینه‌ی سوخت برای HEV با مصرف ۵ لیتر به ازای هر صد کیلومتر نیز ۴۲۵ریال خواهد بود. همچنین BEV به‌طور متوسط ۱۸/۵ کیلووات ساعت به ازای هر صد کیلومتر مصرف می‌کند. هزینه‌ی برق خانگی به‌طور متوسط ۵۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت است. بنابراین هزینه‌ی سوخت BEV به ازای هر کیلومتر ۹۲/۵ ریال خواهد بود. هزینه‌ی تعمیر و نگهداری نرمال شده برای CV، HEV و BEV به ترتیب ۱، ۰/۸ و ۰/۶ فرض شده است.

به ازای مصرف هر لیتر بنزین ۲۳۴۷/۷ گرم CO_2 منتشر می‌شود [۴۱]. بنابراین ضریب انتشار برای CV وHEV به ازای هر کیلومتر به ترتیب ۲۰۰ و ۱۱۷ گرم خواهد بود. همان‌طور که قبلاً بیان شد، اگرچه BEV عاری از آلایندگی است، اما در طول فرآیند تولید الکتریسیته مقدار معینی CO_2 منتشر می‌شود. مقدار این انتشار بستگی به منابع تأمین انرژی فرآیند تولید الکتریسیته دارد. سطح انتشار ناشی از BEV در کشورهای مختلف، متفاوت است زیرا آن‌ها از منابع انرژی متفاوتی استفاده می‌کنند. در ایران بر اساس آمار موجود در ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۱ [۳]، به ازای تولید هر کیلووات

ساعت برق از نیروگاه‌های حرارتی، به‌طور میانگین ۷۲۰ گرم CO_2 تولید می‌شود. همان‌طور که در بالا گفته شد، BEV به‌طور متوسط ۱۸/۵ کیلووات ساعت به ازای هر صد کیلومتر مصرف می‌کند. بنابراین با راندن یک کیلومتر BEV، ۱۳۳ گرم CO_2 وارد هوا می‌شود. از مقادیر فوق برای محاسبه‌ی ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای نرمالیزه شده انواع خودرو (NEF_i) استفاده می‌شود.

در بخش آشنایی مشتریان فرض شده است که تمام رانندگان در تهران با CVs آشنا هستند و CVs در مجموعه‌ی مدنظر تمام رانندگان وجود دارند. بنابراین، تمایل به در نظر گرفتن CV (WTC_{CV}) متغیری ثابت است و در طول شبیه‌سازی ۱۰۰ درصد می‌باشد. وزن مطلوبیت زمانی، قیمت خرید، هزینه‌ی سوخت، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری و انتشار به ترتیب ۰/۳، ۰/۴، ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۱ فرض شده است.

اثربخشی تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای الکتریکی (C_{EV}) و غیر الکتریکی (C_{NonEV}) به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۱۵ تعیین شده است [۱۲]. رانندگان خودروهای الکتریکی تأثیرگذاری بیش‌تری نسبت به رانندگان خودروهای غیر الکتریکی دارند، زیرا آن‌ها مستقیماً تکنولوژی خودرو برقی را تجربه کرده‌اند. بنابراین در این شرایط رانندگان خودروهای الکتریکی قدرت اقناع بیش‌تری نسبت به رانندگان خودروهای غیر الکتریکی دارند.

در واقعیت، تأثیر بازاریابی متغیری دینامیکی است و به بودجه‌ای که از فروش تأمین می‌شود، بستگی دارد. بااین‌وجود در مدل، فعالیت‌های بازاریابی (MAR) ثابت و برابر ۰/۰۱ فرض شده است [۱۲].

نسبت از دست دادن آگاهی (F_{AL}) یک درصد به ازای هر سال در نظر گرفته شده است. به‌عبارت‌دیگر، هر سال یک درصد از کسانی که با خودروهای الکتریکی آشنایی دارند، آن را از یاد می‌برند و از مجموعه‌ی مدنظرشان خارج می‌کنند.

تعداد اولیه‌ی ایستگاه‌های شارژ BEV، ۵۰ فرض شده است. نسبت ایستگاه مطلوب به ازای هر خودرو با توجه به زمان شارژ و در دسترس بودن ایستگاه‌ها ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. در واقعیت ممکن است شهرداری یا بخش‌های خصوصی ساخت ایستگاه‌ها را انجام دهند. بااین‌حال در مدل فرض شده است یک حد بالا برای تعداد حداکثر ایستگاه قابل ساخت در سال (MC) به دلیل محدودیت‌های بودجه و مکان ساخت وجود داشته باشد. این حد ۱۰۰ ایستگاه در سال در نظر گرفته شده است. تأخیر برنامه‌ریزی ۲ سال و تأخیر ساخت نیز یک سال فرض شده است.

۳-۳ اثرات خودروهای الکتریکی

برای افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی، سیاست‌گذاران باید از پیامدها و مزایای آن‌ها آگاهی داشته باشند. در این بخش ما دو پیامد بلندمدت اصلی خودروهای الکتریکی، یعنی اثرات بر بخش انرژی و اثرات زیست‌محیطی را موردبررسی قرار می‌دهیم.

۳-۳-۱ اثر خودروهای الکتریکی بر بخش انرژی

در این بخش، با توجه به ورود خودروهای الکتریکی به ناوگان حمل‌ونقل شهر تهران، تغییرات صورت گرفته در بخش انرژی بررسی می‌گردد. ابتدا، توان الکتریکی موردنیاز خودروهای الکتریکی برآورد می‌شود و سپس مقدار کاهش مصرف بنزین بخش حمل‌ونقل، در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی، بررسی می‌شود.

ازآنجاکه در این پایان‌نامه آثار بلندمدت خودروهای الکتریکی موردبررسی قرار می‌گیرد، توان الکتریکی موردنیاز آن‌ها به‌صورت سالانه در افق زمانی شبیه‌سازی پیش‌بینی می‌گردد. توان الکتریکی موردنیاز سالانه‌ی خودروهای الکتریکی (D_{Elec})، علاوه بر تعداد کل آن‌ها، تابعی از مصرف و پیمایش سالانه‌ی رانندگان با آن‌ها نیز می‌باشد.

$$D_{Elec} = TVN_{BEV} \times FE_{BEV} \times AM \quad (۲۳-۳)$$

تعداد BEV (TVN_{BEV}) و نحوه‌ی پیش‌بینی آن، در بخش قبل شرح داده شد. همچنین، همان‌طور که قبلاً بیان شد، مصرف BEV به ازای هر کیلومتر (FE_{BEV}) ۰/۱۸۵ کیلووات ساعت می‌باشد. پیمایش سالانه برای افراد مختلف متفاوت می‌باشد. بااین‌حال ما از مقدار متوسط پیمایش سالانه (AM) برای محاسبه‌ی توان الکتریکی موردنیاز استفاده کرده‌ایم. متوسط پیمایش سالانه برای خودروها در تهران، ۲۰ هزار کیلومتر در سال در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه‌ی مقدار کاهش مصرف بنزین بخش حمل‌ونقل که در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی، ایجاد می‌شود، مصرف بنزین با این فرض که تمام خودروها در تهران CV باشند (GC_1)، برآورد می‌شود. مصرف بنزین در حالتی که خودروهای الکتریکی نیز در ناوگان حمل‌ونقل وجود دارند (GC_2)، محاسبه می‌گردد. اختلاف این دو، مقدار کاهش مصرف بنزین (GCR) را در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی مشخص می‌کند.

$$GCR = GC_1 - GC_2 \quad (۲۴-۳)$$

$$GC_1 = TVN \times FE_{CV} \times AM \quad (۲۵-۳)$$

$$GC_2 = (TVN_{CV} \times FE_{CV} + TVN_{HEV} \times FE_{HEV} + TVN_{BEV} \times FE_{BEV}) \times AM \quad (۲۶-۳)$$

FE_{CV} و FE_{HEV} به ترتیب بیانگر مقدار مصرف سوخت CV و HEV به ازای یک کیلومتر است.

۳-۳-۲ اثرات زیست‌محیطی خودروهای الکتریکی

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، اکثر محققان ادعا می‌کنند که خودروهای الکتریکی ممکن است راه‌حلی مؤثر برای مشکلات زیست‌محیطی باشند. بااین‌حال، این امر وابستگی زیادی به تعداد خودروهای الکتریکی و روش تولید الکتریسیته دارد. بخش اثرات زیست‌محیطی، مزایایی که در اثر

استفاده از خودروهای الکتریکی ایجاد می‌شود را ارزیابی می‌کند. این مزایا در اثر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و گازهای آلاینده به وجود می‌آید.

انواع مختلفی از گازهای گلخانه‌ای از صنعت حمل‌ونقل به وجود می‌آید. CO_2، متان (CH_4)، اکسید نیتروز (N_2O)، گازهای گلخانه‌ای مستقیم و مونواکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و ترکیبات آلی فرار غیر متان[۱] (NMVOC) از گازهای گلخانه‌ای غیرمستقیم به شمار می‌روند. آلاینده‌های هوا نیز شامل CO، NO_x، اکسیدهای گوگرد (SO_x)، هیدروکربن‌های نسوخته، ترکیبات آلی فرار (VOC) و ذرات معلق[۲] (SPM) می‌باشند.

در این پایان‌نامه، برای برآورد اثرات زیست‌محیطی خودروهای الکتریکی، از گازهای گلخانه‌ای فقط CO_2 در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا تولید آن بسیار بیش‌تر از سایر گازهاست و مهم‌ترین نقش را در ارتباط با تغییرات آب‌وهوایی دارد. از میان گازهای آلاینده‌های نیز به‌جز VOC، بقیه را در ارزیابی مدنظر قرار داده‌ایم.

اثر خودروهای الکتریکی بر محیط زیست با توجه به تغییرات صورت گرفته در بخش انرژی مشخص می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هرگونه تغییر در انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای، در اثر تغییر در سهم انواع انرژی در بخش حمل‌ونقل رخ می‌دهد؛ بنابراین با محاسبه‌ی مقدار کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در اثر کاهش مصرف بنزین و افزایش آن به دلیل توان الکتریکی افزوده‌شده به بخش تولید برق، می‌توان اثر خودروهای الکتریکی بر انتشار انواع گاز را محاسبه نمود. روش محاسبه‌ی مقدار کاهش انتشار گاز نوع i (ER_i) در رابطه‌ی (۳-۲۷) آمده است.

$$ER_i = E_i^{GCR} - E_i^{D_{Elec}} \qquad (۳-۲۷)$$

[۱] Non Methane Volatile Organic Compounds

[۲] Suspended Particulate Matter

در رابطه‌ی فوق، E_i^{GCR} مقدار کاهش انتشـــار گاز نوع i در اثر کاهش مصـــرف بنزین و $E_i^{D_{Elec}}$ مقدار افزایش انتشـار گاز نوع i در اثر توان الکتریکی افزوده‌شده به شبکه‌ی برق می‌باشد که از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$E_i^{GCR} = GCR \times EF_i^G \quad (۲۸-۳)$$

$$E_i^{D_{Elec}} = D_{Elec} \times EF_i^E \quad (۲۹-۳)$$

در روابط فوق، EF_i^G و EF_i^E بـه ترتیـب بیانگر مقدار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ای اســـت که در اثر سـوختن یک لیتر بنزین و تولید یک مگاوات برق منتشـر می‌شود. ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ای برای بنزین و برق در جدول ۳-۱ آمده است.

جدول ۳-۱: ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده برای بنزین و برق

نوع سوخت/گاز	NO_x	SO_x	CO	SPM	CO_2
بنزین (گرم بر لیتر)	*۳۱/۶۳	*۰/۴	*۶۶/۷	*۱/۳۴	**۲۳۴۸/۶
برق (گرم بر کیلووات ساعت)***	۲/۶۲۵	۳/۴۵۷	۰/۰۲۲	۰/۶۷۵	۷۱۹/۴۶۸

* مرجع [۳]، ** مرجع [۴۱]، ***مرجع [۴۲]

منافع حاصل از کاهش هزینه‌های اجتماعی: هزینه‌های اجتماعی یا اثرات خارجی منفی، بیانگر هزینه‌های اثرات مخرب یک آلاینده بر محیط زیسـت و سـلامت انسـان اسـت. به‌بیان‌دیگر، به مجموع پولی که بتواند صـدمات ناشـی از انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ی را جبران کند، هزینه‌های اجتماعی گفته می‌شـود. برای محاسبه‌ی هزینه‌های اجتماعی، باید اثر آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای را کمّی نمود. در این راســـتا، بر اســـاس مطالعات بانک جهانی و ســـازمان حفاظت از محیط زیســـت، هزینه‌های اجتماعی انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای مطابق جدول ۳-۲ می‌باشد.

جدول ۳-۲: هزینه‌های اجتماعی انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به قیمت‌های سال ۸۱

نوع گاز	NO_x	SO_x	CO	SPM	CO_2
هزینه (هزار ریال بر تن)	۴۸۰۰	۱۴۶۰۰	۱۵۰۰	۳۴۴۰۰	۸۰

بر اساس مطالعات بانک جهانی و سازمان حفاظت از محیط زیست [۳]

لازم به ذکر است که برای تبدیل قیمت‌های سال ۸۱ به سال ۹۳، از نرخ تورم سالانه‌ی اعلام‌شده توسط بانک مرکزی استفاده می‌نماییم [۴۳].

با توجه به مقادیر فوق می‌توان منافع ناشی از استفاده از خودروهای الکتریکی را ارزیابی نمود. این منافع از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده و درنتیجه کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی می‌شود؛ بنابراین باید از مقدار کاهش انتشار گاز نوع i (ER_i) استفاده نمود.

$$SCR_i = ER_i \times SC_i \qquad (۳۰-۳)$$

در رابطه‌ی فوق، SC_i و SCR_i به ترتیب هزینه‌ی اجتماعی گاز نوع i و کاهش هزینه‌ی اجتماعی گاز نوع i در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی می‌باشد. کاهش هزینه‌های اجتماعی کل که در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی ایجاد می‌شود، از جمع کاهش هزینه‌ی اجتماعی ناشی از تمام گازها به دست می‌آید.

۳-۴ جمع‌بندی

در این فصل یک مدل شبیه‌سازی دینامیک با کمک روش دینامیک سیستم ارائه گردید. مدل ارائه‌شده شامل ۵ بخش ناوگان خودروها، بازار خودروها، جذابیت خودروها، آشنایی مشتریان و زیرساخت‌ها بود که هریک با جزئیات شرح داده شد. تخمین پارامترها و مفروضات مدل نیز در این فصل بیان شد. در ادامه تغییرات بخش انرژی، یعنی روش محاسبه‌ی توان الکتریکی موردنیاز و کاهش مصرف بنزین، در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی شرح داده شد و در انتها هزینه‌های خارجی استفاده از خودروهای الکتریکی محاسبه گردید.

مدل ساخته شده در این فصل، برای بررسی عوامل مؤثر بر انتشار خودروهای الکتریکی و اثرات اعمال سیاست‌های مختلف، مورداستفاده قرار می‌گیرد که در فصل بعد به آن خواهیم پرداخت.

فصل چهارم

عوامل مؤثر بر
انتشار خودروهای الکتریکی
و
رویکردهای تشویقی

۴-۱ مقدمه

در این فصل، با استفاده از مدل ایجادشده در فصل قبل، الگوهای محتمل انتشار خودروهای الکتریکی برای تهران تحت سناریوهای مختلف بررسی خواهد شد. این سناریوها با توجه به عوامل اجتماعی- اقتصادی، دولتی، تکنولوژیکی و تعامل آن‌ها با یکدیگر توسعه داده شده‌اند. با بررسی سناریوها و نتایج آن، کیفیت تأثیر عوامل مختلف بر انتشار خودروهای الکتریکی مشخص خواهد گردید. سپس با شناخت عوامل اثرگذار، سیاست‌هایی برای افزایش فروش خودروهای الکتریکی پیشنهاد داده می‌شود. این فصل به سیاست‌گذاران بخش حمل‌ونقل برای درک این‌که چگونه رفتار کنند یا چه اقداماتی انجام دهند تا فرآیند پذیرش خودروهای الکتریکی تسریع شود، کمک می‌کند. لازم به ذکر است که تمام محاسبات در این فصل بر مبنای ارزش ریال در سال ۱۳۹۳ می‌باشد.

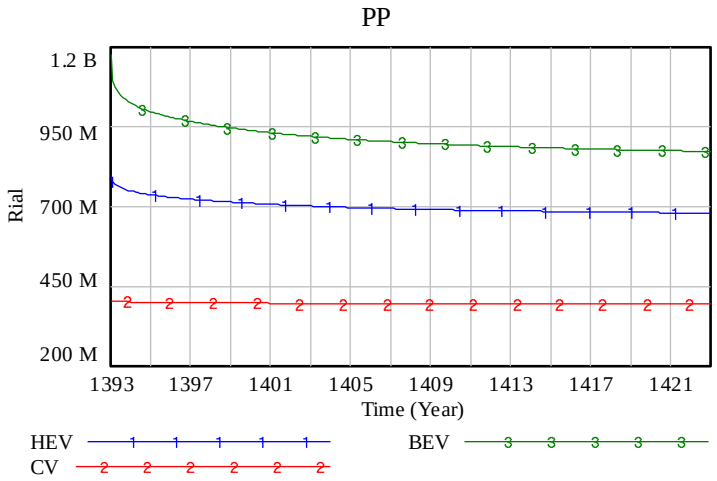
۴-۲ بررسی عوامل تأثیرگذار بر انتشار خودروهای الکتریکی

برای شناخت عوامل مؤثر بر انتشار خودروهای الکتریکی در این بخش با استفاده از سناریوهای مختلف، سهم بازار هر خودرو را در طول افق زمانی شبیه‌سازی پیش‌بینی می‌نماییم.

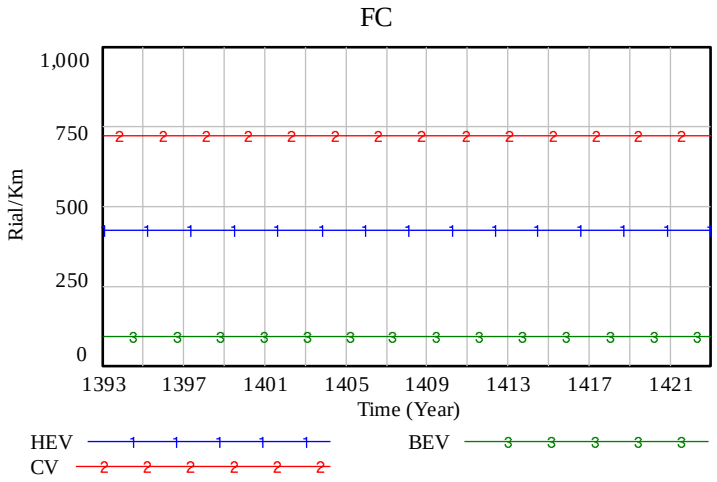
۴-۲-۱سناریو مبنا

در سناریو مبنا، فرض می‌شود که روند فعلی بدون تغییر اساسی ادامه یابد. به‌عبارت‌دیگر تمام پیشرفت‌های تکنولوژیکی، قیمت‌ها، هزینه‌ها و قوانینی که در فصل قبل بیان شد، طبق مسیر پذیرفته‌شده‌ی کلی باشد. در این سناریو، دامنه رانندگی و زمان شارژ BEV به‌مرور زمان بهبود می‌یابد و از قیمت خرید انواع خودرو کاسته می‌شود. همچنین فرض شده است که تغییرات قیمت بنزین و برق به یک اندازه مطلوبیت خودروهای بنزینی و برقی را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ بنابراین در این سناریو، از تغییرات قیمتی بنزین و برق صرف‌نظر شده است. قیمت خرید، قیمت سوخت، زمان سوخت‌گیری و دامنه‌ی رانندگی انواع خودرو که در بخش جذابیت خودروها استفاده شده است، به

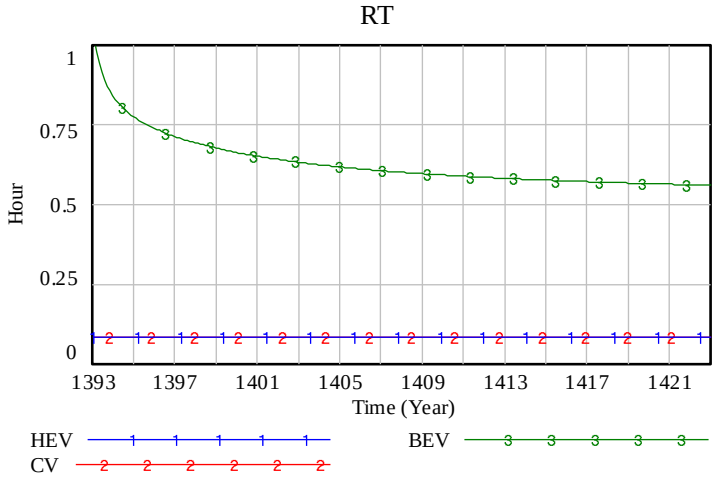
ترتیب در شکل ۴-۱ تا شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود.



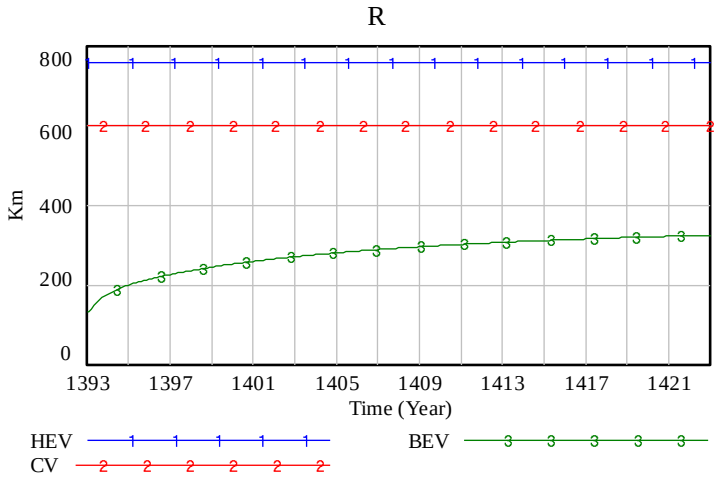
شکل ۴-۱: قیمت خرید انواع خودرو در سناریو مبنا



شکل ۴-۲: قیمت سوخت انواع خودرو به ازای هر کیلومتر در سناریو مبنا



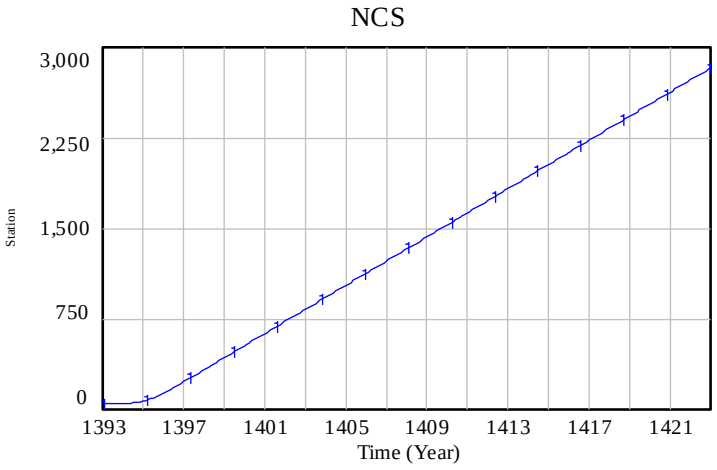
شکل ۴-۳: زمان سوخت‌گیری انواع خودرو در سناریو مبنا



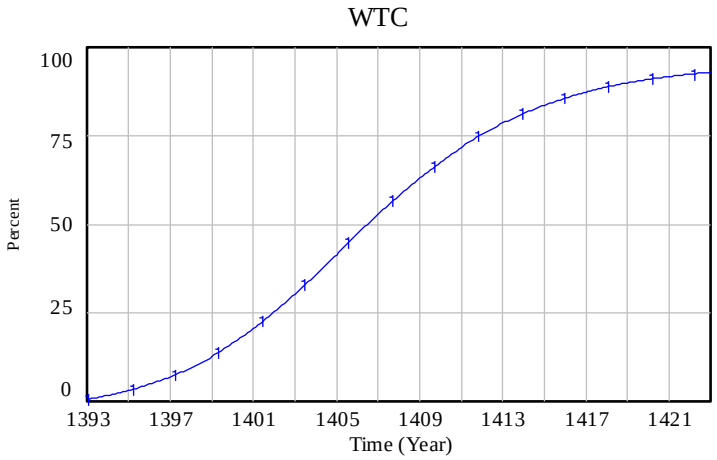
شکل ۴-۴: دامنه‌ی رانندگی انواع خودرو در سناریو مبنا

تعداد ایستگاه‌های شارژ BEV که در طول سال‌های موردمطالعه به بهره‌برداری می‌رسد، در شکل ۴-۵ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد ایستگاه‌ها تقریباً به‌صورت خطی و با نرخ ۱۰۰ ایستگاه در سال افزایش می‌یابد. دلیل این امر، محدودیتی است که برای حداکثر تعداد ایستگاه قابل ساخت در سال (MC) در مدل در نظر گرفته‌ایم.

تمایل به در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی نیز در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. این متغیر یک الگوی رفتاری S شکل دارد. در ابتدا تقریباً کسی با خودروهای الکتریکی آشنایی ندارد و برای خرید، آن‌ها را در نظر نمی‌گیرد، ولی در اواخر دوره‌ی شبیه‌سازی، تقریباً تمام رانندگان در تهران خودروهای الکتریکی را برای خرید در نظر می‌گیرند. تمایل به خرید خودروهای الکتریکی در ابتدای شبیه‌سازی به‌کندی افزایش می‌یابد زیرا تعداد مصرف‌کنندگان خودروهای الکتریکی کم است. به‌علاوه در ابتدا، تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان CV در مورد خودروهای الکتریکی اطلاعات کافی ندارند؛ بنابراین در چند سال ابتدایی اطلاعات درباره‌ی خودروهای الکتریکی به‌کندی منتشر می‌شود. بعد از مدتی، سرعت رشد تمایل به در نظر گرفتن افزایش می‌یابد، زیرا تعداد مصرف‌کنندگان خودروی غیر الکتریکی که با خودروی الکتریکی آشنا می‌شوند و مصرف‌کنندگان خودروهای الکتریکی بیش‌تر می‌شوند. این افراد با راندن خودروهای الکتریکی، صحبت درباره‌ی آن‌ها، اشاره به آن‌ها در اینترنت و ... باعث می‌شوند افراد بیش‌تری با خودروهای الکتریکی آشنا شوند.

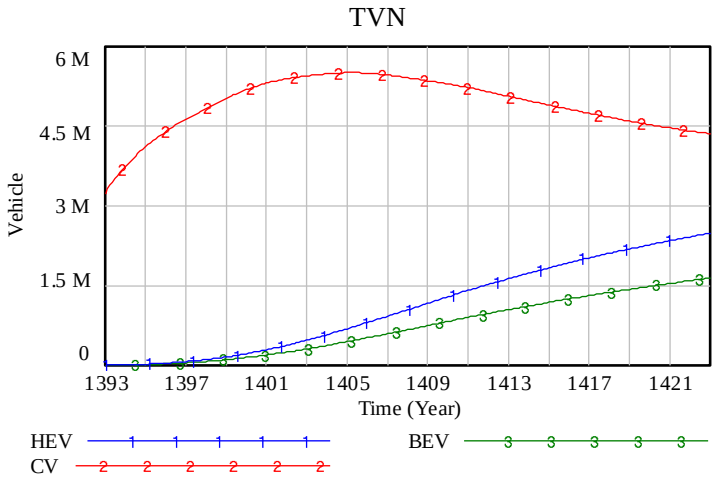


شکل ۴-۵: تعداد ایستگاه‌های شارژ در سناریو مبنا

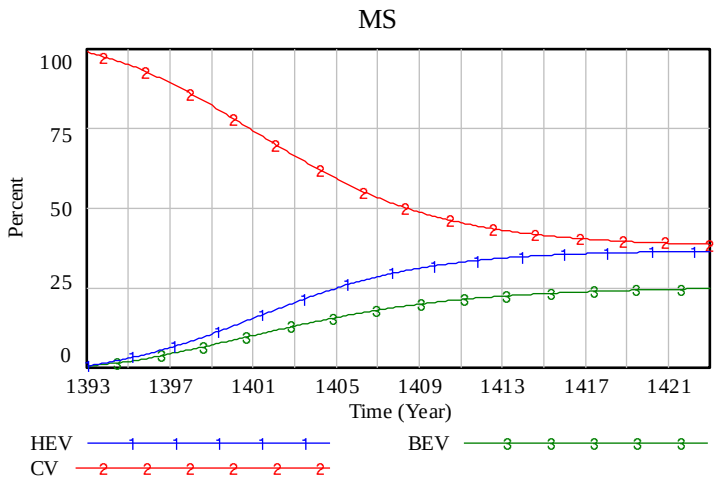


شکل ۴-۶: تمایل به در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی در سناریو مبنا

تعداد کل انواع خودرو در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد کل خودروهای CV تا سال ۱۴۰۵ افزایش می‌یابد که علت آن افزایش سرانه‌ی خودرو است. بعدازآن، تعداد این خودروها به دلیل افزایش فروش خودروهای الکتریکی، کاهش می‌یابد. سهم بازار که بیانگر سهم سالانه‌ی هر نوع خودرو از کل فروش بازار خودرو است، در شکل ۴-۸ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان فروش BEV و HEV همیشه در طول دوره‌ی شبیه‌سازی از فروش CV پایین‌تر است. بعد از سه دهه، درحالی‌که CV حدود ۳۸/۷ درصد سهم بازار فروش را به خود اختصاص می‌دهد، سهم فروش HEV و BEV به ترتیب ۳۶/۵ و ۲۴/۸ درصد خواهد بود.



شکل ۴-۷: تعداد کل انواع خودرو در سناریو مبنا

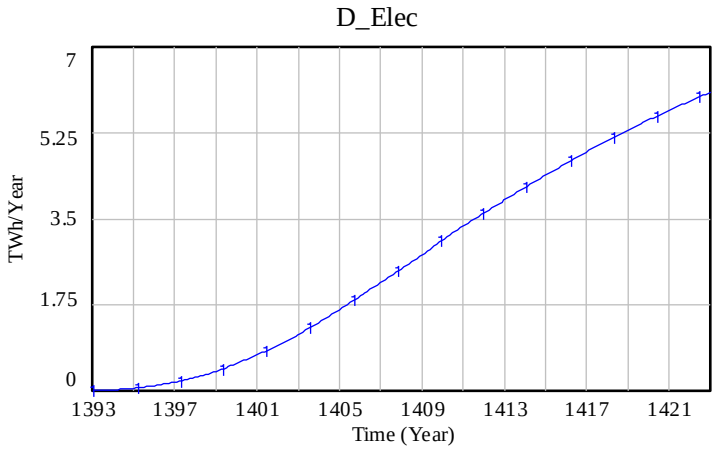


شکل ۴-۸: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو مبنا

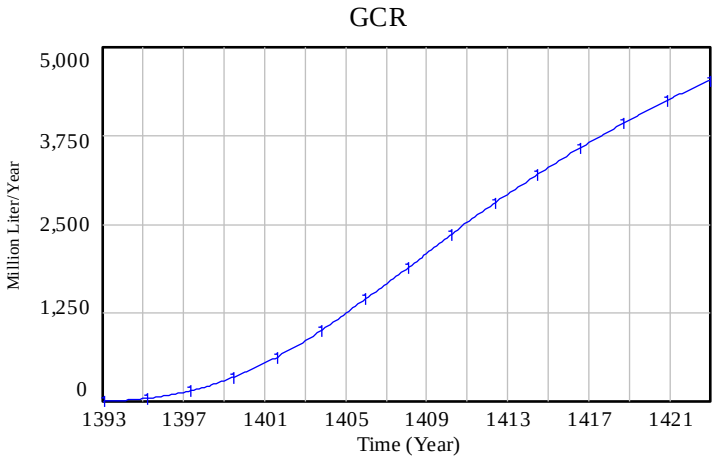
دو علت برای پایین‌تر بودن فروش خودروهای الکتریکی نسبت به خودروهای درون‌سوز، حتی بعد از سه دهه، وجود دارد. اولاً، باوجود افزایش سطح آگاهی و درنتیجه افزایش مشتریان بالقوه، همیشه افرادی وجود دارند که با خودروهای الکتریکی آشنایی ندارند (شکل ۴-۶). این مشتریان، به دلیل در دسترس نبودن انتخاب‌های دیگر، CV را خریداری می‌کنند. همچنین، تعداد افراد ناآشنا با خودروهای الکتریکی در سال‌های ابتدایی شبیه‌سازی بسیار زیاد است؛ بنابراین فروش خودروهای الکتریکی نیز در ابتدا کم است. دومین دلیل این است که اگرچه BEV و HEV مزایای زیادی نسبت به CV دارند، اما در برخی ویژگی‌ها، باوجود بهبود تکنولوژی، کارایی آن‌ها نسبت به CVs کمتر باقی می‌ماند. برای مثال BEV و HEV درزمینه‌ی هزینه‌ی بهره‌برداری و انتشار آلودگی عملکرد بهتری

دارند. بااین‌حال دامنه رانندگی BEV، کمتر و زمان شـــارژ آن طولانی اســـت. همچنین قیمت خرید BEV و HEV نسـبت به CV بالاتر اسـت. به‌علاوه، سـهم HEV از بازار فروش نسبت به BEV بیشتر است. علت این مسئله قیمت خرید و زمان شارژ بیش‌تر و دامنه کم‌تر BEV نسبت به HEV است.

توان الکتریکی موردنیاز سـالانه‌ی خودروهای الکتریکی در شکل ۴-۹ آمده است. تقاضای برق در سال ۱۴۲۳ که تعداد BEV به $۱/۶۴۴\times۱۰^{۶}$ می‌رسد، حدود ۶۰۸۲ گیگاوات ساعت خواهد بود. این مقدار حدود ۲۱ درصـد فروش فعلی انرژی برق اسـتان تهران اسـت [۴۴]؛ بنابراین برای اسـتفاده از خودروهـای الکتریکی باید زیرســـاخت‌های لازم جهت تأمین این توان ایجاد گردد. کاهش ســـالانه‌ی مصرف بنزین در سناریوی مبنا نیز در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود.

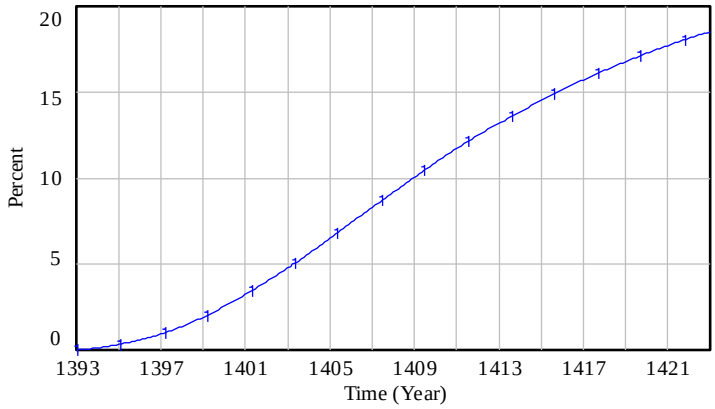


شکل ۴-۹: توان الکتریکی افزوده‌شده به شبکه‌ی برق در سناریو مبنا



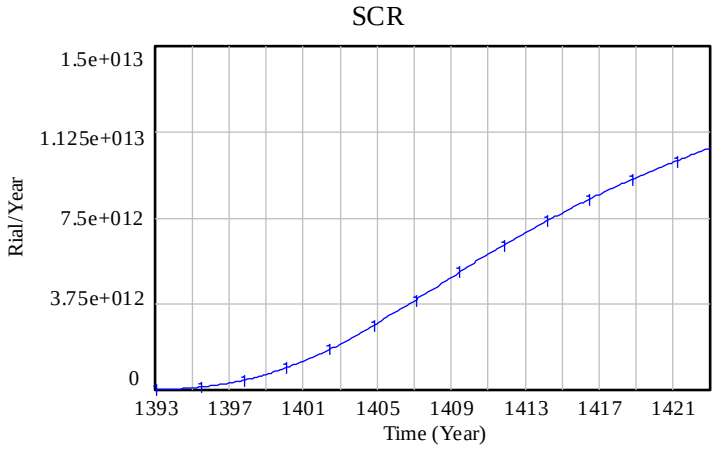
شکل ۴-۱۰: کاهش مصرف بنزین در سناریو مبنا

مسـئله‌ی مهم دیگر در مورد خودروهای الکتریکی، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی آن‌ها و مقدار کاهش سطح انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای است. برای نمونه، درصد کاهش انتشار CO_2 در شکل ۴-۱۱ آمده اسـت. در سـال ۱۴۲۳ انتشار CO_2 در بخش حمل‌ونقل ۱۸/۵ درصد کاهش خواهد یافت. به‌علاوه مقدار کاهش تجمعی CO_2 نیز در طول دوره‌ی شبیه‌سازی به $۸/۲۲\times۱۰^{۷}$ تن می‌رسد.



شکل ۴-۱۱: درصد کاهش انتشار CO_2 در سناریو مبنا

مقدار کاهش هزینه‌های اجتماعی که از کاهش انتشـار انواع گازهای گلخانه‌ای و آلاینده ایجاد می‌شود، در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. طبق این شکل، تنها در آخرین سال افق زمانی مطالعه، هزینـه‌هـای اجتماعی ناشـــی از گازهای آلاینده و گلخانه‌ای ۱۰/۵۵ هزار میلیارد ریال کاهش خواهد یافت.

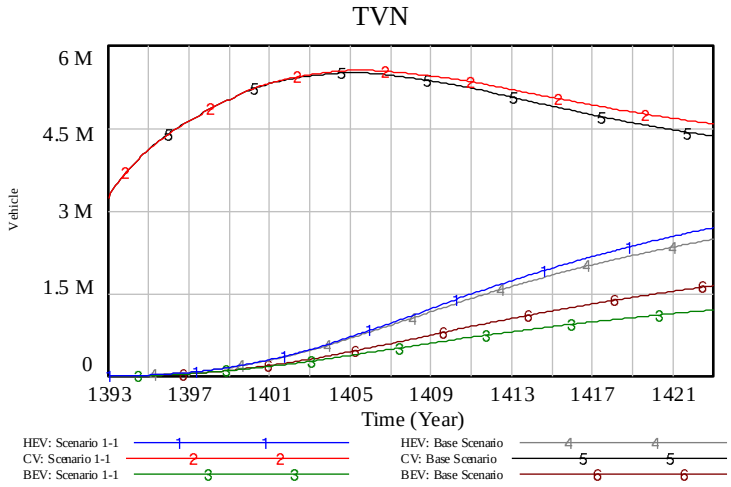


شکل ۴-۱۲: کاهش هزینه‌های اجتماعی در سناریو مبنا

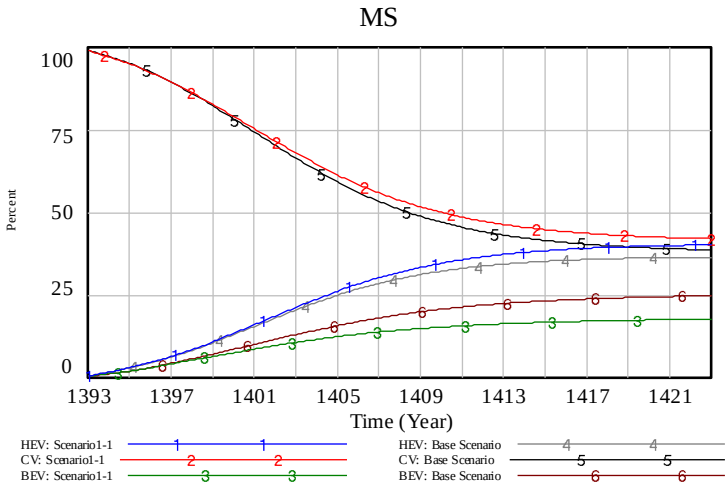
۴-۲-۲ توسعه‌ی تکنولوژیکی (سناریو ۱)

ویژگی‌های خودرو عوامل تأثیرگذاری بر اولویت‌های مصرف‌کنندگان در انتخاب خودرو هستند. اگرچه BEV مشخصات قابل‌رقابتی (مانند هزینه‌ی بهره‌برداری پایین و یا انتشار آلودگی کمتر) در مقایسه با CV و HEV دارند؛ به دلیل قیمت بالا، زیرساخت‌های ناکافی، دامنه رانندگی کم‌تر و زمان شارژ زیاد فروش کمتری دارند. تکنولوژی باتری BEV جزء تکنولوژی‌های نوین محسوب می‌شود و تحقیق و توسعه در سراسر جهان در حال انجام است تا عملکرد آن در آینده بهبود یابد. بااین‌حال، سطح این بهبود و زمان آن نامشخص است. از نظر قیمت خرید نیز، حدود یک‌سوم قیمت BEV مربوط به هزینه‌ی باتری آن است و پیش‌بینی می‌شود به‌مرور کاهش یابد؛ بنابراین عدم قطعیت زیادی در مورد قیمت و عملکرد BEV وجود دارد. به همین دلیل، در این سناریو، اثر روند بهبود تکنولوژی و کاهش قیمت بر فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی در دو حالت بررسی می‌گردد.

در حالت اول (سناریو ۱-۱) هیچ بهبودی در مشخصات BEV وجود ندارد و قیمت انواع خودرو نیز ثابت فرض می‌شود. سایر شرایط مانند سناریو مبنا است. تعداد کل و سهم بازار انواع خودرو در سناریوی ۱-۱ به ترتیب در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ آمده است.

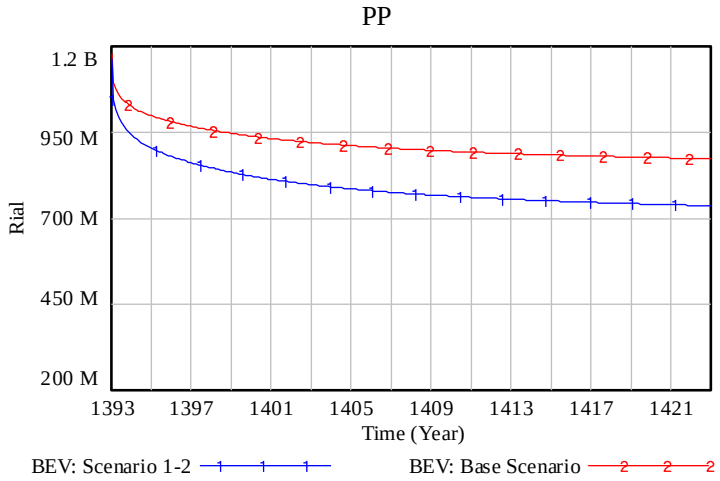


شکل ۴-۱۳: تعداد کل انواع خودرو در سناریو ۱-۱

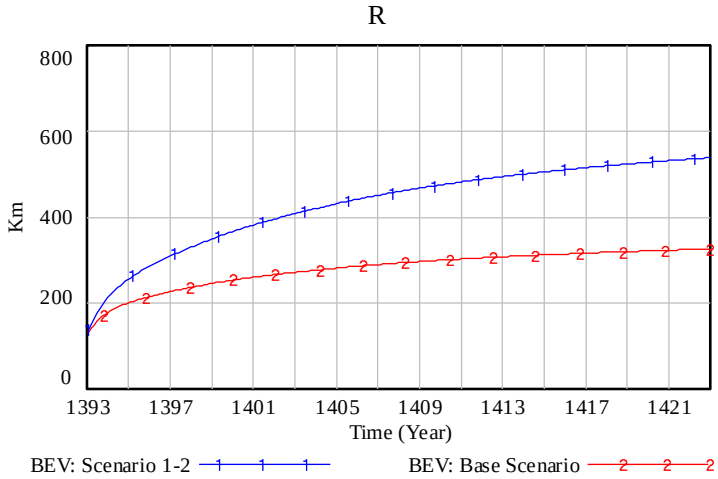


شکل ۴-۱۴: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو ۱-۱

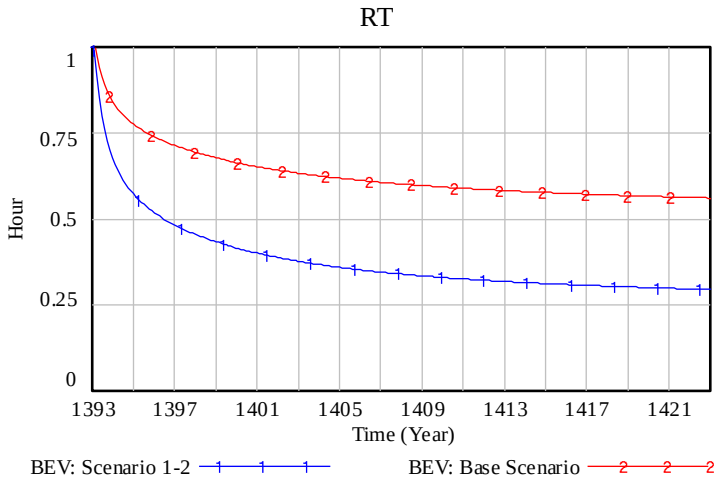
نتایج سناریو ۱-۱ نشان می‌دهد که حتی اگر هیچ بهبودی در تکنولوژی BEV و قیمت خرید صورت نگیرد، BEV حدود ۱۴/۲ درصد تعداد کل خودروها و ۱۷/۸ درصد سهم بازار فروش خودرو را تا سال ۱۴۲۳ به خود اختصاص می‌دهد. به‌علاوه، مشاهده می‌شود که اگر تکنولوژی BEV در سطح فعلی ثابت بماند، مشتریان بیش‌تری اقدام به خریداری HEV و CV می‌کنند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه BEV و HEV در گروه خودروهای الکتریکی هستند و CV رقیب آن‌ها محسوب می‌شود، این دو EV نیز با یکدیگر رقابت دارند که سیاست‌گذاران باید این مسئله را موردتوجه قرار دهند.



شکل ۴-۱۵: قیمت خرید BEV در سناریو ۱-۲



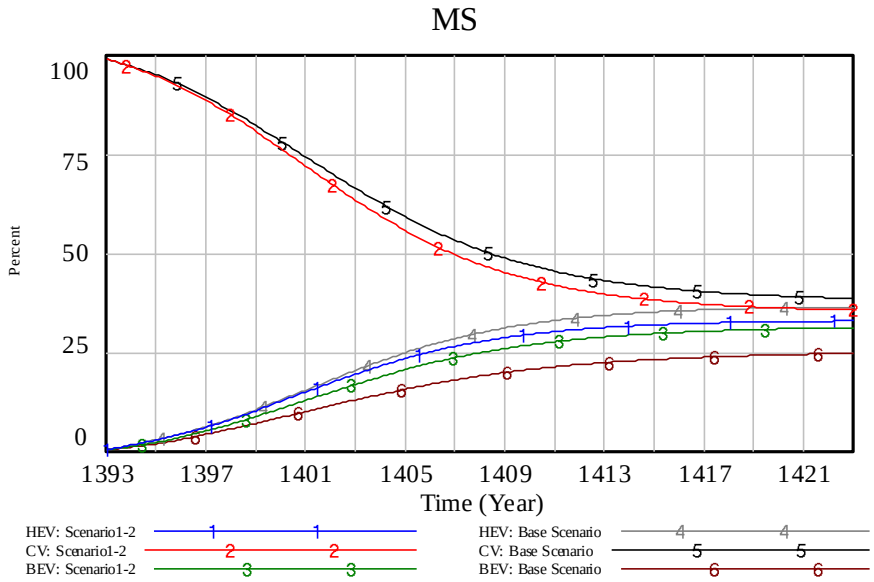
شکل ۴-۱۶: دامنه‌ی رانندگی BEV در سناریو ۱-۲



شکل ۴-۱۷: زمان سوخت‌گیری BEV در سناریو ۱-۲

در حالت دوم (سناریو ۱-۲) بهبود مشخصات BEV سرعت می‌یابد و قیمت خرید آن نیز کاهش بیش‌تری خواهد داشت. روند تغییرات قیمت خرید، دامنه‌ی رانندگی و زمان شارژ BEV در مقایسه با سناریو مبنا در شکل‌های ۴-۱۵ تا ۴-۱۶ آمده است.

چنانچه روند بهبود ویژگی‌های BEV به‌صورت فوق باشد، سهم بازار انواع خودرو نسبت به سناریوی مبنا مانند شکل ۴-۱۸ خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سناریو ۱-۲ سهم بازار BEV حدود ۶/۵ درصد نسبت به حالت مبنا، افزایش و سهم HEV و CV به ترتیب ۳/۵ و ۳ درصد کاهش خواهد یافت.



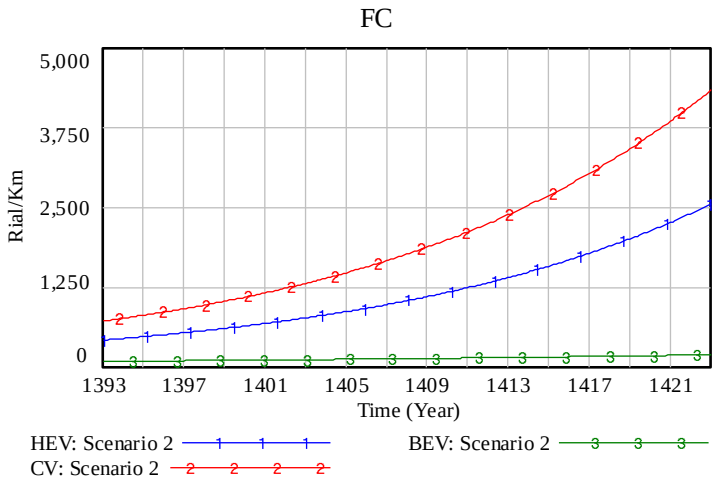
شکل ۴-۱۸: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو ۱-۲

۴-۲-۳ قیمت سوخت (سناریو ۲)

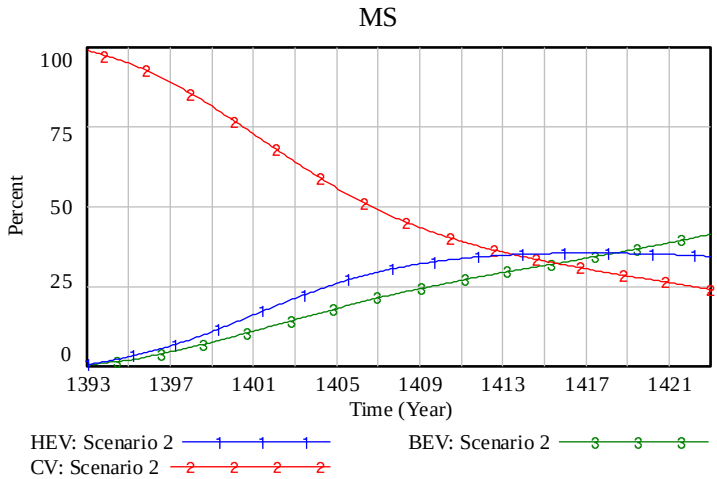
همان‌طور که می‌دانیم، BEV وسایل نقلیه‌ای با نیرومحرکه‌ی الکتریسیته هستند درحالی‌که HEV و CV از بنزین به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند. به همین دلیل، ممکن است قیمت بنزین و برق عوامل مؤثری در تصمیم‌گیری درباره‌ی نوع خودرو انتخابی باشند. بااین‌حال، قیمت برق و بنزین در آینده نامعلوم است؛ بنابراین بهتر است با توجه به روند تغییرات قیمت الکتریسیته و بنزین، فروش خودروهای الکتریکی را پیش‌بینی نماییم. در سناریو ۲ فرض می‌شود که قیمت بنزین در آینده نسبت به قیمت الکتریسیته افزایش بیش‌تری داشته باشد. در این شرایط، هزینه‌ی سوخت خودرو به ازای هر کیلومتر در شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌شود. قیمت بنزین در این سناریو در اواخر دوره‌ی شبیه‌سازی به لیتری ۵۰ هزار ریال و قیمت برق به هزار ریال به ازای هر کیلووات ساعت خواهد رسید.

سهم بازار انواع خودرو در سناریو ۲ در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قیمت بنزین و درنتیجه کاهش مطلوبیت هزینه‌ی بهره‌برداری CV، فروش آن‌ها نسبت به حالت عادی کاهش شدیدی می‌یابد. همچنین ازآنجایی‌که هزینه‌ی سوخت HEV نیز افزایش می‌یابد، انتظار داریم فروش آن کاهش یابد؛ اما فروش آن در سال‌های اولیه نه‌تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه کمی

افزایش نیز دارد. علـت این اتفـاق این اســـت که باوجود کاهش مطلوبیت هزینه‌ی بهره‌برداری HEV، مطلوبیت کلی این خودرو هنوز نســبت به BEV بیش‌تر اســت (به دلیل دامنه بیش‌تر، قیمت خرید و زمان سوخت‌گیری کمتر و زیرساخت‌های کافی HEV)؛ بنابراین همچنان می‌تواند با BEV رقابت کند. نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که به‌مرور زمان با زیاد شدن فاصله‌ی بین هزینه‌ی سوخت HEV و BEV، ســرعت رشــد فروش HEV کاهش می‌یابد و حتی در اواخر دوره‌ی شــبیه‌ســازی روند نزولی به خود می‌گیرد؛ بنابراین چنانچه شـــکاف هزینه‌ی بهره‌برداری BEV و HEV به‌اندازه‌ی کافی زیاد باشد، باوجود نواقصی که BEV دارد، می‌تواند مطلوبیت و درنتیجه فروش بیش‌تری نسبت به انواع دیگر خودرو داشته باشد. واضح است که فروش BEV در این سناریو افزایش قابل‌توجهی داشته است.



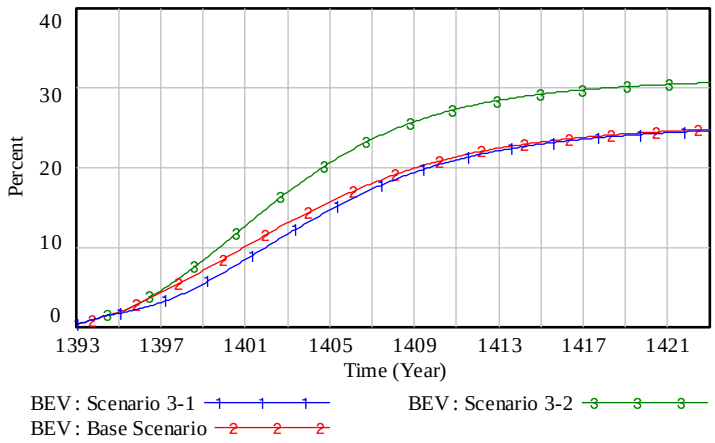
شکل ۴-۱۹: قیمت سوخت انواع خودرو در سناریو ۲



شکل ۴-۲۰: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سناریو ۲

۴-۲-۴ زیرساخت‌ها (سناریو ۳)

همان‌طور که قبلاً بیان شـد، زیرسـاخت‌های شـارژ یک از مهم‌ترین معیارها برای مشـتریان می‌باشـد. تعداد ایسـتگاه‌های شـارژ در آینده نامشـخص است که می‌تواند بر فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی تأثیرگذار باشد. به همین دلیل دو حالت مختلف در این سناریو برای ارزیابی اثر زیرساخت‌ها بر انتشار خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است. در سناریوی ۳-۱ معیار حداکثر ایستگاه شارژ قابل ساخت (MC) که به دلیل محدودیت بودجه و ... در مدل در نظر گرفته شد، از ۱۰۰ به ۱۰ کاهش و در سـناریوی ۳-۲ به ۱۰۰۰ ایستگاه در سال افزایش می‌یابد. تأثیر این دو حالت بر سهم بازار BEV در مقایسه با سناریوی مبنا در شکل ۴-۲۱ آمده است.

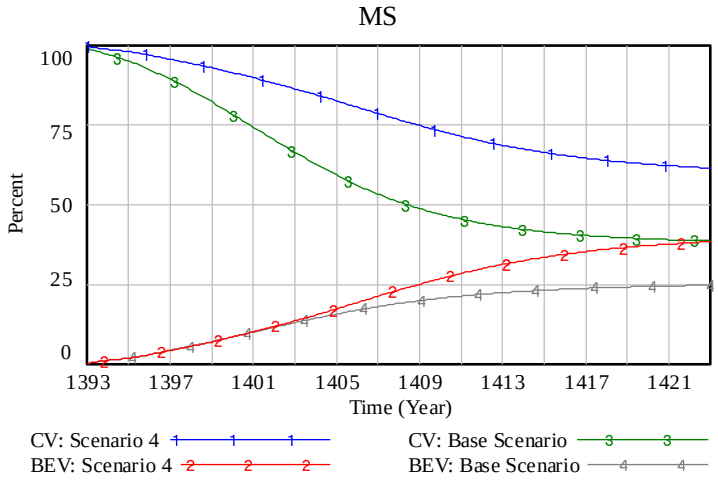


شکل ۴-۲۱: سهم بازار BEV از فروش در سناریو ۳

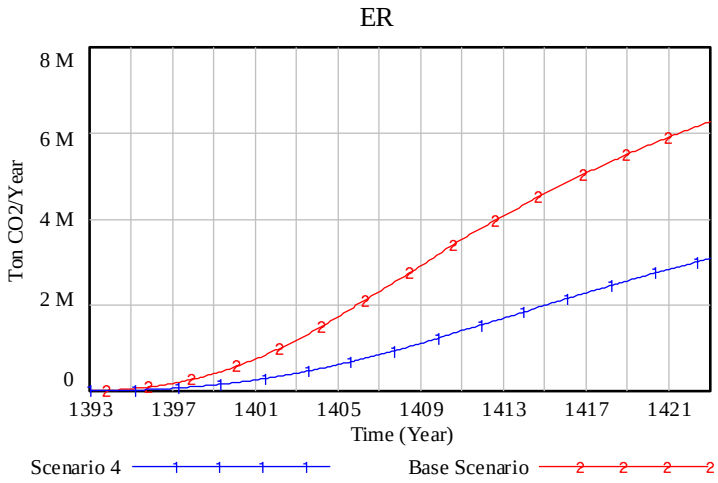
مشـاهده می‌شود که در سناریو ۳-۱، سهم بازار BEV کاهش قابل‌توجهی نداشته است. علت این مسـئله در وجود سـطح اشباع در منحنی تأثیر زیرساخت‌ها بر مطلوبیت زمانی (شکل ۳-۹) است. به‌عبارت‌دیگر، تابع تأثیر تعداد ایستگاه‌ها بر مطلوبیت زمانی در سناریو مبنا به دلیل محدودیت ساخت، اکثر اوقات در حالت اشباع است؛ ازاین‌رو کاهش بیشتر حداکثر ایستگاه‌های قابل ساخت در سال، تأثیر زیادی بر مطلوبیت زمانی و درنتیجه فروش BEV ندارد. از طرف دیگر، در سـناریو ۳-۱ سـهم بازار BEV افزایشـی ۶ درصدی یافته است که علت آن افزایش مطلوبیت زمانی BEV در اثر افزایش تعداد ایستگاه‌های شارژ است.

۴-۲-۵ عرضه یک نوع خودرو الکتریکی به بازار (سناریو ۴)

همان‌طور که قبلاً بیان شد، مدل شامل سه نوع خودرو است؛ CV، HEV و BEV. با توجه به نتایج سناریوهای قبل ممکن است این تردید وجود داشته باشد که HEV مانع فروش BEV می‌شود. به‌علاوه این سؤال وجود دارد که اگر HEV از بازار حذف شود، چه اثراتی بر انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای خواهد داشت؟ بنابراین در این سناریو تنها BEV و CV به بازار عرضه می‌شوند. نتایج در شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳ آمده است.



شکل ۴-۲۲: سهم بازار CV و HEV از فروش در سناریو ۴



شکل ۴-۲۳: کاهش انتشار CO_2 در سناریو ۴

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، اگر تنها BEV و CV به بازار عرضه شوند، سهم BEV از

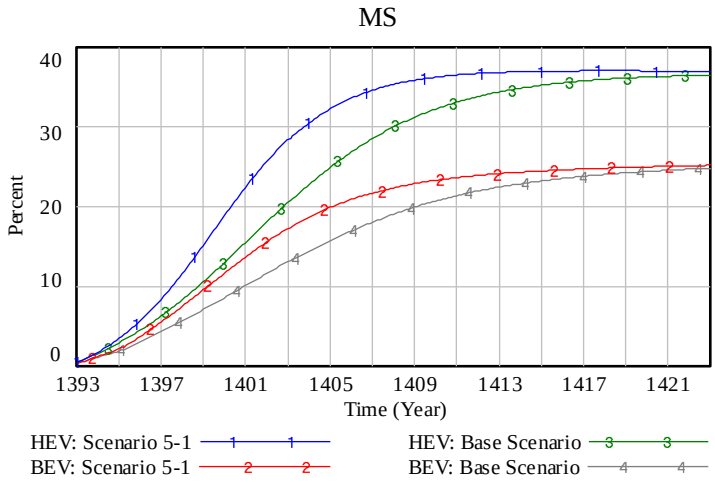
فروش، نسبت به حالت عادی افزایش می‌یابد؛ اما کاهش انتشار CO_2 در این حالت نسبت به حالت عادی تقریباً ۵۰ درصد کم‌تر می‌شود. دلیل این مسئله این است که با حذف HEV از بازار، مشتریان بیش‌تر به سمت خرید CV می‌روند تا BEV؛ بنابراین ازآنجاکه تقاضای CV از HEV بیش‌تر است، کل CO_2 کاهش‌یافته نسبت به حالت عادی کم‌تر خواهد بود. به‌علاوه CO_2 کاهش‌یافته ناشی از افزایش فروش BEV نیز نمی‌تواند این مسئله را جبران نماید زیرا ضریب انتشار CO_2 بخش نیروگاهی در ایران زیاد است.

۴-۲-۶ تبلیغات دهان‌به‌دهان (سناریو ۵)

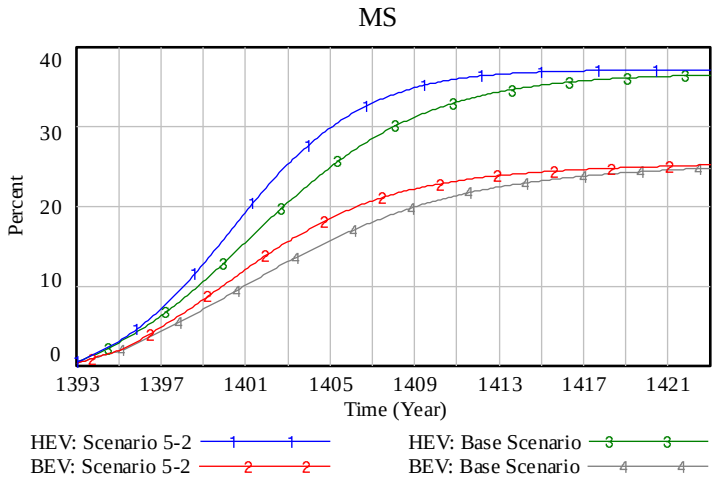
مشتریان برای خرید یک نوع خودرو باید درباره‌ی آن آگاهی داشته باشند تا آن را در مجموعه‌ی مدنظرشان برای خرید قرار دهند. آگاهی درباره‌ی یک نوع خودرو جدید توسط بازاریابی و تبلیغات دهان‌به‌دهان افزایش می‌یابد. در اینجا در دو حالت مختلف، اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان بر انتشار خودروهای الکتریکی موردبررسی قرار می‌گیرد. در حالت اول (سناریو ۵-۱)، اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای غیر الکتریکی و در حالت دوم (سناریوی ۵-۲) اثر تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروها الکتریکی دو برابر می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، فرض شده است که آن‌ها دو برابر سناریو مبنا بر افزایش آگاهی درباره‌ی خودروهای الکتریکی اثرگذارند. نتایج در شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ مشاهده می‌شود.

مطابق نتایج شبیه‌سازی، تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان خودروهای الکتریکی و غیر الکتریکی اثر قابل‌توجهی بر نفوذ خودروهای الکتریکی به بازار دارد. قدرت اثرگذاری تبلیغات دهان‌به‌دهان در سال‌های ابتدایی بسیار پایین است، زیرا تعداد استفاده‌کنندگان از خودروهای الکتریکی و رانندگان خودروهای غیر الکتریکی آگاه در سال‌های ابتدایی کم است؛ بنابراین حتی اگر تمام آن‌ها درباره‌ی خودروهای الکتریکی تبلیغ نمایند، در سال‌های ابتدایی اثر کلی کمی دارند. زمانی که تعداد افراد آگاه افزایش یابد، تبلیغات اجتماعی نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین در سال‌های میانی، افراد بیش‌تری با

خودروهای الکتریکی آشنا می‌شوند. در سال‌های پایانی اثرگذاری تبلیغات دهان‌به‌دهان کاهش می‌یابد، زیرا تعداد افراد ناآگاه درباره‌ی خودروهای الکتریکی بسیار پایین است. همچنین با توجه به شکل‌های فوق، رانندگان خودروهای غیر الکتریکی قدرت اثرگذاری بیش‌تری نسبت به رانندگان خودروهای الکتریکی دارند، زیرا تعداد آن‌ها بیش‌تر است.



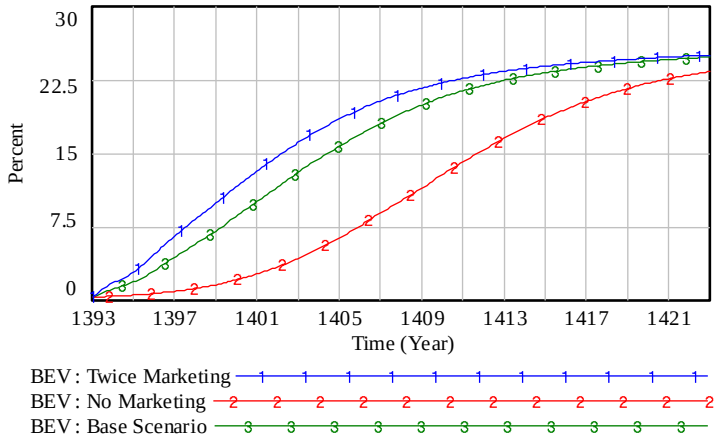
شکل ۴-۲۴: سهم بازار خودروهای الکتریکی از فروش در سناریو ۵-۱



شکل ۴-۲۵: سهم بازار خودروهای الکتریکی از فروش در سناریو ۵-۲

۴-۲-۷ بازاریابی (سناریو ۶)

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، بازاریابی برافزایش آگاهی افراد تأثیرگذار است. در سناریو ۶، اثر راهبردهای بازاریابی بر انتشـار خودروهای الکتریکی در حالات مختلف موردبررسـی قرار می‌گیرد. در فعـالیـت‌هـای بـازاریابی دو مسـئله اهمیت دارد، مقدار و مدت بازاریابی. در سـناریو ۶-۱ اثر مقدار فعالیت‌های بازاریابی و در سناریو ۶-۲ اثر مدت بازاریابی بر فرآیند انتشار خودروها بررسی می‌گردد. در سـناریو ۶-۱، دو حالت در نظر گرفته شـده است. در حالت اول فعالیت‌های بازاریابی نسبت به سناریو مبنا، دو برابر شـده است و در حالت دوم هیچ‌گونه فعالیت بازاریابی وجود ندارد. تأثیر این دو حالت بر فروش BEV در شکل ۴-۲۶ مشاهده می‌شود. این اثر به‌طور مشابه برای HEV نیز وجود دارد.

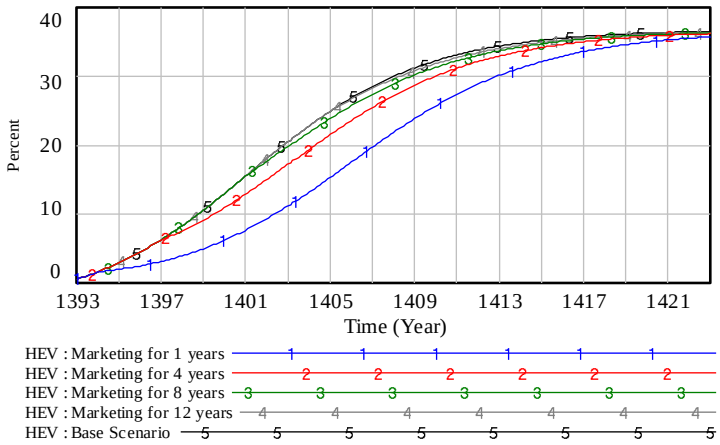


شکل ۴-۲۶: سهم بازار BEV از فروش در سناریو ۶-۱

همان‌طور که در شـکل ۴-۲۷ دیده می‌شـود چنانچه هیچ‌گونه فعالیت بازاریابی وجود نداشـته باشـد، فرآیند پذیرش خودروهای الکتریکی شدیداً تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ زیرا مردم با خودروهای الکتریکی آشنایی ندارند و هیچ اطلاعی از آن‌ها ندارند؛ بنابراین آن‌ها را در گزینه‌های خریدشان قرار نمی‌دهند و به این شـکل فروش خودروهای الکتریکی کم می‌شـود. همچنین نتایج نشـان می‌دهد که چنانچه بازاریابی انجام نگیرد، انتشار خودروهای الکتریکی به بازار سال‌ها به تأخیر می‌افتد؛ بنابراین فعالیت‌های بازاریابی کافی برای موفقیت و انتشار سریع خودروهای الکتریکی ضروری است. به‌علاوه، در حالتی که

فعالیت‌های بازاریابی دو برابر می‌شود، فروش خودروهای الکتریکی افزایش می‌یابد؛ ولی در فعالیت‌های بازاریابی باید به صرفه‌ی اقتصادی آن توجه داشت.

در شکل ۴-۲۷ می‌توان اثر مدت‌زمان بازاریابی بر انتشار خودروهای الکتریکی را مشاهده کرد. از این شکل می‌توان فهمید که بازاریابی در سال‌های ابتدایی اهمیت ویژه‌ای دارد. چنانچه بازاریابی قبل از چهارمین سال فرآیند انتشار متوقف شود، افراد کمتری با خودروهای الکتریکی آشنا می‌شوند و درباره‌ی آن یاد می‌گیرند. در این شرایط سطح فروش کم است. بااین‌حال بعد از ۴ تا ۸ سال تعداد افراد آشنا با خودروهای الکتریکی به مقدار کافی افزایش می‌یابد؛ بنابراین بازاریابی بیش از ۸ سال، به علت افزایش آگاهی عمومی، اثر زیادی بر فروش خودروهای الکتریکی ندارد. به همین دلیل بعد از این مدت می‌توان فعالیت‌های بازاریابی را متوقف نمود.



شکل ۴-۲۷: سهم بازار HEV از فروش در سناریو ۶-۲

۴-۲-۸ مرور سناریوها

در این قسمت نتایج تمام سناریوها به‌صورت مختصر در جدول ۳ مقایسه شده است. با توجه با این جدول، برای افزایش فروش خودروهای الکتریکی، استفاده از سناریوهای ۲ و ۳-۲ پیشنهاد می‌شود. توجه شود که سناریو ۴ باعث افزایش فروش BEV و سناریو ۱-۱ باعث افزایش فروش HEV می‌شود؛ اما به دلیل کاهش کمتر CO_2 نسبت به سناریو مبنا استفاده از آن‌ها توصیه نمی‌شود. همچنین بهبود سریع تکنولوژی (سناریو ۱-۲) نیز باعث افزایش فروش BEV می‌شود؛ اما ازآنجاکه در

حوزه‌ی اختیارات سیاست‌گذاران نیست، نمی‌تواند به‌عنوان سیاست تشویقی پیشنهاد شود.

بنابراین قیمت سوخت (سناریو ۲) و توسعه‌ی زیرساخت‌ها با ساخت ۱۰۰۰ ایستگاه در سال (سناریو ۳-۲) می‌تواند ابزاری مناسب برای تشویق مصرف‌کنندگان برای استفاده از خودروهای الکتریکی باشد.

جدول ۳: مقایسه‌ی سناریوها

		سهم بازار HEV (درصد)	سهم بازار BEV (درصد)	سهم بازار CV (درصد)	کاهش انتشار CO_2 (تن)
سناریو مبنا		۳۶/۵	۲۴/۸	۳۸/۷	$۸/۲۲\times۱۰^{۷}$
سناریو ۱ (توسعه‌ی تکنولوژیکی)	بدون بهبود	۴۲	۱۷/۸	۴۰/۲	$۷/۹۴\times۱۰^{۷}$
	بهبود سریع	۳۳	۳۱/۳	۳۵/۷	$۸/۶۶\times۱۰^{۷}$
سناریو ۲ (قیمت سوخت)		۳۶/۵	۴۱/۵	۲۴	۹×۱۰^{۷}
سناریو ۳ (زیرساخت‌ها)	۱۰ ایستگاه در سال	۳۶/۶	۲۴/۶	۳۸/۸	$۸/۰۵\times۱۰^{۷}$
	۱۰۰۰ ایستگاه در سال	۳۳/۷	۳۰/۷	۳۵/۶	$۸/۶۷\times۱۰^{۷}$
سناریو ۴ (یک نوع خودرو الکتریکی)		۰	۳۸/۵	۶۱/۵	$۳/۵۳\times۱۰^{۷}$
سناریو ۵ (تبلیغات دهان‌به‌دهان دوبرابر)	رانندگان خودروهای غیر الکتریکی	۳۷	۲۵/۲	۳۷/۸	$۹/۷۴\times۱۰^{۷}$
	رانندگان خودروهای غیر الکتریکی	۳۷/۱	۲۵/۲	۳۷/۷	$۹/۲\times۱۰^{۷}$
سناریو ۶ (بازاریابی دو برابر)		۳۶/۷	۲۵	۳۸/۳	$۹/۴۹\times۱۰^{۷}$

در بخش بعد سیاست‌های تشویقی مرسوم بررسی می‌شود و با شناخت عواملی که تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش فروش خودروهای الکتریکی دارند، سیاست‌های پیشنهادی ارائه می‌شود.

۴-۳ سیاست‌های تشویقی

در این بخش با توجه به موانع موجود در فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی و نتایج بخش قبل، سیاست‌هایی برای افزایش فروش خودروهای الکتریکی مطرح و نتایج آن‌ها بررسی می‌شود. این سیاست‌ها برای کمک به سیاست‌گذاران حوزه‌ی بخش حمل‌ونقل و با توجه به عواملی که در حوزه‌ی اختیار آن‌ها است، پیشنهاد شده‌اند.

۴-۳-۱ پرداخت یارانه خرید خودرو (سیاست ۱)

بیش‌تر تولیدکنندگان خودرو و محققان بر این باورند که مشوق‌های مالی برای موفقیت خودروهای الکتریکی در بازار خودرو ضروری است. یارانه خرید خودرو یکی از انواع مشوق‌های مالی است. در پرداخت یارانه‌ی خرید خودرو، اثر راهبردهای یارانه‌ای در شش سیاست مختلف ارزیابی می‌شود؛ یارانه‌ی ۱۰ میلیون تومانی در طول شبیه‌سازی و یارانه‌ی ۲۰ میلیون تومانی در ۱۰ سال اول به ازای خرید هر خودرو. هرکدام از این راهبردها ابتدا جداگانه به BEV و سپس به HEV و در انتها به هر دو اعمال خواهد شد. نتایج این سیاست‌ها در جدول ۴ آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود یارانه‌ی خرید خودرو تأثیر چشم‌گیری بر فروش خودروهای الکتریکی ندارد. علت این مسئله تفاوت زیاد قیمت خرید خودروهای الکتریکی و CV است. به‌علاوه در سال‌های ابتدایی، به علت عدم آشنایی مشتریان، درصد کمی از آن‌ها به خرید خودروهای الکتریکی تمایل دارند که باعث کاهش مضاعف تأثیر یارانه بر فروش این خودروها می‌گردد. تأثیر کمتر یارانه‌ی بالاتر در سال‌های ابتدایی، این مسئله را تأیید می‌کند.

در قسمت یارانه، هزینه‌ای که در طول افق شبیه‌سازی باید توسط دولت به خریداران خودرو پرداخت شود، آمده است. مشاهده می‌شود که درازای یک تغییر اندک، یارانه‌ی بسیار زیادی به دولت

تحمیل می‌گردد؛ بنابراین سیاست یارانه برای خرید خودرو به‌تنهایی روش مناسبی به نظر نمی‌رسد و باید در کنار سایر سیاست‌ها به‌عنوان مکمّل به کار گرفته شود.

جدول ۴: نتایج سیاست پرداخت یارانه خرید خودرو در سال ۱۴۲۳

سیاست	سهم بازار (درصد)		یارانه (هزار میلیارد ریال)	کاهش هزینه (هزار میلیارد ریال)
	BEV	HEV		
سناریو مبنا	۲۴/۸	۳۶/۵	۰	۱۳۸/۲
۱۰ میلیون یارانه برای BEV - دائم	۲۵/۴	۳۵/۹	۳۴۷۵	۱۳۷/۹
۱۰ میلیون یارانه برای HEV- دائم	۲۴/۴	۳۷/۶	۵۴۳۰	۱۴۰/۸
۱۰ میلیون یارانه برای BEV و HEV - دائم	۲۵	۳۷/۱	۸۸۱۰	۱۴۰/۸
۲۰ میلیون یارانه برای BEV- ۱۰ ساله	۲۴/۹	۳۶/۵	۳۳۰	۱۳۷/۹
۲۰ میلیون یارانه برای HEV- ۱۰ ساله	۲۴/۸	۳۶/۵	۵۱۸	۱۴۰/۴
۲۰ میلیون یارانه برای BEV و HEV– ۱۰ساله	۲۴/۹	۳۶/۵	۸۴۰	۱۴۰/۶

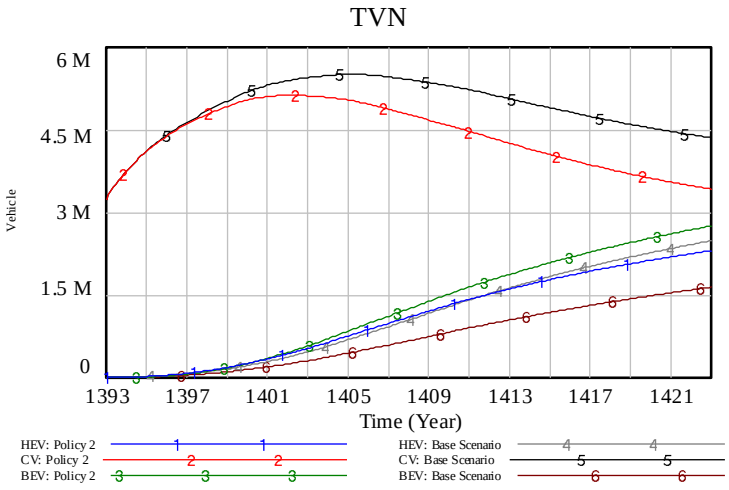
بخش کاهش هزینه‌های اجتماعی، کل هزینه‌هایی که در اثر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده ایجاد می‌شود را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهد. ازآنجاکه تغییر زیادی در فروش خودروها اتفاق نیفتاده است، کاهش هزینه‌های اجتماعی نیز تغییر زیادی نکرده‌اند. حتی در حالاتی که تنها برای خرید BEV یارانه پرداخت می‌شود، هزینه‌های اجتماعی کاهش کمتری را نشان می‌دهد که به علت بالا بودن ضرایب انتشار بخش نیروگاهی ایران می‌باشد؛ بنابراین چنانچه بخواهیم BEV را وارد سیستم حمل‌ونقل کنیم، به‌موازات آن باید در بخش تولید توان الکتریکی از منابع انرژی تجدید پذیر استفاده نماییم.

۴-۳-۲ افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ (سیاست ۲)

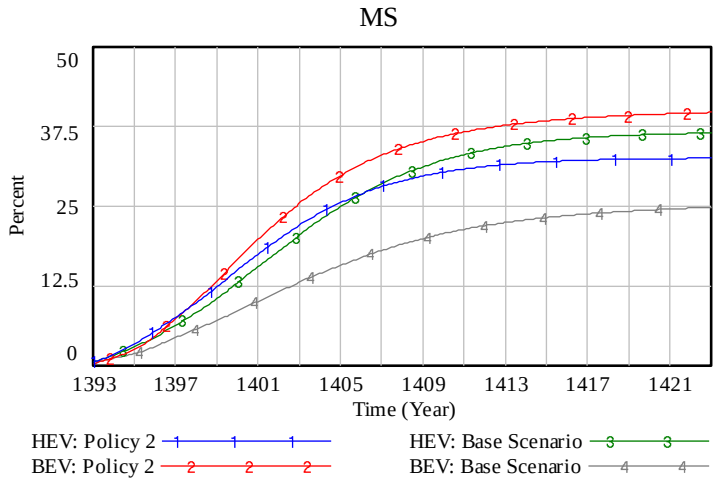
در بخش‌های قبل مشاهده شد که منافع حاصل از کاهش هزینه‌های اجتماعی (در اثر استفاده از خودروهای الکتریکی) قابل‌توجه است. ازآنجاکه پرداخت این منافع به‌صورت یارانه‌ی مستقیم برای خرید خودروهای الکتریکی تأثیر چندانی بر افزایش فروش ندارد، می‌توان از آن برای توسعه‌ی زیرساخت‌ها استفاده نمود.

در سناریو ۲ و ۳ مشاهده شد که افزایش قیمت بنزین و ساخت ایستگاه‌های شارژ می‌تواند در انتشار خودروهای الکتریکی و به‌خصوص BEV تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد. در سیاست تشویقی دوم برای حمایت از خودروهای الکتریکی، قیمت آن را افزایش می‌دهیم و به‌صورت همزمان، با استفاده از منافع کاهش هزینه‌های اجتماعی، زیرساخت‌ها را با سرعت بیش‌تر توسعه می‌دهیم. قیمت بنزین در این سیاست به‌صورت پلکانی و تا سال ۱۳۹۷ افزایش می‌یابد و با قیمت ۳ هزار تومان به ازای هر لیتر به مصرف‌کنندگان عرضه می‌شود. به‌علاوه، محدودیت ساخت ایستگاه شارژ نیز به ۱۰۰۰ ایستگاه در سال افزایش می‌یابد. در ادامه اثر این سیاست بر تعداد کل خودروها و سهم آن‌ها از فروش سالانه در شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ آمده است.

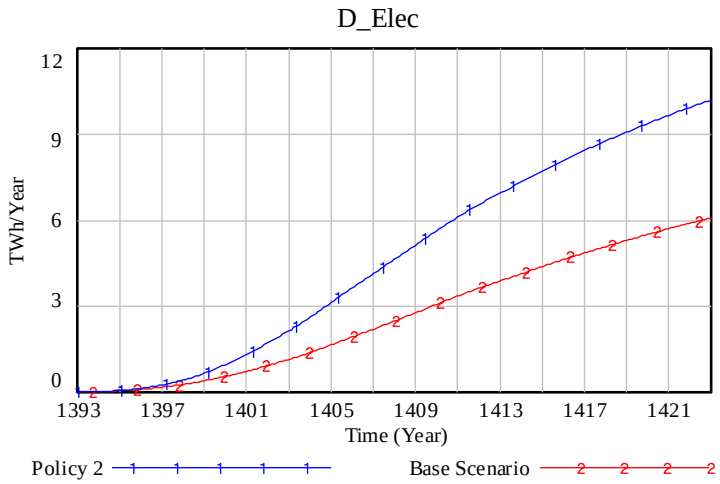
مشاهده می‌شود که در این سیاست، فروش BEV افزایش زیادی داشته است و از ۲۴/۸ درصد در سناریوی مبنا به ۳۹/۷ درصد رسیده است. علت این مسئله افزایش مطلوبیت زمانی و مطلوبیت هزینه‌ی سوخت BEV نسبت به سایر خودروهاست. مسئله‌ی دیگری که باید به آن توجه کرد این است که افزایش تعداد BEV با کاهش تعداد CV همراه است و HEV تقریباً سهم خود را از ناوگان حمل‌ونقل حفظ کرده است؛ زیرا مطلوبیت کلی آن همچنان توان رقابت با BEV را دارد؛ بنابراین با تعیین مناسب قیمت سوخت می‌توان مسیر انتخاب مشتریان در انتخاب خودرو را تغییر داد.



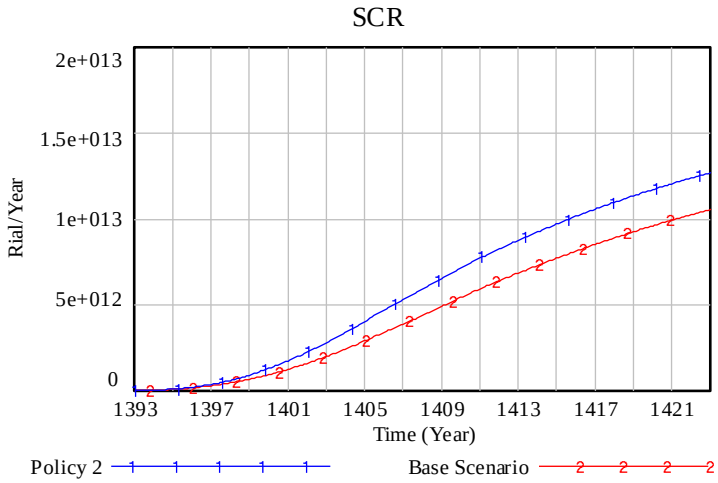
شکل ۴-۲۸: تعداد کل خودروها در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ



شکل ۴-۲۹: سهم بازار انواع خودرو از فروش در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ



شکل ۴-۳۰: توان الکتریکی موردنیاز در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ



شکل ۴-۳۱: کاهش هزینه‌های اجتماعی در سیاست افزایش قیمت بنزین و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ

توان الکتریکی موردنیاز برای شارژ BEV در سیاست ۲ در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد BEV، توان الکتریکی افزوده‌شده به شبکه نیز افزایش پیدا کرده و در سال ۱۴۲۳ به ۱۰/۲ تراوات ساعت خواهد رسید.

در شکل ۴-۳۱ هزینه‌های اجتماعی کاهش‌یافته در اثر اجرای سیاست ۲ آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فروش BEV، هزینه‌های اجتماعی نیز کاهش بیش‌تری یافته است.

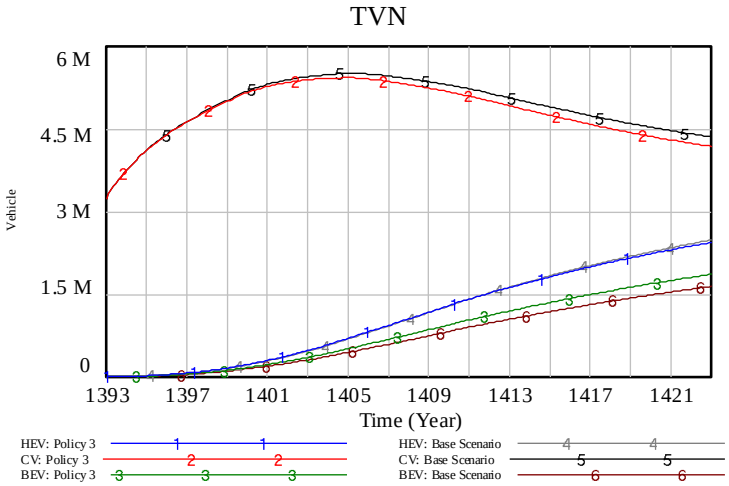
۴-۳-۳ استفاده از مفهوم اثرات خارجی (سیاست ۳)

اثرات خارجی یک اصطلاح کلی است که بیانگر هزینه‌ها و منافعی است که در قیمت‌های معمول بازار منعکس نمی‌شود. این هزینه‌ها و منافع برای برنامه‌ریزی طولانی‌مدت در بخش انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد. اثرات خارجی منفی، بیانگر حالتی است که شخص یا مجموعه‌ای خسارتی را بدون توجه به آثار آن بر دیگران ایجاد می‌کند. تخریب و آلودگی محیط زیست در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی یک اثر خارجی منفی محسوب می‌شود که با در نظر گرفتن آن در قیمت‌ها می‌توان به توسعه‌ی خودروهای عاری از آلایندگی کمک کرد.

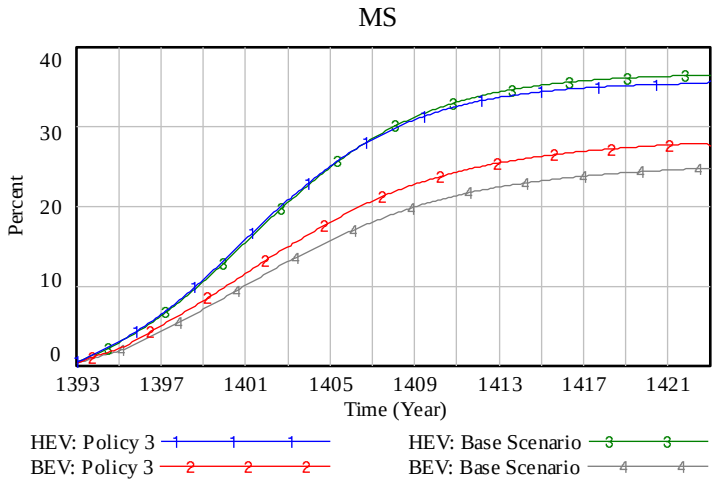
در این سیاست، هزینه‌ی اثرات خارجی منفی مصرف بنزین را محاسبه و به قیمت آن اضافه

می‌کنیم. هزینه‌ی اثرات خارجی مصرف یک لیتر بنزین با توجه به جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ محاسبه می‌شود که به ازای هر لیتر ۳۸۳۰ ریال به قیمت سال ۹۳ می‌باشد. از طرف دیگر، کاهش هزینه‌های اجتماعی سالانه‌ای را که با استفاده از خودروهای الکتریکی ایجاد می‌شود، به‌صورت یارانه‌ی خرید خودرو به خریداران BEV اختصاص می‌دهیم.

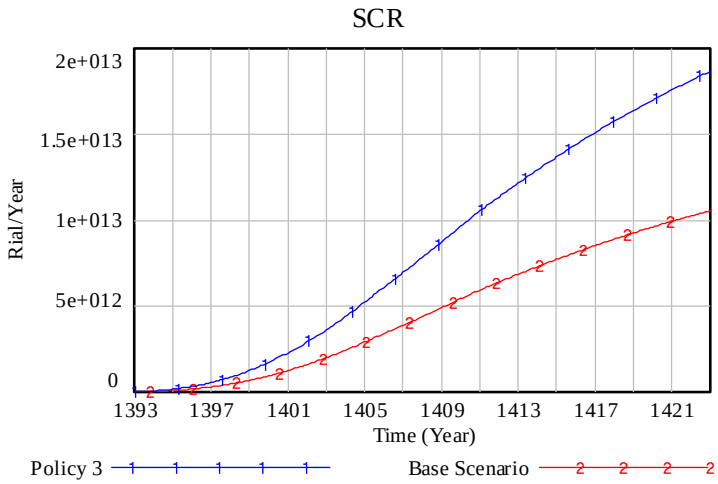
تا اینجا ما ضرایب انتشار بخش نیروگاهی را با این فرض که ترکیب تکنولوژی‌های تولید توان در طول شبیه‌سازی ثابت باشد، در نظر گرفته‌ایم. همان‌طور که قبلاً بیان شد، ضرایب انتشار بخش نیروگاهی ایران بالا است؛ به‌طوری‌که در شرایط فعلی استفاده از HEV نسبت به BEV از نظر زیست‌محیطی مناسب‌تر است؛ بنابراین حرکت به‌سوی انرژی‌های تجدید پذیر به‌موازات استفاده از BEV ضروری است. در این سیاست ما با این فرض که توان الکتریکی افزوده‌شده به شبکه از طریق انرژی‌های تجدید پذیر تولید می‌شوند، ضرایب انتشار بخش تولید توان الکتریکی را صفر در نظر گرفته‌ایم؛ بنابراین انتظار داریم در این شرایط، کاهش هزینه‌های اجتماعی و مطلوبیت انتشار آلودگی BEV افزایش یابد. در شکل ۴-۳۲ مشاهده می‌شود که تعداد کل CV کاهش و تعداد کل BEV افزایش یافته است. شکل ۴-۳۳ نشان می‌دهد که در این سیاست، سهم BEV از فروش از ۲۴/۸ در سناریوی مبنا به ۲۷/۶ افزایش می‌یابد.



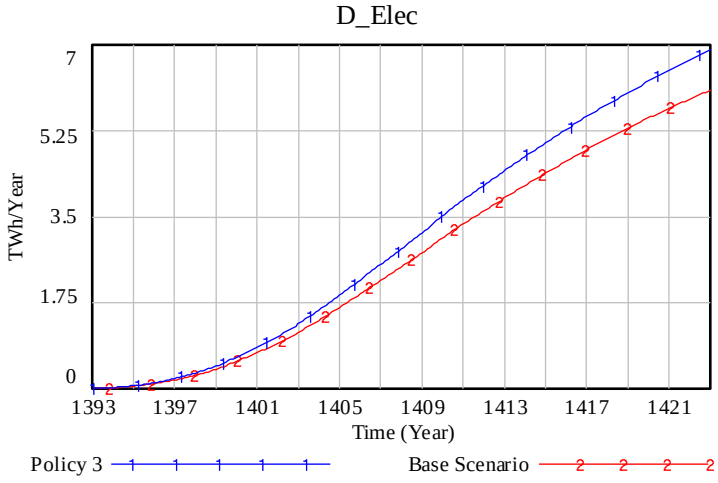
شکل ۴-۳۲: تعداد کل خودروها در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی



شکل ۴-۳۳: سهم انواع خودرو از فروش سالانه در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی



شکل ۴-۳۴: کاهش هزینه‌های اجتماعی در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی



شکل ۴-۳۵: توان الکتریکی موردنیاز در سیاست استفاده از مفهوم اثرات خارجی

در شـکل ۴-۳۴ مشـاهده می‌شـود که در صـورت استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر، منافع حاصـــل از کاهش هزینه‌های خارجی اســـتفاده از ســـوخت‌های فســـیلی در بخش حمل‌ونقل افزایش عمده‌ای خواهد داشـــت و به ۱۸/۶۷ هزار میلیارد ریال در ســـال ۱۴۲۳ خواهد رســـید. مقدار توان الکتریکی موردنیاز که در این سیاست باید از طریق انرژی‌های تجدید پذیر تأمین شود، در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است.

۴-۴ جمع‌بندی

در این فصـــل، با در نظر گرفتن ســـناریوهای مختلف، الگوهای محتمل انتشـــار خودروهای الکتریکی برای تهران تحت سـناریوهای مختلف بررسـی شد. با بررسی نتایج این سناریوها، عواملی که اثرگذاری بیش‌تری بر افزایش فروش خودروهای الکتریکی دارند، مشخص گردید و با به‌کارگیری آن‌ها و مشـوق‌های مرسـوم برای خودروهای الکتریکی، سـیاست‌هایی به‌عنوان رویکرد تشویقی اجرا و نتایج آن‌ها بررسی شد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

خودروهای الکتریکی به دلیل مزایای فراوانی که برای محیط زیست و مصرف انرژی دارند، به‌عنوان جایگزینی برای خودروهای درون‌سوز پیشنهاد می‌شوند. بااین‌حال، موانع اجتماعی- اقتصادی و فنی زیادی برای فروش عمده‌ی آن‌ها در بازار خودرو وجود دارد؛ بنابراین باید با شناخت عوامل مؤثر بر فروش خودروهای الکتریکی، آن‌هایی که تأثیر مثبتی بر فروش خودروهای الکتریکی دارند را تقویت و آن‌هایی که تأثیر منفی دارند را تعدیل نمود.

در این پایان‌نامه با استفاده از روش دینامیک سیستم، یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی برای بررسی و تحلیل فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی پیشنهاد شد. با استفاده از این مدل، عوامل اثرگذار بر انتشار خودروهای الکتریکی و کیفیت تأثیر آن‌ها در سناریوهای مختلف موردبررسی قرار گرفت. طبق نتایج این بخش، عدم آشنایی مصرف‌کنندگان با خودروهای الکتریکی و قیمت خرید بالای این خودروها ازجمله‌ی موانع اصلی خرید آن‌ها توسط مشتریان بود. به‌علاوه برای BEV، مطلوبیت زمانی پایین عامل دیگری است که مانع پذیرش آن از سوی مشتریان می‌شد. آشنایی مشتریان با خودروهای الکتریکی از طریق فعالیت‌های بازاریابی سیاست‌گذاران و تبلیغات دهان‌به‌دهان رانندگان افزایش می‌یابد که میزان تأثیرگذاری این عوامل در چند سناریو بررسی شد.

برای کاهش قیمت خرید خودروهای الکتریکی، برخی کشورها سیاست‌هایی را برای اختصاص یارانه‌ی خرید به این خودروها در نظر می‌گیرند. به‌طور مشابه ما نیز این سیاست را به مدل ساخته‌شده برای مطالعه‌ی موردی شهر تهران، اعمال کردیم. نتایج این سیاست نشان داد که تأثیر این سیاست بر افزایش فروش خودروهای الکتریکی پایین است. علت این مسئله اختلاف قیمتی زیاد خودروهای الکتریکی و درون‌سوز است.

با بررسی سناریوهای مختلف در مدل ایجادشده، متوجه شدیم که افزایش فاصله‌ی بین قیمت

بنزین و برق و توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ می‌تواند بر افزایش فروش این خودروها تأثیرگذاری قابل‌توجهی داشته باشد؛ بنابراین یک سیاست تشویقی پیشنهاد شد که در آن قیمت بنزین به‌صورت پلکانی افزایش می‌یابد و به‌طور همزمان زیرساخت‌های شارژ خودرو نیز گسترش می‌یابند. نتایج این سیاست نشان از تأثیر مثبت آن بر فروش BEV داشت.

در این پایان‌نامه اثرات خودروهای الکتریکی بر بخش انرژی و محیط زیست ارزیابی شد. در بخش انرژی، توان الکتریکی افزوده‌شده به شبکه‌ی برق محاسبه شد و در بخش اثرات زیست‌محیطی، مقدار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده بررسی شد و منافع حاصل از آن محاسبه گردید. همچنین با درونی سازی اثرات خارجی استفاده از سوخت‌های فسیلی، یک رویکرد تشویقی برای افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی پیشنهاد شد. نتایج این سیاست نشان داد که با درونی سازی هزینه‌های اجتماعی استفاده از خودروهای درون‌سوز و تأمین توان خودروهای الکتریکی از طریق انرژی‌های تجدید پذیر می‌توان فروش خودروهای الکتریکی را افزایش داد.

۵-۲ پیشنهادها

پیشنهادها زیر برای ادامه‌ی تحقیقات درزمینه‌ی مدل‌سازی رویکردهای تشویقی افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی ارائه می‌گردد:

۱- تعیین دقیق وزن ویژگی‌ها، به مطالعه و استفاده از داده‌های واقعی که توسط اظهارات مصرف‌کنندگان به دست می‌آید، نیاز دارد. در این پایان‌نامه، ازآنجاکه این اطلاعات در دسترس نبود، ما با مرور مطالعات مشابه و استفاده از فرضیات، این وزن‌ها را تعیین نموده‌ایم. برای شناسایی دقیق وزن هر ویژگی در مطلوبیت کلی خودرو، پیشنهاد می‌شود از داده‌های واقعی که در نظرسنجی از مشتریان به دست می‌آید، استفاده شود.

۲- در این پایان‌نامه تنها یک بازار برای خانواده‌های با درآمد متوسط تعریف شد. با توجه به

این‌که سطح درآمد مشتریان می‌تواند در فرآیند تصمیم‌گیری آن‌ها تأثیرگذار باشد، می‌توان با توجه به مشخصات مشتریان، بازارهای جداگانه‌ای برای آن‌ها تعریف گردد و اختصاص یارانه‌ها را با توجه به سطح درآمد و میزان حساسیت مشتریان به قیمت خرید انجام شود.

۳- ما در این پایان‌نامه تنها BEV و HEV را به عنوان جایگزین خودروهای درون‌سوز در مدل در نظر گرفتیم. پیشنهاد می‌شود فرآیند انتشار خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن سایر AFVs در مدل‌سازی موردبررسی قرار گیرد.

۴- برای ارزیابی جذابیت خودروها، ما از ویژگی‌های انواع خودرو و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر استفاده نمودیم. می‌توان برای ارزیابی جذابیت خودروها از هزینه‌ای که آن‌ها در طول عمر خود برای مصرف‌کننده دارند، استفاده کرد و با تعریف یک استاندارد مشخص، خریداران را از این هزینه مطلع نمود.

ضمیمه آ

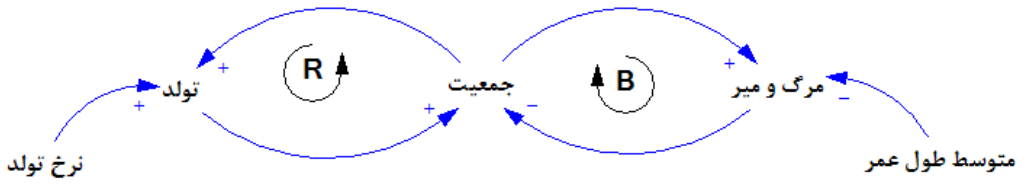
معرفی اجمالی دینامیک سیستم و روش مدل‌سازی آن به کمک نرم‌افزار ونسیم

دینامیک سیستم در اواخر دهه ۱۹۵۰ و در نتیجه تلاش‌های انجام‌شده توسط گروهی از محققان به سرپرستی جی. دابلیو. فارستر[۱] شکل گرفت. طبق [۴۵]، «دینامیک سیستم یک دیدگاه و مجموعه‌ای از ابزارهای مفهومی است که ما را قادر به درک ساختار و دینامیک سیستم‌های پیچیده می‌کند.» از زمان معرفی روش دینامیک سیستم، دامنه کاربردهای این روش به‌شدت توسعه‌یافته و در حال حاضر در حوزه‌های زیادی کاربرد دارد. ازجمله‌ی این حوزه‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی و طراحی استراتژی‌ها و سیاست‌های بخش بازرگانی، مدیریت و سیاست‌گذاری بخش‌های خصوصی و عمومی، انرژی و محیط‌زیست، نظریه‌پردازی در علوم طبیعی و اجتماعی، تصمیم‌گیری دینامیک، شناخت دینامیک سیستم‌های غیرخطی پیچیده و ... اشاره کرد.

متغیرهای تشکیل‌دهنده‌ی یک مدل دینامیک سیستم، متقابلاً با یکدیگر در ارتباط هستند. روابط علّی بین متغیرها، حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی ایجاد می‌کند. این روابط و حلقه‌ها به‌وسیله‌ی نمودارهای علّی حلقوی به نمایش درمی‌آیند. برای نمایش نمودارهای علّی حلقوی، علامت "+" در نوک پیکان خطوط جهت‌دار به معنای وجود رابطه‌ی علّی مثبت بین متغیر ابتدای خط و متغیر انتهای خط است. رابطه‌ی علّی مثبت به این معناست که با افزایش (کاهش) علّت، معلول بیش‌تر (کمتر) ازآنچه قبلاً بوده است، افزایش (کاهش) می‌یابد. علامت "-" در نوک پیکان خطوط جهت‌دار به معنی وجود یک رابطه‌ی علّی منفی بین متغیر ابتدای خط جهت‌دار و متغیر انتهای خط جهت‌دار است. در رابطه‌ی علّی منفی، با افزایش (کاهش) علّت، معلول کاهش (افزایش) می‌یابد و یا افزایش

[۱] Jay W. Forrester

(کاهش) آن کمتر از زمانی است که این رابطه وجود ندارد. همچنین، حاصل‌ضرب همه‌ی علامت‌ها در یک حلقه، علامت کل حلقه را مشخص می‌کند. اگر حاصل‌ضرب "+" باشد، حلقه از نوع حلقه‌ی بازخوردی تقویت‌کننده (R) است و اگر "-" باشد حلقه از نوع بازخوردی متعادل‌کننده (B) است. یک مثال از نمودار علّی حلقوی که به کمک نرم‌افزار ونسیم مدل‌سازی شده است، در شکل آ-۱ آمده است.



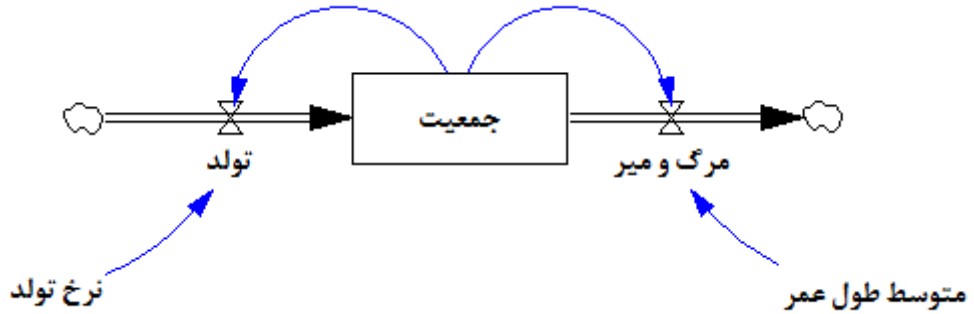
شکل آ-۱: نمودار علّی حلقوی مدل جمعیت

شکل فوق نشان می‌دهد که با افزایش تولد، جمعیت نیز افزایش می‌یابد (و برعکس). همچنین با افزایش مرگ‌ومیر جمعیت کاهش پیدا می‌کند یا نسبت به قبل، افزایش کم‌تری می‌یابد. همچنین با افزایش جمعیت مرگ‌ومیر نیز افزایش می‌یابد. حلقه‌ی سمت راست، متعادل‌کننده و حلقه‌ی سمت چپ تقویت‌کننده است.

در مدل‌های دینامیک سیستم، انباشت و جریان دو متغیر اساسی و مهم هستند. انباشت، نشان‌دهنده‌ی تجمیع منابع و یا مقادیری است که بیانگر وضعیت سیستم در طول زمان می‌باشند و جریان، نشان‌دهنده‌ی تغییر در متغیر انباشت در بازه‌ای از زمان است که می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش آن انباشت شود. انباشت و جریان در واقع همان متغیر حالت و مشتق آن هستند. به‌عنوان مثال، مقدار آب یک منبع بر حسب لیتر متغیر انباشت و جریان آب شیر ورودی بر حسب لیتر بر واحد زمان، متغیر جریان می‌باشد.

به‌علاوه‌ی متغیرهای انباشت و جریان، نوع سومی از متغیر به نام متغیر کمکی یا مبدل نیز وجود دارد. متغیرهای کمکی یا مبدل‌ها به تعریف پارامترها یا متغیرهای ساده کمک می‌کنند؛ بنابراین می‌توانند ثابت‌ها و یا توابعی از انباشت‌ها و جریان‌ها باشند. یک مثال از نمودار انباشت- جریان مدل

جمعیت در شکل آ-۲ آمده است.



شکل آ-۲: نمودار انباشت- جریان مدل جمعیت

در شـکل فوق، جمعیت متغیر انباشـت و تولد جریان ورودی آن اسـت. همچنین، جمعیت با جریان خروجی مرگ‌ومیر در مدل کاهش می‌یابد و متوسـط طول عمر و نرخ تولد، متغیرهای کمکی هستند.

جمعیت = جمعیت در لحظه‌ی (t-dt) + (تولد-مرگ‌ومیر) × dt

تولد = جمعیت × نرخ تولد

مرگ‌ومیر = جمعیت / متوسط طول عمر

منابع

[1]. IEA. (2013). CO2 emissions from fuel combustion highlights 2013. Available from:⟨http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2013.pdf⟩.

[2]. Yeh, S., & Sperling, D. (2013). "Low carbon fuel policy and analysis*" Energy Policy*, 56(Complete), 1-4.

[۳]. *ترازنامه انرژی*(۱۳۹۱)، معاونت امور برق و انرژی. دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی.

[4]. Argonne-National-Laboratory. (1998). *Total Energy Cycle Assessment of Electric and Conventional Vehicles: An Energy and Environmental Analysis.* Volume I: Technical Report.

[5]. Samaras, C., & Meisterling, K. (2008). "Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy" *Environmental science & technology, 42, 3170-3176.*

[6]. Barkenbus, J. (2009). "Our electric automotive future: CO2 savings through a disruptive technology". *Policy and Society*, 27, 399-410.

[7]. Sorrentino, M., Rizzo, G., & Sorrentino, L. (2014). "A study aimed at assessing the potential impact of vehicle electrification on grid infrastructure and road-traffic green house emissions" *Applied Energy*, 120, 31-40.

[8]. Thiel, C., Perujo, A., & Mercier, A. (2010). "Cost and CO2aspects of future vehicle options in Europe under new energy" *Energy Policy*, 38, 7142-7151.

[9]. Wu, D., & Aliprantis, D. (2013). "Modeling light-duty plug-in electric vehicles for national energy and transportation planning" *Energy Policy*, 63, 419-432.

[10]. Vooren, A. V., & Brouillat, E. (2013). "Evaluating CO2 reduction policy mixes in the automotive sector" *Environmental Innovation and Societal Transitions, ARTICLE IN PRESS.*

[11]. Rogers, E. (1983). *Diffusion of innovations.* New York : Free Press ; London : Collier Macmillan.

[12]. Struben, J. (2006b). PhD. Thesis, "Essays on transition challenges for alternative propulsion vehicles and transportation systems" *Massachusetts Institute of Technology*.

[13]. Al-Alawi, B., & Bradley, T. (2013). "Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies" *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 21, 190-203.

[14]. Kiesling, E., Günther, M., Stummer, C., & Wakolbinger, L. (2012). "Agent-based simulation of innovation diffusion: a review" *Central European Journal of Operations Research*, 20, 183–230.

[15]. Train, K. (2002). *Discrete choice methods with simulation.* Cambridge University Press.

[16]. Bass, F. (2004). "Comments on a new product growth for model consumer durables the bass model". *Management science*, 50, 1833-1840.

[17]. Struben, J. J. (2006a). "Identifying challenges for sustained adoption of alternative fuel vehicles and infrastructure" *Working Paper*, MIT Sloan School of Management.

[18]. Stepp, M., Winebrake, J., Hawker, J., & Skerlos, S. (2009.). "Greenhouse gas mitigation policies and the transportation sector: The role of feedback effects on policy effectiveness" *Energy Policy*, 37, 2774-2787.

[19]. Lee, D. H., Park, S. Y., Kim, J. W., & Lee, S. K. (2013). "Analysis on the feedback effect for the diffusion of innovative technologies focusing on the green car" *Technological Forecasting & Social Change*, 80, 498-509.

[20]. Park, S. Y., Kim, J. W., & Lee, D. H. (2011). "Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects" *Energy Policy*, 39, 3307-3315.

[21]. Keles, D., Wietschel, M., Most, D., & Rentz, O. (2008). "Market penetration of fuel cell vehicles – Analysis based on agent behaviour" *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 4444-4455.

[22]. Meyer, P. E., & Winebrake, J. J. (2009). "Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure" *Technovation*, 29, 77-91.

[23]. Jonathan, K., Wietschel, M., Whitmarsh, L., Keles, D., & Schade, W. (2010). Infrastructure investment for a transition to hydrogen automobiles. *Technological Forecasting & Social Change*, 77, 1237-1248.

[24]. Santa-Eulalia, L. A., Neumann, D., & Klasen, J. (2011). "A Simulation-Based Innovation Forecasting Approach Combining the Bass Diffusion Model, the Discrete Choice Model and System Dynamics: An Application in the German Market for Electric Cars" T*he Third International Conference on Advances in*

System Simulation, 81-87

[25]. Walther, G., Wansart, J., Kieckhäfer, K., Schnieder, E., & Spengler, T. (2010). "Impact assessment in the automotive industry: mandatory market introduction of alternative powertrain technologies". *System Dynamics Review*, 26, 239-261.

[26]. Trappey, A., Trappey, C., Hsiao, C., Ou, J. J., Li, S., & Chen, K. W. (2012). "An evaluation model for low carbon island policy: The case of Taiwan's green transportation policy" *Energy Policy*, 45: 510-515.

[27]. Tran, M. (2012). "Agent-behaviour and network influence on energy innovation diffusion" *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 17, 3682-3695.

[28]. Vliet, O. v., Vries, B. d., Faaij, A., Turkenburg, W., & Jager, W. (2010). "Multi-agent simulation of adoption of alternative fuels" *Transportation Research Part D*, 15, 326-342.

[29]. Mueller, M. G., & Haan, P. d. (2009). "How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars—Part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation" *Energy Policy*, 37, 1072-1082.

[30]. Cui, X., Kim, H. K., Liu, C., Kao, S.-C., & Bhaduri, B. L. (2010). "A multi agent-based framework for simulating household PHEV distribution and electric distribution network impact*" TRB Comittee on Transportation Energy (ADC70)*.

[31]. Huétink, F. J., Vooren, A. v., & Alkemade, F. (2010). "Initial infrastructure development strategies for the transition to sustainable mobility" *Technological Forecasting & Social Change*, 77, 1270-1281.

[32]. Tanakaa, M., Ida, T., Murakami, K., & Friedman, L. (2014). "Consumers' willingness to pay for alternative fuel vehicles: A comparative discrete choice analysis between the US and Japan" *Transportation Research Part A* , 70, 194-209.

[33]. Tran, M., Brand, C., & Banister, D. (2014). "Modelling diffusion feedbacks between technology performance, cost and consumer behaviour for future energy-transport systems" *Journal of Power Sources*, 251: 130-136.

[34]. Daziano, R. A., & Chiew, E. (2012). "Electric vehicles rising from the dead: Data needs for forecasting consumer response toward sustainable energy sources in personal transportation" *Energy Policy*, 51, 876-894.

[35]. Weiss, M., Patel, M. K., Junginger, M., Perujo, A., Bonnel, P., & Grootveld, G. v. (2012). "On the electrification of road transport- Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles" *Energy Policy*, 48, 374-393.

[36]. Werber, M., Fischer, M., & Schwartz, P. V. (2009). "Batteries: Lower cost than gasoline?" *Energy Policy*, 37, 2465-2468.

[37]. Zhang, Y., Yu, Y., & Zou, B. (2011). "Analyzing public awareness and acceptance of alternative fuel vehicles in China: The case of EV" *Energy Policy*, 39, 7015-7042.

[۳۸]. *گزیده آمار و اطلاعات حمل‌ونقل شهری تهران (۱۳۹۱)*، تهران : معاونت و سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران.

[39]. United-Nations. (2013). Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2013), World Population Prospects: The 2012 Revision.

[40]. Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Kazemi-Karegar, H. (2014). "Optimal fast charging station placing and sizing" *Applied Energy*, 125, 289-299.

[41]. EPA. (2014). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. Available from:⟨ http://www.epa.gov/otaq/climate/documents/420f14040.pdf⟩.

[۴۲]. *اطلاعات حمل‌ونقل و انرژی کشور (۱۳۹۰)*، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی.

[۴۳]. *بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران* (۱۳۹۲)، *اعداد سالانه شاخص و نرخ تورم در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۱۵*.

[۴۴]. *آمار تفضیلی صنعت برق ایران ویژه‌ی توزیع برق در سال ۱۳۹۲(۱۳۹۳)*، شرکت مادر تخصصی توانیر.

[45]. Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world* (Vol. 19). Boston: Irwin/McGraw-Hill.

Abstract

In view of the increased concerns associated with environmental problems and energy resources, a lot of discussions have arisen about overcoming problems such as global warming, air pollution and limited fossil fuel resources. In recent years, electric vehicles utilization in transportation sector has received more attention as a solution. In this thesis, first, the factors affecting electric vehicle sale are introduced. Then, using system dynamic method, a dynamic simulation model is proposed to study and analyze the process of diffusion of electric vehicles. Considering socio-economic and technological factors and their interactive effect, the proposed model forecasts electric vehicle sale for the text three decades. Furthermore, the impact of electric vehicle utilization on energy and environmental sectors is assessed. Finally, after discovering factors exerting the most influence on electric vehicle sale, a few incentive approaches are discussed to increase the use of electric vehicles.

Keywords: electric vehicles, system dynamic, diffusion of electric vehicles, air pollution and greenhouse gases, electric power.

University of Shahrood

Faculty of Electrical Engineering

Technical-economic modeling of incentive policies for using electrical vehicles and their effects on electricity demand

by

Seyyed Ahmad Moosavi

Supervisor:

Dr. Mohsen Assili

Advisor:

Dr. Ali Dehghani

Submitted in partial fulfillment of the

requirements for the degree of

Master of Science in Electrical Engineering

at the

University of Shahrood

February 2014