تاریخ دریافت: ۱۴ شهریور ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۵ خرداد ۱۴۰۲ صفحات ۱۷۵ الی ۲۰۹

مطالعه امکان سنجی کنترل انتشار دی اکسید کربن از نیروگاه‌های حرارتی ایران از طریق CO_2-EOR

شیرین عزیزی
دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی گرایش مدیریت سیستم¬ها، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، shirinazizi۲۰۱۵@gmail.com

رضا رادفر*
گروه مدیریت صنعتی. دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم وتحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران radfar@gmail.com

هانیه نیکومرام
گروه مدیریت محیط زیست. دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست. واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، hani.nikoo@gmail.com

علی رجب زاده قطری
گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، alirajabzadeh@gmail.com

چکیده: کاهش انتشار CO_2 یکی از تحقیقات حیاتی است. اضافه بازیافت نفت از طریق تزریق CO_2 می‌تواند نقش مهمی در تحریک جذب و ذخیره کربن ایفا کند و به افزایش درآمدهای نفتی کمک کند. در این مقاله با ساخت یک مدل تولید برق و انتشار کربن از نیروگاه‌های حرارتی کشور، به شناخت و امکان‌سنجی انجام پروژه CO_2-EOR از طریق انتقال کربن حاصل از فعالیت‌های نیروگاهی توسط خط لوله اختصاصی و تزریق آن به میادین نفتی پرداخته می‌شود. بکمک ابزار مدلسازی سیستمی به منظور درک بهتر پیچیدگی‌های مسئله با طراحی زیر سیستم‌های اصلی تولید برق حرارتی و نیز تجدیدپذیر و بررسی نحوه ارتباط این زیر سیستم‌ها، تحلیل اقتصادی اولیه‌ای برای امکان‌سنجی انجام پروژه ارائه می‌گردد. نتایج انجام پژوهش ضمن تایید موفقیت قابل قبول در دستیابی به اهداف زیست محیطی و اقتصادی بر لزوم انجام تحقیقات وسیع‌تر و عمیق‌تر و توجه ویژه به استفاده از این رویکرد به عنوان فرصتی برجسته در کسب اهداف توسعه پایدار کشور تاکید می‌کند.

واژگان کلیدی: دی اکسید کربن، نیروگاه‌های حرارتی، اضافه بازیافت نفت، پویایی‌های سیستم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

مقدمه

غلظت CO_2 در اتمسفر به سطح بالای ۴۰۷/۸ ppm در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است که ۱۴۷٪ از سطوح قبل از دوره صنعتی شدن در سال ۱۷۵۰ (۲۸۰ ppm) بیشتراست (WMO, ۲۰۱۹) که در این مورد به طور گسترده اعتقاد بر این است که چنین غلظت بالایی از این گاز گلخانه‌ای یکی از دلایل اصلی گرم شدن کره زمین است (Liu, et al., ۲۰۲۲). سوزاندن سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز و زغال سنگ) برای تولید انرژی سالانه ۲۷ میلیارد تن CO_2 در جو منتشر می‌کند (زنگنه و همکاران، ۲۰۱۳). در این میان نیروگاه‌های تولید انرژی برق یکی از آلاینده‌ترین مراکز تولید و انتشار آلاینده‌ها در هوا محسوب می‌شوند. افزایش روزافزون تقاضای برق در کشورها به دلیل رشد اقتصادی و یا همزمان بهره‌وری پایین در مصرف انرژی، منجر به سوزاندن مقادیر بیشتری از سوخت برای تامین انرژی مورد نیاز می‌شود. این امر در کشورهای در حال توسعه و غنی از سوخت‌های فسیلی مانند کشورهای حوزه خلیج‌فارس محسوس‌تر است. دسترسی به سوخت ارزان و پرداخت یارانه‌های انرژی برای تولید و مصرف انرژی پیش از پیش این رویه نامناسب را تقویت می‌کند. بنابراین لازم است که کشورهای در حال توسعه، برنامه‌ریزی و راهکارهای خود را برای مواجهه و کنترل این مسئله مهم، اصلاح و بهبود بخشند.

بدین منظور جذب و ذخیره کربن(CCS[۱]) به عنوان یکی از اقدامات کلیدی در نظر گرفته می شود که برای تحقق کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در مقیاس بزرگ از بخش صنعت، تحقق حذف CO_2 از اتمسفر و در نتیجه برای دستیابی به اهداف تغییرات آب و هوایی مورد نیاز است (روفز و همکاران، ۲۰۱۹) و به عنوان استراتژی کلیدی برای کربن زدایی از بخش‌های تولید برق حرارتی و بخش صنعت در نظر گرفته می شود (آمینو و همکاران، ۲۰۱۷). در CCUS[۲]، CO_2 از منابع انتشار (به عنوان مثال، نیروگاه‌ها) گرفته می‌شود، حمل می‌شود، و سپس به طور دائم در سازه‌های زیرزمینی، مانند سفره‌های آب‌های عمیق شور و مخازن هیدروکربنی ذخیره می شود (لیو و همکاران، ۲۰۲۲). تخمین زده می‌شود که CCS تا سال ۲۰۵۰ می‌تولند به تنهایی تقریباً ۲۰٪ کاهش انتشار ایجاد کند و حذف CCS می‌تواند باعث افزایش ۷۰ درصدی هزینه جهانی دستیابی به اهداف کاهش انتشار شود (DECC,CCS, ۲۰۱۲). با این حال تا پایان سال ۲۰۱۸، ۱۹ پروژه CCS در مقیاس بزرگ در سرتاسر جهان در حال اجرا بود (روفز و همکاران، ۲۰۱۹). چهار مورد از این تاسیسات CCS، CO_2 را در یک مخزن اختصاصی ذخیره‌سازی زمین‌شناسی تزریق می‌کنند. پروژه‌های دیگر CO_2 را برای بهبود بازیابی نفت جذب و انتقال می‌دهند (روفز و همکاران، ۲۰۱۹). ویژگی‌های اصلی یک گزینه ذخیره‌سازی CO_2، کاهش خالص انتشار CO_2، ظرفیت

[۱] . carbon capture and storage (CCS)
[۲] . Carbon capture, utilization and storage (CCUS)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

ذخیره‌سازی زیاد، ذخیره‌سازی طولانی‌مدت CO_2 (حداقل چند صد سال)، هزینه معقول،جریمه انرژی(مصرف بیشتر انرژی) و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی است(یاماساکی، ۲۰۰۳). علیرغم اینکه ذخیره‌سازی CO_2 یک فناوری اثبات‌شده فنی است، استقرار بیشتر این فناوری به دلیل برخی عدم قطعیت‌ها و چالش‌های مرتبط با تخمین ظرفیت ذخیره‌سازی، ردیابی و نظارت بر CO_2 در هنگام و پس از تزریق، شناسایی لرزه‌خیزی بالقوه ناشی از تزریق، استانداردسازی معیارهای ارزیابی ذخیره‌سازی و نحوه بکارگیری مکانیسم های اخلاقی موثر به تاخیر می‌افتد (آمینو و همکاران، ۲۰۱۷).

براساس توافقنامه‌های کیوتو و پاریس کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه ملزم به کاهش انتشار دی اکسید کربن می‌باشند و بنابراین استفاده از روش‌های جذب و ذخیره سازی کربن به عنوان یک ابزار مهم و نقطه داغ پژوهشی در میان مطالعات زیست محیطی مطرح می‌باشد. در میان تمام گزینه‌های ممکن برای کربن ذخیره شده، ترکیب همزمان جذب و ذخیره دی اکسید کربن در سازه‌های زیرزمینی و اضافه بازیافت نفت (CO_2+EOR) به دلیل اینکه افزایش بازیابی نفت هزینه‌های جداسازی CO_2 را جبران می‌کند و علاوه بر آن به اهداف زیست محیطی تعیین شده نیز با شتاب بیشتری دست می‌یابد، از جذابیت بسیار بالایی برخوردار است.

ایران با داشتن میادین نفتی متعدد به عنوان یکی از مهمترین منابع عرضه سوخت فسیلی در جهان مطرح می‌باشد و از سوی دیگر به طور روز افزون با پیامدهای گسترده ناشی از آلودگی هوا و جو ناسالم مواجه است. از طرفی دیگر بسیاری از میادین بزرگ کشور به نیمه دوم عمر تولیدی خود رسیده‌اند و تولید طبیعی از آنها در معرض کاهش چشمگیری قرار گرفته است. میانگین ضریب بازیافت از میادین نفتی کشور حدود ۲۴/۵ درصد بوده که در مقایسه با میانگین ۳۴ درصدی ضریب بازیافت جهانی فاصله زیادی را نشان می‌دهد و با وجود نزدیک به ۱۲۰ میدان نفتی در کشور، فقدان اهتمام لازم برای افزایش ذخایر قابل استحصال و اجرای عملیات بهبود/ازدیاد برداشت، به یکی از چالش‌های اساسی صنعت نفت ایران تبدیل شده است (مرادی،مسلم, ۱۳۹۶).

با وجود مزایای این تکنولوژی و بکارگیری آن در برخی نقاط جهان، تاکنون هیچ پروژه ای از EOR با تزریق CO_2 در ایران به کار گرفته نشده است. مطالعات نویسندگان این مقاله نیز برای یافتن تحقیقی که بتواند به طور سیستمی و جامع محور به بررسی و شناسایی برخی ابعاد و نتایج بکارگیری آن در ایران بپردازد نتیجه‌ای در بر نداشت. از اینرو این پژوهش درصدد است تا با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی و معرفی مسیری قابل اجرا و کاربردی در خصوص کنترل انتشار دی اکسید کربن در بخش نیروگاه‌های حرارتی با لحاظ تولید بخش تجدیدپذیر و همزمان افزایش بازیافت و راندمان تولید نفت در مخازن کشور بتواند تصمیم سازان حوزه انرژی را

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

در درک پویایی‌های تولید، مصرف و به دنبال آن پیامدهای محیط زیستی ناشی از انتشارات آلاینده‌های هوا و نیز یافتن راهی برای کنترل آن یاری دهد. بدین منظور در ابتدا در قسمت روش تحقیق به معرفی زیر سیستم‌ها و نحوه ارتباط آن‌ها و شرح نمودار علی و معلولی مدل پرداخته می‌شود و در ادامه با اعتبارسنجی مدل، داده‌ها و ثابت‌های مدل ارائه شده و نتایج اجرای سناریوها تحلیل می‌شود و در انتها با ارائه نتیجه‌گیری پژوهش پایان می‌یابد.

پیشینه پژوهش

تزریق CO_2 یک فناوری EOR اثبات شده و بسیار مؤثر برای توسعه مجدد میادین نفتی با میانگین افزایشی ۵ تا ۱۵ درصد نفت درجا (OOIP[۳])، بسته به ویژگی های مخزن و راندمان روش‌های ارتقا دهنده قبلی است (چن و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین اخیراً، کشورها و شرکت‌ها با فشار شدیدی برای یافتن راه‌حل‌های پایدار برای رسیدگی به موضوع ردپای کربن از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه هستند (انگلیش و انگلیش، ۲۰۲۲). پروژه PetroNova با حمایت وزارت انرژی ایالات متحده (DOE)، بزرگترین پروژه جذب کربن را در تگزاس در سال ۲۰۱۷ ارائه کرد. بدین ترتیب CO_2 جذب شده و سپس تصفیه شده بدست آمده از گاز دودکش پس از احتراق یک نیروگاه با سوخت زغال سنگ، برای CO_2-EOR در میدان نفتی West Ranch استفاده می‌شود (الالتیتی لاوال و همکاران، ۲۰۱۹). در خارج از ایالات متحده، آرامکو عربستان سعودی پروژه CO_2- EOR را با چهار تولیدکننده و چهار انژکتور در میدان عثمانیه انجام داده است. شرکت ملی نفت ابوظبی (ADNOC[۴]) در نظر دارد برنامه جذب کربن خود را در میادین نفتی در حال بلوغ برای افزایش نرخ بازیافت نفت گسترش دهد (چن و همکاران، ۲۰۲۳). ظاهراً استفاده از CO_2 برای افزایش بازیافت نفت (EOR) به یک روند صنعتی تبدیل شده است که از ایالات متحده آمریکا شروع شده و تا خاورمیانه و اکنون درهند و چین نیز ادامه یافته است (چن و همکاران، ۲۰۲۳)(میشرا و همکاران، ۲۰۱۹). جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS) می‌تواند به طور قابل توجهی طول عمر یک میدان نفتی را افزایش دهد و انتشار CO_2 در جو را کاهش دهد(چن و همکاران، ۲۰۲۳). تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از کربن جذب شده و تزریق آن به سازه‌های زیرزمینی و میادین برای اضافه بازیافت از چاه‌های نفتی در سراسر جهان انجام شده است. بخشی از این پژوهش‌ها و نتایجی که از انجام آن‌ها حاصل شده است در ادامه ارائه می‌شود.

---

[۳] . Original Oil in Place (OOIP)
[۴] . Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

در پژوهشی که توسط رن و همکاران انجام شد، دو سناریو برای ارتقای بازیافت از ۹ حلقه چاه در منطقه اردوس باسین[۵] چین بررسی شد. تزریق مداوم گاز CO_2[۶] و تزریق متناوب آب و گاز[۷]. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در هر دو طرح، تزریق CO_2 می‌تواند به طور قابل‌توجهی تولید نفت را در مقایسه باتزریق آب[۸] افزایش دهد(رن و همکاران، ۲۰۲۳). وی و همکاران (۲۰۱۵) ارزیابی اقتصادی بکارگیری CO_2-EOR رادر میادین نفتی مستقر در خشکی چین را بررسی کردند. تحلیل حساسیت نشان می دهد که تولید تجمعی نفت و منبع ذخیره CO_2 تجمعی، به قیمت نفت خام، هزینه CO_2، طول عمر پروژه، نرخ تنزیل و سیاست مالیاتی بسیار حساس هستند. قیمت بالای نفت، طول عمر کوتاه پروژه، نرخ تنزیل پایین، هزینه CO_2 پایین و سیاست مالیاتی کم می‌تواند درآمد خالص شرکت نفت، بازیافت افزایشی نفت و منبع ذخیره CO_2 را تا حد زیادی افزایش دهد. همچنین این ارزیابی فنی-اقتصادی نشان داد که موانع اصلی برای استقرار در مقیاس بزرگ CO_2-EOR شامل شرایط پیچیده زمین‌شناسی، API پایین نفت خام، سیاست مالیاتی بالا، و عدم وجود انگیزه برای پروژه CO_2-EOR است (Wei, et al., ۲۰۱۵).کنی و همکاران گزینه‌های مختلف CO_2-EOR را با توجه به CO_2 که از منابع طبیعی استخراج می شود و CO_2 که از منابع انسانی مانند نیروگاه های PC و نیروگاه های NGCC تولید می شود، مقایسه کردند. آنها دریافتند که استفاده از منابع CO_2 انسان زا نسبت به CO_2 طبیعی برای محیط زیست مفیدتر است (کنی و همکاران، ۲۰۱۵). استوارت و هازلدین (۲۰۱۵) تخمین زدند که ۸۷ درصد و ۹۴ درصد از CO_2 جذب شده را می توان به طور بالقوه ذخیره کرد. اگرچه سناریوها و مرزهای سیستمی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، هر دو مطالعه به این نتیجه رسیدند که CO_2-EOR را می توان برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای به ازای هر واحد نفت تولید شده در صورتی که از CO_2 ذخیره شده برای جبران انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از عملیات EOR استفاده شود، اتخاذ کرد (استوارت و هازلدین، ۲۰۱۵).کلوک و همکاران (۲۰۱۰) مدلی را توسعه دادند که می تواند برای به حداکثر رساندن NPV در CO_2-EOR مورد استفاده قرار گیرد. این مدل نشان می‌دهد که درآمد، حاصل از تولید نفت اضافی و کسب اعتبار برای ذخیره‌سازی CO_2 است، در حالی که هزینه‌ها عمدتاً شامل عملیات دریایی و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها می‌شود. کمپ و کسیم (۲۰۱۳) یک مدل شبیه‌سازی مالی برای ارزیابی قابلیت اقتصادی اتصال ۹ میدان نفتی برای CO_2-EOR ساختند. آنها دریافتند که اگر میدان نفتی با میدان‌های دیگر دسته بندی شود،NPVی CO_2-EOR بیشتر از زمانی است که میدان نفتی بخشی از این شبکه نیست. روفز و همکاران(۲۰۱۹) نشان دادند که اگر CO_2 جذب شود و برای ۱۵ سال به منظور بازیافت نفت استفاده

۵ . Ordos Basin

۶ . continuous injection (CI)

۷ . water alternative gas (WAG)

۸ . waterflooding

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

شود، پتانسیل گرمایش جهانی معادل ۳/۴ $MtCO_2$ کاهش می‌یابد. کمالی و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که تزریق CO_2 امتزاج‌پذیر می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد بازیافت نفت تقویت‌شده (EOR) برای میدان جنوب غرب ایران، که یک مخزن حاوی هیدروکربن است، در نظر گرفته شود. علاوه بر این کرد و همکاران(۲۰۰۹)، داده‌های مربوط به ۱۰ مخزن جنوب غرب ایران را جمع‌آوری کردند و با معیارهای غربالگری استاندارد مقایسه کردند. آنها گزارش دادند که سیل[۹] CO_2 به عنوان کارآمدترین روش EOR برای مخازن کربناته ایران در نظر گرفته می شود. در پژوهشی دیگر علویان و کورتیس پتانسیل افزایش یافته بازیافت نفت (EOR) را برای تزریق دی اکسید کربن در میدان طبیعی "هفت کل" ایران مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با فشار مخزن فعلی ۱۵۰۰-۱۸۰۰ psi، بازیافت نفت با تزریق CO_2 برای فشار مخزن ۱۴۰۰ psi و بالاتر به ۹۰٪ نزدیک می‌شود (علویان و کورتیس، ۲۰۱۰). سلطانیه و همکاران مطالعه کردند که مخزن اهواز به دلیل اشباع بیشتر کاندید مناسبی برای تزریق دی اکسید کربن است و تخمین زده اند که این مخزن می تواند تا ۱۴۰۰ میلیون تن دی اکسید کربن را ذخیره کند(سلطانیه و همکاران، ۲۰۰۹).

روش تحقیق

همان‌طور که اشاره شد این پژوهش برای نیل به اهداف خود که بررسی انتشار دی اکسید کربن از نیروگاه‌های حرارتی و نیز تبیین اتخاذ رویکرد کنترل آن با استفاده از تزریق این گاز گلخانه‌ای به چاه‌های نفت است، از ابزار مدلسازی سیستمی استفاده کرده و بدین منظور در ابتدا مدل اصلی پژوهش را که متشکل از چند زیر سیستم است و شرح انتشار آلودگی کربنی را توضیح می‌دهد ارائه داده است. سپس در گام بعد به منظور استفاده از فنآوری CO_2+EOR ، زیر سیستم جدیدی با این هدف به مدل اصلی اضافه می‌شود. بدین ترتیب در ادامه این بخش به ارائه اهداف فوق الذکر پرداخته می‌شود.

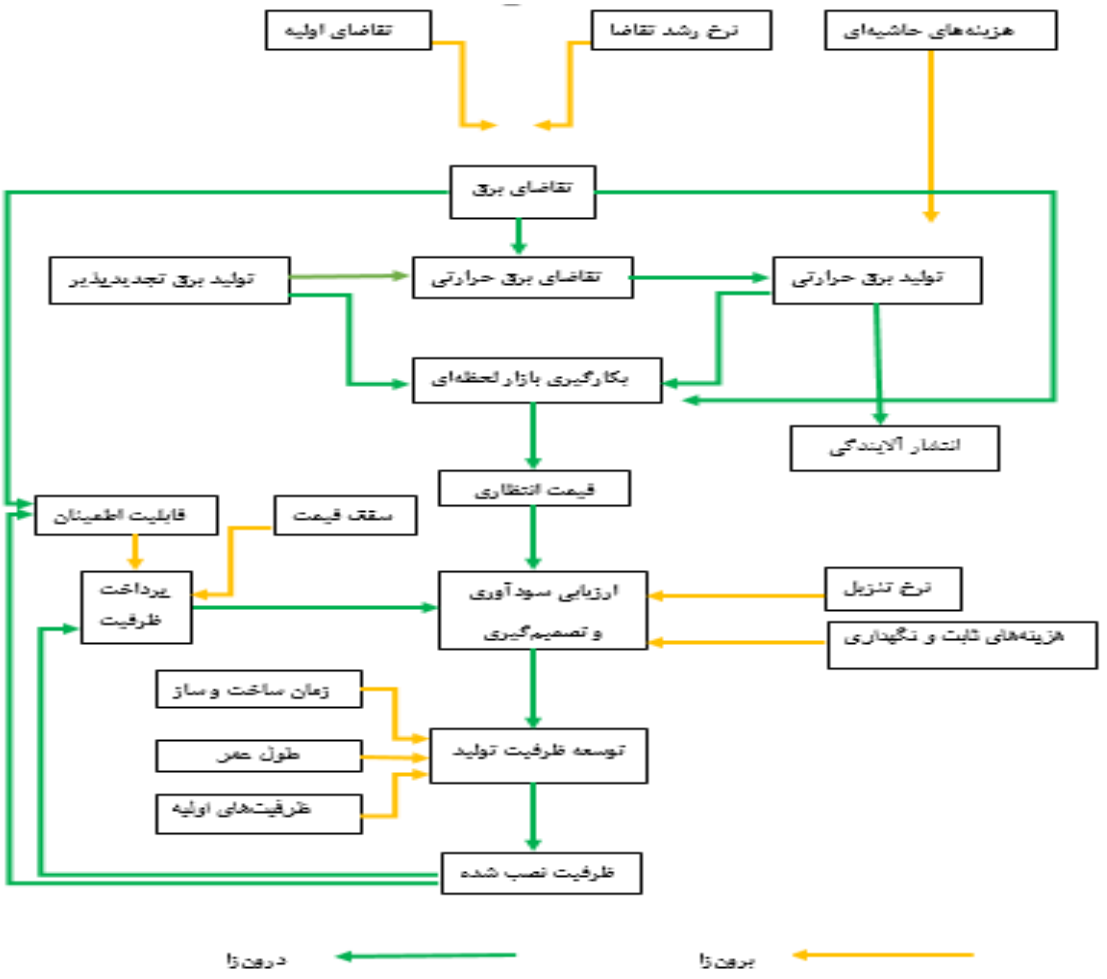
همان‌طور که در نمودار مفهومی در شکل ۱ مشخص است تقاضای تولید برق از نیروگاه‌های حرارتی با تغییر تولید برق از بخش تجدیدپذیر دچار تغییر می‌شود و سپس با وجود مکانیسم بازار و تعیین قیمت، و همچنین با لحاظ کردن هزینه‌های ثابت و شبه سرمایه‌گذاری، سود سرمایه‌گذاری محاسبه می‌شود و از این طریق سیگنال مثبت یا منفی سرمایه‌گذاری در واحد زمان ارسال خواهد شد. همچنین شایان ذکر است که در این پژوهش علاوه بر دریافت قیمت برق فروخته شده به عنوان درآمد، پرداخت‌های ظرفیت نیز بر اساس قیمت سقف اعلام شده در مدیریت شبکه کشور، قیمت لحظه‌ای بازار و همچنین قابلیت اطمینان و امنیت تامین انرژی به واحدهای تولیدی نیروگاهی پرداخت خواهد شد. ولی سایر درآمدهای جانبی نیروگاه از طریق ارائه خدمات متفاوت به وزارت نیرو و نیز جریمه‌های احتمالی اعمال شده بر تولید نیروگاه‌ها به دلیل اجتناب از پیچیدگی در این پژوهش مورد مطالعه قرار

[۹] . CO_2 flooding

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

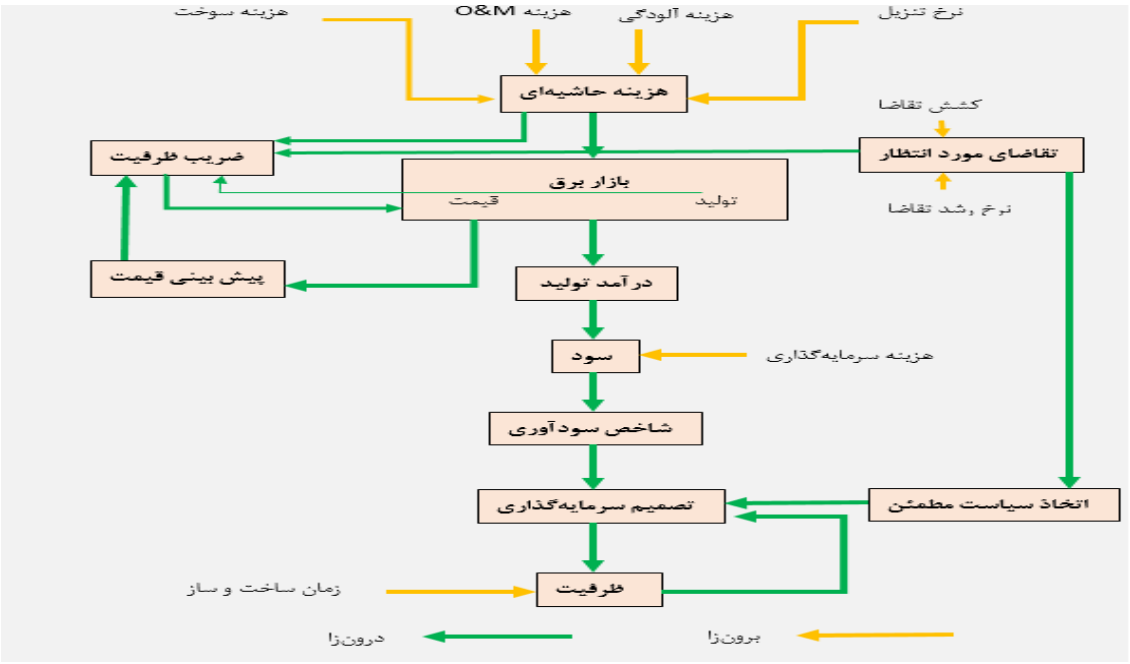
نمی‌گیرد. بر اساس میزان ظرفیت موجود نیروگاه‌های حرارتی و تولیدات هر نوع از این نیروگاه‌ها، میزان مشخصی از دی اکسید کربن در ازای تولید هر مگاوات ساعت برق منتشر خواهد شد که قاعدتا با ایجاد هزینه‌های اجتماعی گسترده، تاثیرات بسیار سوئی را بر پیکره سلامت و اقتصاد کشور خواهد گذاشت. در شکل ۲، هزینه‌های سوخت، تعمیرات و نگهداری، هزینه‌های آلودگی و نرخ تنزیل مهم‌ترین متغیرهای تاثیرگذار در محاسبه هزینه حاشیه‌ای تولید می‌باشند. سپس از طریق لحاظ کردن قیمت برق در بازار لحظه‌ای و مقایسه با هزینه حاشیه‌ای و نیز نسبت عرضه به تقاضای تولید برق حرارتی، ضریب بهره‌برداری بکارگیری نیروگاه برای تولید محاسبه می‌شود. در ادامه با مشخص شدن حجم تولید مورد نیاز، درآمد و به دنبال آن سود(به انضمام پرداخت ظرفیت) محاسبه شده و سیگنال میزان سرمایه‌گذاری ظرفیت و در نتیجه میزان تولید و انتشار آلاینده‌های حاصل از آن مشخص خواهد شد. همچنین در شکل ۳ در نیروگاه‌های تجدیدپذیر که در این مطالعه توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک مورد توجه می‌باشد، میزان سودآوری نیروگاه بر اساس میزان پرداخت نرخ پرداخت تضمینی تولید برق (بر اساس مصوبات وزارت نیرو و به تبع آن ساتبا) و نیز میزان هزینه لازم به منظور سرمایه‌گذاری و نصب نیروگاه می‌باشد. در این مطالعه فرض شده که نیروگاه‌های مقیاس خانگی در اولویت هستند و در نتیجه هزینه جانبی خریداری زمین و اتصالات به شبکه اصلی در این پژوهش لحاظ نشده است. در این پژوهش فرض شده که میزان پرداخت بابت خرید تضمینی برق همگام با اعلام سیاست کلان توسعه انرژی پاک کشور و به منظور کسب درصد مطلوب بکارگیری نیروگاه‌های پاک در عرصه انرژی کشور می‌باشد. همچنین میزان سرمایه مورد نیاز برای نصب نیروگاه به مرور زمان شامل اثرات تورمی و نیز اثرات نرخ‌های متفاوت یادگیری خواهد شد که در بخش نمودارهای علی مورد بحث قرارخواهند گرفت.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

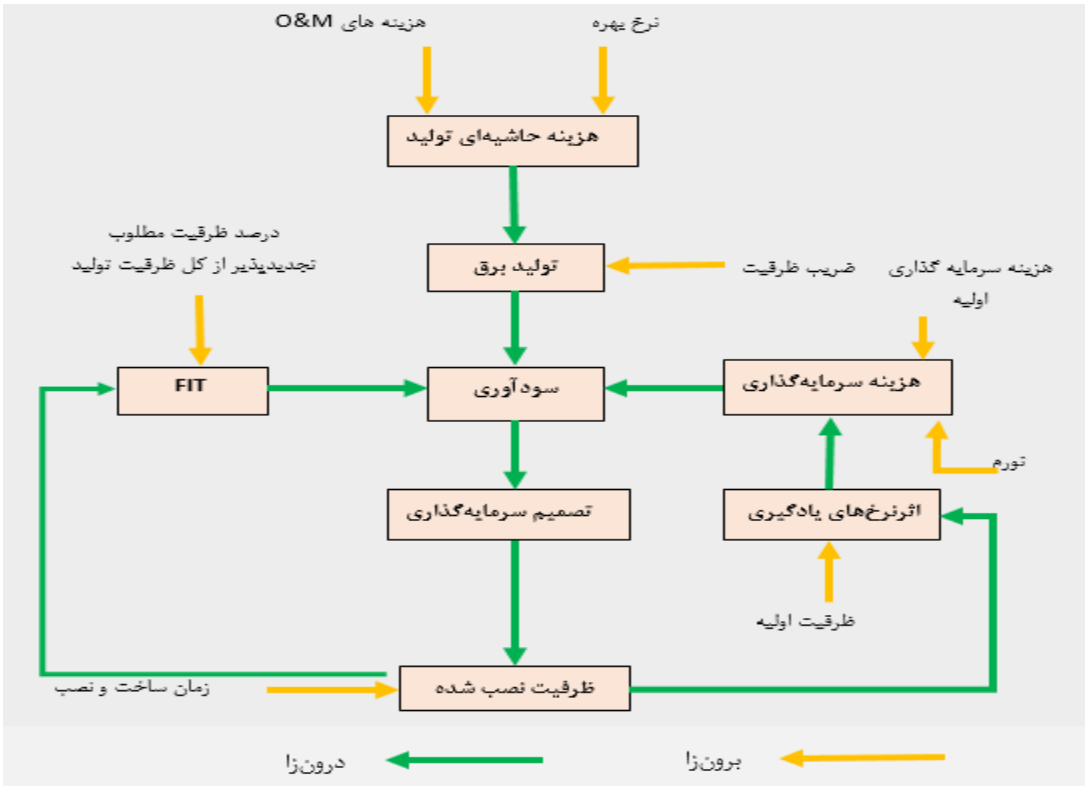


شکل ۱: نمودار مفهومی کلی پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل ۲: نمودار مفهومی نیروگاه‌های تولید برق حرارتی

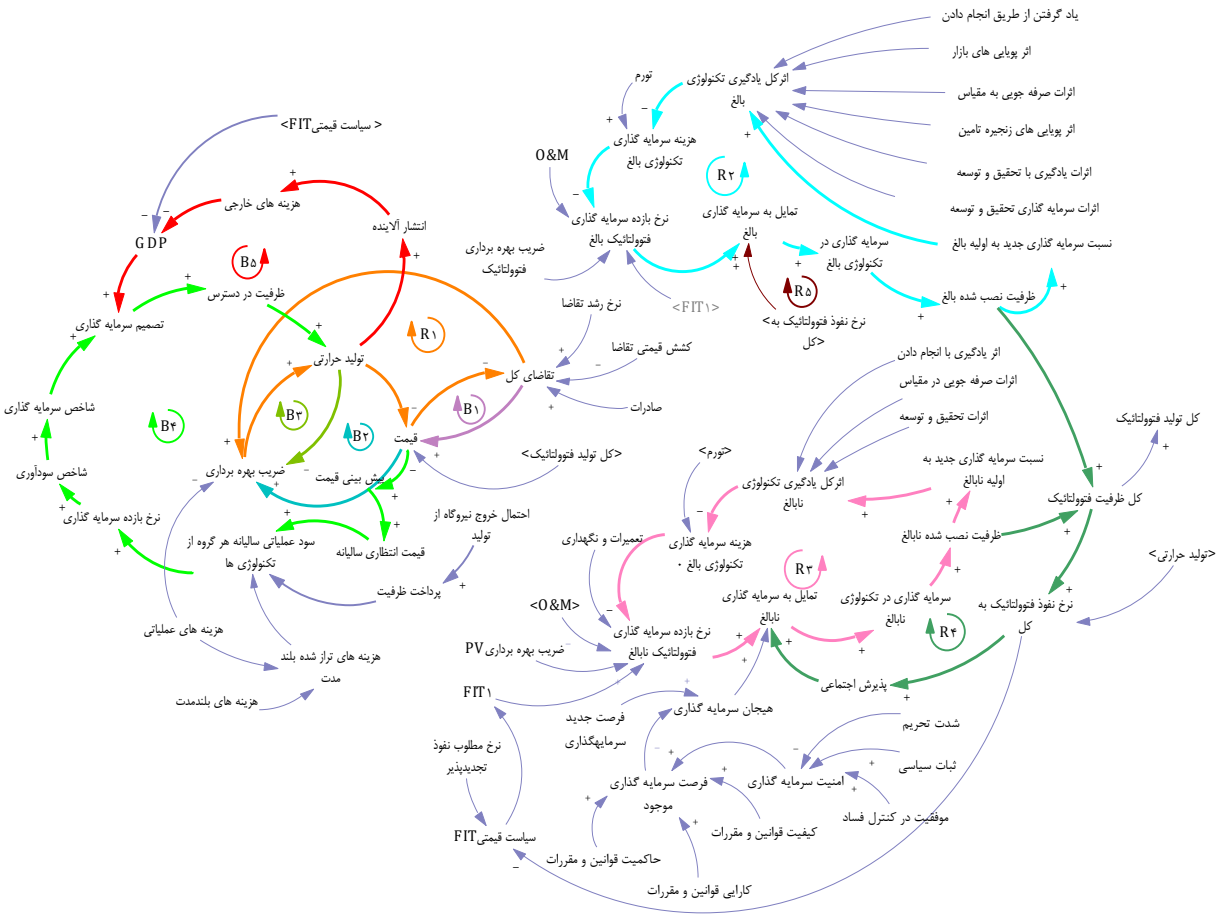


شکل ۳: نمودار مفهومی نیروگاه‌های تولید برق تجدیدپذیر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

برای تعیین روابط علّی و معلولی مسئله در شکل ٤ از ادبیات پژوهش و پیشینه و نیز نظر خبرگان استفاده شده است. در ادامه به ارائه و توضیح بخش‌ها و زیر سیستم‌های مدل پرداخته خواهد شد. بدین ترتیب در ادامه اهم حلقه‌های کارکردی سیستم مورد بحث قرار می‌گیرد. درحلقه R۱ با افزایش تقاضای کل که همگام با افزایش جمعیت، رشد اقتصادی، افزایش شهرنشینی و ... شکل می‌گیرد، ضریب بهره‌برداری از نیروگاه‌ها نیز افزایش می‌یابد (ایبانز و همکاران، ۲۰۱۷). این افزایش میزان تولید برق از نیروگاه‌های حرارتی را افزایش می‌دهد(موحد نسب و همکاران ۲۰۱۷) و در نتیجه با افزایش میزان عرضه انرژی برق، قیمت برق را در بازار لحظه‌ای کاهش می‌دهد(موحد نسب و همکاران ۲۰۱۷)(دناپنری و باسی، ۲۰۱٦). در نهایت این کاهش قیمت به نوبه خود شرایط افزایش تقاضا را ایجاد می‌کند و بدین ترتیب حلقه تقویت کننده R۱ ایجاد می‌شود. حلقه B۱ در واقع روتین ترین و رایج ترین جریان حاکم بر تعادل اقتصاد است که رابطه معکوس بین قیمت و تقاضا را به تصویر کشیده است (احمد و همکاران، ۲۰۱٦). در حلقه B۲ عامل قیمت و هزینه عملیاتی به عنوان عوامل تاثیرگذار بر میزان ضریب بهره‌برداری مطرح می‌شود (موحدنسب و همکاران، ۲۰۱۷). بدین صورت که با افزایش قیمت ضریب بهره‌برداری افزایش می‌یابد و بالعکس و همچنین با افزایش هزینه عملیاتی، ضریب بهره‌برداری کاهش می‌یابد و بالعکس. در حلقه B۳ نشان داده شده که میزان و سطح تولید برق نیز در تعیین ضریب بهره‌برداری از نیروگاه جزء عوامل اصلی در نظر گرفته می‌شود(سایسل و مصطفی، ۲۰۱۳). از بعدی دیگر با افزایش تولید برق حرارتی و بدنبال آن کاهش قیمت برق در بازار، این کاهش قیمت در پیش بینی قیمت بازاری سالیانه با تاخیر زمانی معلوم، لحاظ می‌شود و بدین ترتیب سود عملیاتی سالیانه هر گروه از تکنولوژی‌های تولید برق حرارتی شامل نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، توربین بخار و گازی کاهش می‌یابد (حسنی مرزونی و حسینی، ۲۰۱۳). در نتیجه شاخص سودآوری کاهش می‌یابد و به دنبال آن سیگنال منفی سرمایه‌گذاری در گروه‌های تکنولوژی ارسال می‌شود(ایبانز و همکاران، ۲۰۱۷)(موحدنسب و همکاران، ۲۰۱۷)(اولسینا و همکاران، ۲۰۰٦). در نتیجه تصمیم و اقدام برای سرمایه‌گذاری و افزایش ظرفیت کاهش می‌یابد که در نتیجه آن با تاخیر زمانی، ظرفیت در دسترس تولید برق کاهش می‌یابد(اولسینا و همکاران، ۲۰۰٦). به مرور زمان ظرفیت‌های جدید وارد میانسالی و ظرفیت‌های میانسال به ظرفیت‌های قدیمی تبدیل می‌شوند و با کاهش راندمان تولید، برق تولیدی نیز کاهش می‌یابد. همچنین ظرفیت‌های قدیمی به مرور از مدار تولید خارج شده و به دلیل عدم سرمایه‌گذاری به دلیل سیگنال منفی سودآوری، ظرفیت تولید برق و در نتیجه عرضه برق در میان مدت و بلند مدت کاهش می‌یابد. با کاهش عرضه برق و عدم تامین تقاضا، قیمت در بازار افزایش یافته و این بار مسیر معکوس جریان توضیح داده شده طی می‌شود و بدین صورت حلقه B٤ تاثیرات متعادل کننده خود را در سیستم اعمال می‌کند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل ٤: نمودار علی و معلولی پژوهش

در حلقه متعادل کننده B۵ با افزایش میزان تولید از نیروگاه‌های تولید برق حرارتی، انتشـــار آلاینده‌های هوا در گروه‌های مختلف از جمله CO_2 ، اکســـیدهای نیتروژن، اکســـیدهای گوگرد، PM ها و ... افزایش می‌یابد. با افزایش انتشار آلاینده‌های هوا هزینه‌های خارجی انتشار آن ازجمله هزینه‌های بهداشت و سلامت، ساعات موثر زندگی افراد جامعه و میزان بهره‌وری آن‌ها، هزینه‌های شهری و ساختمانی، باران‌های اسیدی و اثر آن بر سایر جانداران و زیســـتگاه‌های طبیعی، فرســـایش خاک، گرمایش زمین و تاثیر آن بر میزان بارش و در نتیجه خشـــکســـالی‌های متعدد، آلودگی آب‌های زیر زمینی و ... افزایش می‌یابد. در نتیجه با وجود اینکه تحمیل این هزینه‌ها تا حد بسیار زیادی در تولید ناخالص ملی کشور محاسبه و اعلام نمی‌شود، لاکن حقیقت ماجرا حاکی از تاثیر مســـتقیم انتشـــار این آلاینده‌ها بر میزان واقعی تولید ناخاص کشـــور می‌باشـــد. در نتیجه کاهش میزان تولیدات واقعی ناخالص کشور بر تصمیم به سرمایه گذاری در نیروگاه‌ها تاثیرگذار است و از این مسیر تاثیر بر بخش انرژی اعمال می‌شود. در قسمت تجدیدپذیر(سمت راست شکل٤) همان طور که مشخص است روند

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

تولید انرژی برق توسط نیروگاه‌های فتوولتائیک قرار گرفته که البته با تغییر پارامترهای ورودی به مدل، قلبل تعمیم به سایر تکنولوژی‌های تولید انرژی تجدیدپذیر به خصوص نیروگاه‌های بادی می‌باشد. لازم به ذکر است که تولیدات سایر بخش‌های نیروگاه‌های بخش تجدیدپذیر از جمله آبی، به صورت برون زا وارد مدل خواهد شد که در نمودار علی به دلیل اختصار و توجه به متغیرهای اصلی وارد مدل نشده است. ساختار کلی الگوی مورد بررسی در قسمت تجدیدپذیر به صورت تفکیک تکنولوژی‌های تولیدی به دو بخش نیمه بالغ(آزمایشگاهی و نیمه صنعتی) و بالغ (تولید انبوه و تجاری سازی شده می‌باشد). این تفکیک با توجه به میزان سرمایه مورد نیاز برای تولید هر محصول و نیز تاثیرات نرخ‌های متفاوت یادگیری و نوآوری در هر گروه می‌باشد. مراحل اصلی سپری شده برای تولید و تکامل یک محصول به طور کلی شامل گام‌های زیر است:

مرحله تحقیق و توسعه (تحقیق و توسعه)، ارائه و نمایش محصول(رو نمایی و معرفی)، شکل‌گیری بازار و در نهایت تجاری سازی کامل می‌باشد (الیا و همکاران، ۲۰۲۰). برای سهولت بررسی و به دلیل محدودیت اطلاعات آماری در دسترس این ٤ مرحله به دو مرحله کلی دسته بندی می‌شوند. مرحله تحقیق و توسعه و ارائه محصول و شکل گیری اولیه بازار(محصول نابالغ)، و مرحله شکل گیری بازار اولیه تا تجاری‌سازی بازار کامل(محصول بالغ))(الیا و همکاران، ۲۰۲۰). به طور سنتی و در تقریبا قریب به اتفاق پژوهش‌هایی که در زمینه ارزیابی تاثیر محرک‌های یادگیری در کاهش هزینه تولید محصول لحاظ شده است تنها متغیر یادگیری با انجام[۱۰] و یا در موارد معدودی تاثیرات تحقیق و توسعه[۱۱] لحاظ شده است. لاکن محرک‌هایی که در مراحل توسعه یک فناوری به کاهش هزینه کمک می کنند، می‌توانند به صورتی جامع و مفید به صورت زیر دسته‌بندی شوند و در انجام این پژوهش تمام این موارد در شکل دهی هزینه موثر در تصمیم سرمایه‌گذاری لحاظ می‌شود. به طور کلی متغیرهای یادگیری و نوآوری در توسعه محصول شامل موارد زیر است و در هر مرحله از توسعه محصول نرخ‌های یادگیری و نوآوری با مقادیر متفاوت تاثیرگذار است.

یادگیری از طریق پژوهش یا تحقیق علمی(LBR):

کاهش هزینه‌های حاصل از پیشرفت‌های فنی یک فناوری را به عنوان یک نتیجه از ایجاد دانش در طول فعالیت های تحقیقاتی توصیف می‌کند

یادگیری از طریق استقرار و گسترش که می‌تواند به اجزای زیر تفکیک شود:

---

[۱۰] . learning by-doing (LBD)

[۱۱] . Learning by-researching, or by-searching (LBR)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

یادگیری از طریق انجام کار (LBD)[۱۲]، یادگیری با استفاده و کاربری محصول (LBU)[۱۳] و یادگیری از طریق تعامل (LBI)[۱۴] که در ادبیات آن را سرریزی یادگیری[۱۵] نیز می‌نامند. LBD مربوط به کاهش هزینه‌های حاصل از تجربه به دست آمده در طی فرایند تولید است، مانند پیشرفت در مدیریت و دانش کار به دست آمده. LBU مربوط به پیشرفت‌های ناشی از بازخورد دریافت شده توسط کاربران در طی فعالیت‌های عملیاتی است. LBI مربوط به کاهش هزینه‌های ناشی از تبادل دانش از طریق تعامل با سایر بازیگران در طول زنجیره ارزش فناوری مانند معیارگذاری بین صنایع و مراکز تحقیقاتی است (LBI درون صنعت و بین صنایعی[۱۶]). همچنین شامل دانش رد و بدل شده بین دو مکان مختلف، مانند همکاری‌های مشترک در بازارهای جدید (LBI جغرافیایی) است. سرریز دانش نیز تا حدی به دلیل دانش حاصل از دستاوردهای سایر فناوری‌ها است که می‌تواند به عنوان قسمت سرریز بین صنعت در نظر گرفته شود. اقتصاد مقیاس[۱۷] (ES) در سطح دستگاه، کارخانه و صنعت نیز به کاهش هزینه‌های فناوری کمک می‌کند. افزایش مقیاس در سطح تجهیزات به ویژه برای فناوری‌های تجدیدپذیر برای دستیابی به تأثیر مثبت یا منفی بر هزینه‌ها بسیار مهم است (الیا و همکاران، ۲۰۲۰).

بازارها همچنین برکاهش هزینه‌ها تأثیر می‌گذارند، در این حالت محرک‌های بازار تولید، پویایی مربوط به زنجیره تأمین (SCD[۱۸]) را توضیح می‌دهند، که شامل در دسترس بودن مواد ورودی و قیمت بازاری آن‌ها، هزینه تأمین، تغییر سرمایه و هزینه‌های نیروی کار است. علاوه بر این تقاضای بازار (MD) دینامیک مربوط به بازار فروش را شامل می‌شود، که شامل تعداد بیشتری از رقبا و اجرای مقررات جدید زیست‌محیطی است. سیاست‌های اقدامی جذب بازار مانند مشوق‌های تعرفه‌ای[۱۹] نیز در این مورد موثر است که در این پژوهش به این سیاست و تاثیر آن در رشد نفوذ تامین انرژی از منابع خورشیدی مورد توجه قرار گرفته است. در نمودار ۵ گروهی از نتایج مطالعات مختلف در مورد نرخ‌های مختلف کاهش هزینه را برای تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیرخورشیدی و باد به تصویر کشیده است (Elia, et al. ۲۰۲۰). لازم به ذکر است که این مقادیر پس از نرمالایز شده به صورت توابع Lookup وارد مدل خواهند شد.

---

۱۲ . learning by-doing (LBD)

۱۳. learning by-using (LBU)

۱۴ . learning by-interacting (LBI)

۱۵ . spillover of learning

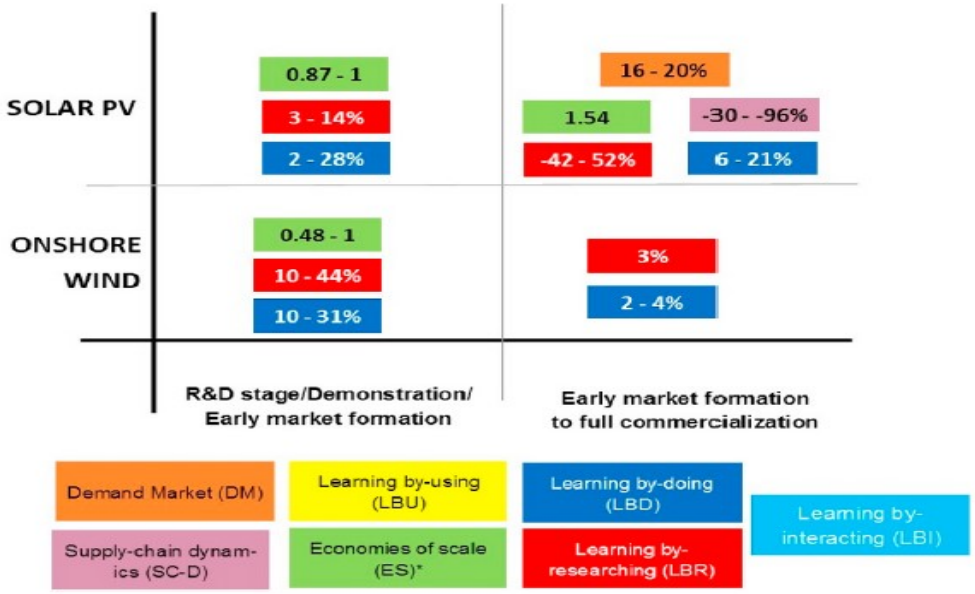
۱۶ . inter-industry -between industries

۱۷ . economies of scale

۱۸ . Supply-Chain Dynamics (SCD)

۱۹ . feed-in tariff incentives (FiT)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل ۵: نرخ‌های مختلف کاهش هزینه

در حلقه‌های R۲ و R۳ با تاثیرگذاری افزایش نرخ‌های کاهش هزینه در هر گروه از تکنولوژی‌های بالغ و نیمه بالغ، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در تولید و نصب تکنولوژی کاهش یافته (هسو، ۲۰۱۲)(موسویان و همکاران، ۲۰۲۰) و پس از الحاق اثر تورمی سالانه با توجه به کاهش نسبی هزینه تولید، نرخ بازده سرمایه‌گذاری افزایش یافته و در نتیجه تمایل به سرمایه‌گذاری در هر گروه افزایش می‌یابد (موسویان و همکاران، ۲۰۲۰) (احمد و همکاران، ۲۰۱۵). بدنبال آن ظرفیت‌های نصب شده در هر دو گروه از تکنولوژی افزایش یافته و با افزایش نسبت ظرفیت نصب شده جدید به ظرفیت اولیه، میزان نرخ‌های کاهنده هزینه و بدنبال آن اثر کل یادگیری تکنولوژی با افزایش مواجه می‌شود.

با افزایش مجموع ظرفیت نصب شده بالغ و نابالغ، نسبت تولید انرژی از منبع خورشیدی به کل تولید انرژی افزایش یافته و بدین ترتیب ضریب نفوذ اجتماعی استفاده از آن ارتقا می‌یابد (موسویان و همکاران، ۲۰۲۰). این امر موجب افزایش پذیرش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و رواج آن در جامعه می‌شودکه به نوبه خود تمایل به سرمایه‌گذاری را در هر دو گروه از تکنولوژی‌ها افزایش می‌دهد. این چرخه تقویت شونده وضعیت تاثیرگذاری حلقه‌های R٤ و R٥ را توضیح می‌دهد(احمد و همکاران، ۲۰۱۵).

همچنین تمایل به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی نیمه بالغ با توجه به اعمال سیاست حمایتی در سال ۱۳۹۴ و ایجاد فرصت جدید سرمایه‌گذاری تضمین شده از سوی دولت، در اوایل وضع قانون حمایتی فراتر از میزان سوددهی اقتصادی با استقبال توسعه در نصب مواجه می‌شود و در واقع سرمایه‌گذاری در آن توام با هیجان می‌باشد، لاکن

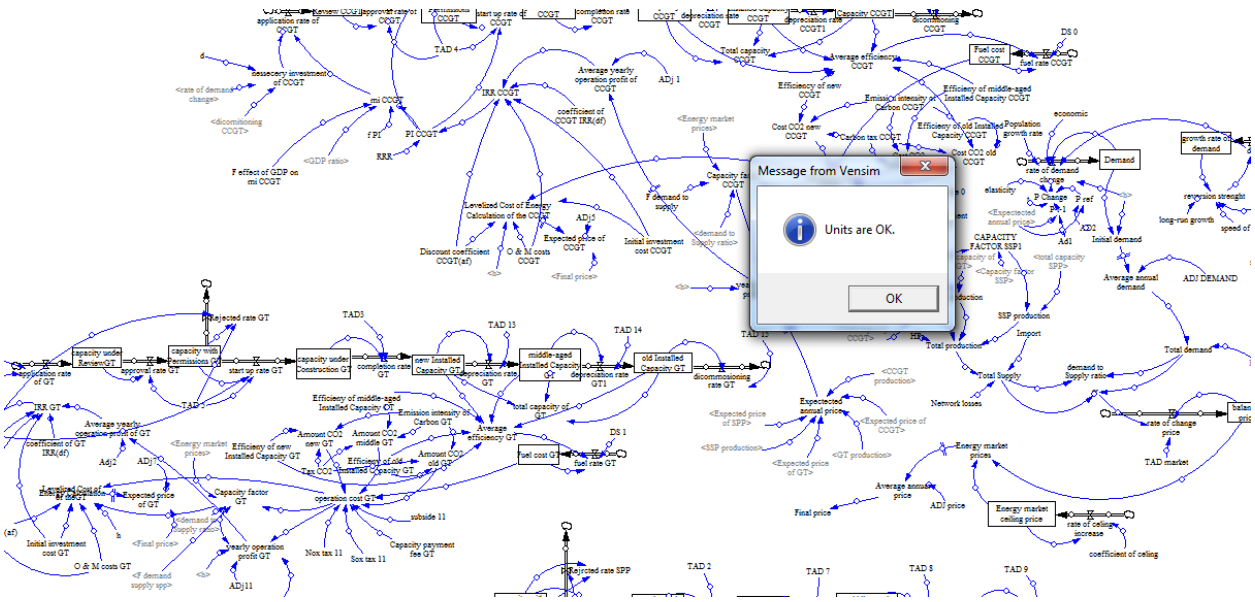
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

پس از گذشت مدتی شرایط استقبال از این فرصت جدید به حالت طبیعی و صرفا بر اساس تحلیل و سودآوری اقتصادی بازگشته و این هیجان به مرور تخلیه می‌شود. در قسمت ضمائم نمودار جریان پژوهش ارائه شده است.

اعتبار بخشی مدل

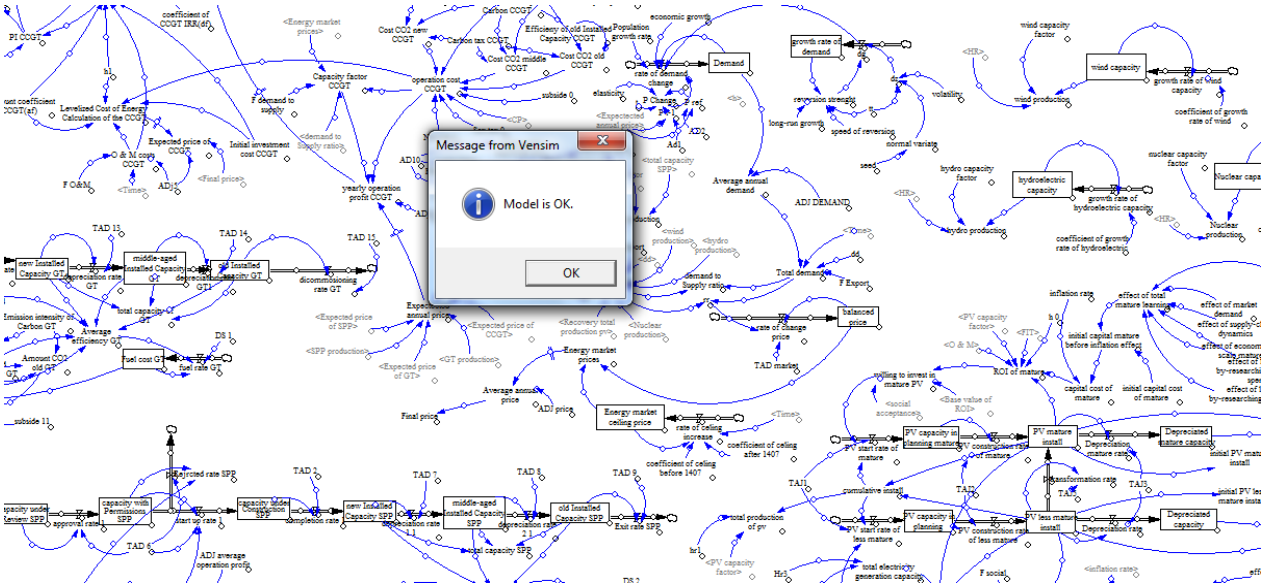
آزمون‌های اعتبار ساختاری مدل

در این آزمون‌ها اعتبار مدل از جهت تناظر ساختار، اجزا و عناصر آن با سیستم واقعی مورد آزمون قرار می‌گیرد. در آزمون کفایت مرزهای مدل نمودار حالت-جریان برای چند تن از خبرگان و مطلعان در صنعت برق شرح داده شد و در نهایت مدل مورد تأیید قرار گرفت. برای آزمون اول سازگاری ابعاد، صحت ابعاد لحاظ شده برای متغیرهای مختلف در نمودارهای جریان که از طریق روابط ریاضی به صورت زنجیروار به همدیگر وابسته‌اند توسط نرم افزار Vensim مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پنجره‌ای که از طریق اجرای دستور Units Check در بخش Model در نرم‌افزار در صحفه نمودارهای جریان ظاهر می‌شود، با عبارت " Units are OK " به معنی "تمامی واحدها صحیح هستند "بیانگر درست بودن موضوع انتخاب و ورود واحدها در مدل‌های ریاضی می‌باشند. نتیجه این آزمون در شکل۶ ارائه شده است.



شکل ٦: نتیجه آزمون سازگاری ابعاد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل ۷: نتیجه آزمون سازگاری مدل

همچنین برای اعتبارسنجی مدل‌های جریان از لحاظ کامل بودن اطلاعات ورودی و مناسب بودن ورود توابع ریاضی و کاربرد تمامی متغیرهای تعریف شده در روابط ریاضی مدل، آزمون سازگاری مدل تعریف می‌شود که با اجرای دستور Check Model از بخش Model در نرم افزار Vensim ، عبارت "Model is Ok" در پنجره‌ای در مدل ظاهر می‌شود. در نتیجه انجام مکرر این آزمون و اعمال اصلاحات متوالی، نهایتاً اعتبار ساختار مدل چنانچه در شکل ۷ ارائه شده است، مورد تأیید قرار گرفت.

آزمون‌های اعتبار رفتاری مدل

از میان تست‌های رفتاری مدل به دلیل محدودیت در فضای مقاله تنها تست باز تولید رفتار ارائه می‌شود. با توجه به توضیحات فوق‌الذکر آزمون بازتولید رفتار صرفا به منظور تایید قرار گرفتن در محدوده‌ای نسبتا قابل قبول انجام می‌گیرد. در این روش ابتدا مقادیر واقعی از طریق نرم ساعتی در واقع به توزیع فراوانی نسبی تبدیل می‌شود و بی مقیاس شده و سپس با محاسبه از طریق رابطه معرفی شده در جدول، مقادیر نرمالایز شده مرجع با مقادیر بی مقیاس شده شبیه‌سازی شده مقایسه می‌شود. داده‌های واقعی برای این محاسبات از سایت وزارت نیرو و فایل‌های اکسل منتشر شده توسط آن و نیز ترازنامه انرژی منتشر شده در سال ۱۳۹۷ اقتباس شده است. بنابراین این مقایسه صرفا از سال ۸۹ تا سال ۹۷ صورت می‌پذیرد. نتایج این تست در قسمت ضمایم ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است مقایسه نتایج در حالت واقعی و در حالت شبیه سازی، از شباهت نسبی حکایت دارد که این میزان نزدیکی به دلیل پیچیدگی مدل قابل قبول می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

داده‌های اولیه و ثابت‌های مدل

داده‌های مورد نیاز برای مدلسازی از گزارش‌های شرکت مادر تخصصی توانیر(۵۰ سال برق ایران در آیینه آمار و ۵۳ سال برق ایران در آیینه آمار)، ترازنامه‌های انرژی منتشر شده توسط وزارت نیرو(سال ۱۳۸۷، ۱۳۹۵، ۱۳۹۷) و نقشه آلایندگی نیروگاه‌های ایران منتشر شده توسط پژوهشگاه نیرو می‌باشند. علاوه بر آن مقدار برخی متغیرهای کلان مربوط به وضعیت سیاسی، اقتصادی، حقوقی و فرهنگی اجتماعی برگرفته از گزارش‌های تحلیلی سامانه مدیریت عملکرد دولت و گزارش‌های تحلیلی نتایج ارزیابی عملکرد دستگاه‌های اجرایی از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۳۹۶ مجموعه وزارت نفت استخراج گردیده است. مواردی که شاخص به طور کمی و قابل اندازه‌گیری موجود نبود با استفاده از توابع look up و نظر خبرگان صنعت برق و نیز مطالعه پژوهش‌ها و مقالات منتشر شده مرتبط تعریف گردید. در ادامه برخی مقادیر اولیه و پارامترهای اصلی مدل ارائه می‌شود.

جدول ۱ : پارامترهای اقتصادی و ویژگی های فناوری تولید

پارامتر	مقدار اختصاص یافته				منابع داده ها
کشش قیمتی بلند مدت تقاضا	-۰/۱۲۸				(حسنی-مرزونی و حسینی، ۲۰۱۳) (حسنی و حسینی، ۲۰۱۱a) (اسماعیلی و احمدیان، ۲۰۱۸)
نرخ رشد مورد انتظا سالیانه تقاضا (%/year)	۵				(موحدنسب، ۲۰۱۷) (حسنی مرزونی و حسینی، ۲۰۱۳)
نرخ رشد اقتصادی سالیانه تقاضا (%/year)	۲				بانک مرکزی ایران، ۲۰۲۲
قیمت اولیه FIT (Rials/KWh/Year)	۴۰۰۰				ساتبا، ۲۰۲۰
	PV	ST	GT	CCGT	
ظرفیت در حال ساخت(MW)		۶۴۰	۲۲۶۹۰	۱۷۳۴۰	شرکت توانیر، ۲۰۱۰
ظرفیت نصب شده جدید(MW)		۲۵۳۵	۱۶۹۴	۱۰۰۰۰	شرکت توانیر، ۲۰۱۰
ظرفیت نصب شده میانسال(MW)		۴۹۲۵	۵۹۳۳	۰	شرکت توانیر، ۲۰۱۰
ظرفیت نصب شده قدیمی		۷۴۷۵	۲۸۶۹	۰	شرکت توانیر، ۲۰۱۰
ظرفیت اولیهPV(KW)	۷۵				وزارت نیروی ایران، ۲۰۱۱
متوسط زمان ساخت(year)	۰/۲۵	۵	۲	۵	(شرکت توانیر، ۲۰۱۰) (رضایی، ۲۰۱۲)
طول عمر(year)	۲۰	۴۵	۴۰	۴۰	حسنی مرزونی و حسینی، ۲۰۱۳
*هزینه سرمایه گذاری(Rials/MW)	۳.۵e+۰۸	۱e+۱۰	۵e+۰۹	۶e+۰۹	حسنی مرزونی و حسینی ۲۰۱۱b
قیمت سوخت(Rials/MWh)	۰	۱۰۳۵۰۰	۱۱۸۰۰۰	۹۸۰۰۰	(مردانی، ۲۰۱۸) (وزارت نفت، ۲۰۱۶)

*. ارزش ریالی دلار آمریکا در سال ۱۳۸۷ برابر با ۱۰۰۰۰ ریال بوده است. در ضمن تمام محاسبات و ارزش‌گذاری‌ها در این پژوهش با احتساب نرخ ۲۵۰۰۰۰ ریال برای هر دلار آمریکا انجام می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

هزینه ثابت تعمیرات و نگهداری (Rials/MW/year)		۱.۶e+۰۸	۱.۶e+۰۸	۱.۶e+۰۸	حسنی مرزونی و حسینی ۲۰۱۲b،۲۰۱۱b
هزینه متغیر تعمیرات و نگهداری (Rials/MWh)		۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	مردانی، ۲۰۱۸
هزینه تعمیر و نگهداری PV (Rials/KW/year)	۳۷۵۰۰				در این پژوهش این مقدار لحاظ شده است، به دلیل فقدان منابع داده ای رسمی با مشورت صنایع فعال حاصل شد
راندمان نیروگاه‌های جدید(%)		۴۵	۲۹.۹	۴۷	وزارت نیروی ایران، ۲۰۱۱
راندمان نیروگاه‌های میانسال(%)		۳۹	۲۹	۴۱/۵	وزارت نیروی ایران، ۲۰۱۱
راندمان نیروگاه‌های قدیمی(%)		۳۵	۲۵	۴۰	وزارت نیروی ایران، ۲۰۱۱
راندمان نیروگاه‌های جدید PV(%)	۱۶				در این پژوهش این مقدار لحاظ شده است، به دلیل فقدان منابع داده ای رسمی با مشورت صنایع فعال حاصل شد
نرخ انتشار(Kg/MWh)	۰	۷۳۱	۸۶۱/۸	۴۹۳	پژوهشگاه نیرو، ۲۰۱۵
هزینه انتشار اولیه دی اکسید کربن در سال ۱۳۸۷(Rial/Kg)		۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	پژوهشگاه نیرو، ۲۰۱۵

تحلیل نتایج

در این پژوهش دو سناریو تحت بررسی قرار می‌گیرد. سیاست نصب و بکارگیری سیستم‌های CCS به منظور کنترل انتشار دی اکسید کربن و سیاست نصب و بکارگیری سیستم‌های CCUS و تزریق کربن به چاه‌های نفت به منظور ازیاد در برداشت نفت از چاه‌های فعال موجود به منظور کنترل انتشار دی اکسید کربن. به منظور اجرای سیاست نصب تکنولوژی‌های ضبط و ذخیره کربن، پارامترهای زیر به صورتی که توضیح داده خواهد شد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سناریو فرض بر این است که پس از نصب تکنولوژی و جذب و ذخیره کربن، کربن ذخیره شده به صورت خام و بدون ورود به زنجیره تولید صنایع جدید در بازار مربوطه به فروش می‌رسد. مقادیر پارامترهای جدول ۲ از سایت‌های مبادله و فروش گازهای گلخانه‌ای و همچنین مقاله (لی و همکاران، ۲۰۲۰) اقتباس شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده در اعمال سیاست CCS

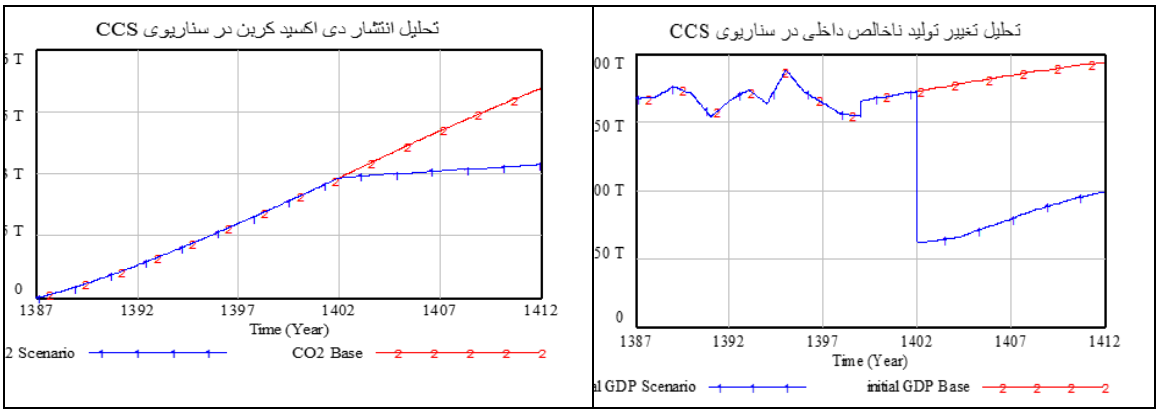
ضریب کاهش کربن با نصب تکنولوژی (Dmnl)	۸۵/۷۱٪
ضریب هزینه بکارگیری تکنولوژی CCS*(Rial/kg)	۲۲۵۰۰
قیمت فروش دی اکسید کربن ضبط شده** (Rial/Kg)	۲۵۰۰

*. با توجه به مطالعه صورت گرفته هزینه بکارگیری تکنولوژی CCS حداکثر حدود ۹۰ دلار برای هر تن دی اکسید کربن می‌باشد که با در نظر گرفتن مبلغ فرضی هر دلار ۲۵۰۰۰۰ ریال، هزینه بکارگیری آن برای هر کیلوگرم دی اکسید کربن ۲۲۵۰۰ ریال خواهد شد.

**. توجه به مطالعات صورت گرفته قیمت هر تن دی اکسید کربن برای فروش بسته به شرایط قرارداد، مکان فروش و یا تبادل، خلوص دی اکسید کربن، نوع پروژه برای تبادل کربن ، استانداردی که تولید کربن که تحت آن تولید شده ، مزایای مشترک مربوط به پروژه و ... بین ۱ تا ۵۰ دلار در هر تن می‌باشد. در این پروژه این مقدار ۱۰ دلار در هر تن در نظر گرفته شده که با نرخ دلار ۲۵۰۰۰۰ ریال، قیمت تقریب هر کیلوگرم ۲۵۰۰ ریال بر کیلوگرم محاسبه شد.

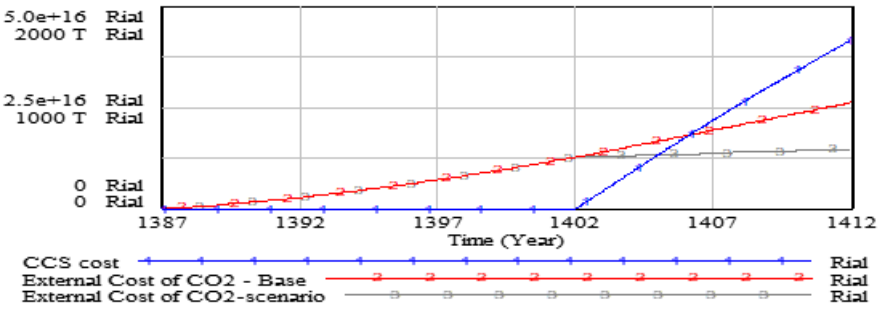
در ساختار جدید تاثیر بکارگیری تکنولوژی و فروش کربن حاصل از آن بر روی میزان انتشار دی اکسید کربن و نیز تغییرات تولید ناخالص داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه خروجی‌های حاصل از اجرای سیاست ارائه می‌شود. شکل۸ نشان می‌دهد که پس از نصب تکنولوژی، حجم دی اکسید کربن در حال انتشار کاملا کنترل شده و از روند فزاینده آن به شدت کاسته می‌شود لاکن هزینه استفاده از آن با وجود فروش مقادیر جذب شده در بازار نمی‌تواند بر هزینه‌های تحمیلی استفاده از آن فایق آید. در ادامه ابعاد بیشتری از اعمال این سیاست بررسی می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل ۸: تغییرات ایجاد شده در سیاست نصب CCS و فروش کربن ضبط شده

در شـــکل۹، CCS Cost هزینه بکارگیری تکنولوژی می‌باشـــد و هزینه‌های خارجی در حالت پایه و در حالت سناریو(بکارگیری تکنولوژی) با یکدیگر هم مقیاس شده است. همان‌طور که مشخص است هزینه‌های بکارگیری تکنولوژی به شدت بالاست ولی هزینه‌های خارجی ناشی از انتشارات دی اکسید کربن بعد از بکارگیری آن (خط با شماره ۳)، به شدت کاهش می‌یابد.

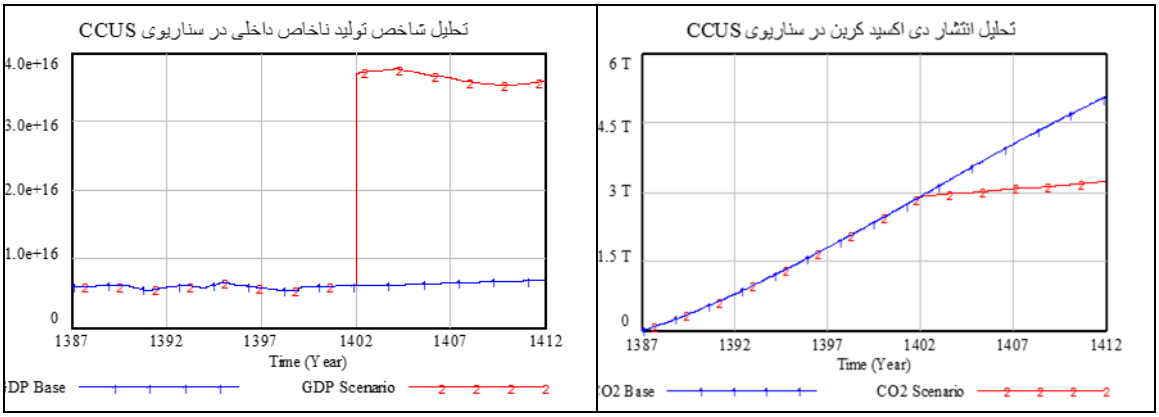


شکل ۹: تحلیل هزینه‌ای نصب تکنولوژی CCS

در ادامه به تحلیل نتایج اجرای سیاست نصب و بکارگیری سیستم‌های CCUS و تزریق کربن به چاه‌های نفت به منظور ازیاد در برداشت نفت از چاه‌های فعال موجود می‌پردازیم. صنعت نفت با مصرف جهانی سالانه حدود ۷۰ تا ۸۰ میلیون تن (در سال ۲۰۱۷) CO_2 برای (EOR-CO_2) بزرگترین مصرف کننده CO_2 با منبع خارجی است. CO_2 EOR -یک فناوری تجاری تثبیت شده است که از دهه ۱۹۷۰، عمدتا در ایالات متحده استفاده می‌شود. این فناوری شامل تزریق CO_2 به میادین نفتی برای افزایش تولید نفت است. این کار فشار کلی مخزن را افزایش می دهد و تحرک روغن را بهبود می‌بخشد و در نتیجه جریان نفت به سمت چاه‌های تولید بیشتر می‌شود. سایر کشورهایی که از CO_2-EOR استفاده می کنند، اما در مقیاس کوچکتر، برزیل، کانادا، چین و ترکیه هستند(آژانس بین‌المللی انرژی سند استفاده از دی اکسید کربن ۲۰۱۹ . بسیاری از میادین بزرگ کشور به نیمه دوم عمر تولیدی خود رسیده‌اند و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

تولید طبیعی از آنها در معرض کاهش چشم‌گیری قرار گرفته است. میانگین ضریب بازیافت از میادین نفتی کشور حدود ۲۴/۵ درصد بوده که در مقایسه با میانگین ۳۴ درصدی ضریب بازیافت جهانی فاصله زیادی را نشان می‌دهد. اگرچه ضریب بازیافت از مخازن به ویژگی‌های سنگ و سیال هر مخزن بستگی دارد و به طور عام نمی‌توان مقایسه اصولی انجام داد، اما نگاهی به صنعت نفت و گاز جهانی نشان می‌دهد ضریب بازیافت از این میادین، غالباً با روش‌های تخلیه ثانویه و ثالثیه افزایش قابل توجهی داشته است. با وجود نزدیک به ۱۲۰ میدان نفتی در کشور، فقدان اهتمام لازم برای افزایش ذخایر قابل استحصال و اجرای عملیات بهبود/ازدیاد برداشت به یکی از چالش‌های اساسی صنعت نفت ایران تبدیل شده است. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد تزریق گاز مناسب‌ترین راه حل برای برداشت ثانویه و نگهداشت فشار اغلب میادین ایران است؛ اگرچه تزریق آب نیز به عنوان یکی دیگر از مهمترین روش‌ها لازم است در مخازن خاص موردنیاز اجرا گردد. پژوهش‌ها نشان داده است تزریق ۲۰۰ میلیون متر مکعب روزانه گاز به مدت ۱۵ سال سبب تولید ۱۵ میلیارد بشکه نفت اضافی از میدان خواهد شد؛ اگر حداقل ۷۵ مترمکعب جایگزین یک بشکه نفت گردد. این در حالی است که در بدترین شرایط حداکثر ۲۰۰ مترمکعب گاز موجب تولید یک بشکه نفت اضافی خواهد گردید که منجر به افزایش ۵/۴۷ میلیارد بشکه ای نفت قابل استحصال خواهد گردید(مرادی ۱۳۹۶). از طرف دیگر، در سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی (بندهای ۱۴ و ۱۵) به افزایش ظرفیت تولید نفت به منظور اثرگذاری بر بازارهای بین المللی تأکید ویژه ای شده است. نتیجه تقویت پروژه‌های ازدیاد برداشت در میادین کشور را می‌توان در ابعاد مختلف افزایش تولید ناخالص داخلی، افزایش درآمدهای نفتی، افزایش ظرفیت تولید نفت و حتی تقویت اثرگذاری بیشتر و مؤثر در بازارهای جهانی نفت بررسی نمود(مرادی ۱۳۹۶). بدین ترتیب این سیاست با بکارگیری پارامترهای جدول ۳ وارد مرحله تحلیل به شرح زیر خواهد شد. نتایج اعمال سیاست به شرح زیر می‌باشد.



شکل ۱۰: نمودار تغییر متغیرهای انتشار دی اکسید کربن و تولید ناخالص داخلی در سیاست تزریق کربن به چاه‌های نفت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

جدول ۳: پارامترها و ثابت‌های سیاست تزریق کربن به چاه‌های نفت

ضریب جذب و ذخیره کربن[۱] (Dmnl)	۰/۸۵۷۱	قیمت فروش هر کیلوگرم صادرات گاز[۲] (Rial/Kg)	۱۲۴۷۰۱
هزینه تزریق دی اکسید کربن به چاه‌های نفت [۳] (Rial/Kg)	۲۹۴۸۱/۱	ضریب هزینه بکارگیری تکنولوژیCCS[۴] (Rial/Kg)	۲۲۵۰۰
ضریب مصرف دی اکسید کربن برای اضافه برداشت یک کیلوگرم نفت خام[۵](Dmnl)	۲/۱۳	متوسط ظرفیت هر بشکه نفت خام (Kg)	۱۲۷/۲
ضریب نسبت چگالی دی اکسید کربن به گاز طبیعی [۶] (Dmnl)	۲/۷۶۱	متوسط قیمت هر بشکه نفت خام[۷] (Rial)	۱۲۵۰۰۰۰۰
نسبت تزریق گاز به مقدار کل کربن ضبط شده (Dmnl)	۰/۵		

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

[۱]. (لی و همکاران، ۲۰۲۰)

[۲]. ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۷. متوسط قیمت خرید گاز کشورهای OECD حدود ۱۰ دلار در هر میلیون Btu می‌باشد که با تبدیل به کیلوگرم و در نظر گرفتن قیمت دلار به متوسط نرخ سال ۱۴۰۰ یعنی ۲۵۰۰۰۰ ریال مقدار پارامتر حاصل شده است.

[۳]. . سند استفاده و کاربرد دی اکسید کربن منتشرشده توسط آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۹، در صحفه ۲۳ اشاره کرده که هزینه تزریق دی اکسید کربن برای اضافه برداشت یک بشکه نفت خام، ۷/۵–۱۵ دلار امریکا هزینه دارد که در این پژوهش بیشترین مقدار یعنی ۱۵ دلار در هر بشکه لحاظ شد. البته در مسیری دیگر مقدار دی اکسید کربن تزریقی مورد نیاز برای برداشت یک بشکه نفت (مقادیر مقاله (مسلم ۱۳۹۶) پس از تبدیل به کیلوگرم و متوسط گیری) ۲۷۱/۸۳ کیلوگرم بدست آمد، و سپس با لحاظ کردن هزینه تزریق یک تن دری اکسید کربن اشاره شد در سند آژانس(۱۵–۳۰ دلار آمریکا) هزینه تزریق برای حصول یک کیلوگرم نفت خام ۱۶۰۲۷/۷ریال/کیلوگرم محاسبه شد. در نهایت پر هزینه‌ترین گزینه با مقدار عنوان شده در جدول وارد مدل شد.

[۴]. در سناریوی قبل توضیح داده شده است.

[۵]. متوسط وزن هر بشکه نفت ۱۲۷/۲کیلوگرم لحاظ شده است و متوسط وزنی دی اکسید کربن لازم برای تزریق و استحصال یک بشکه نفت اضافی،۲۷۱/۸۳کیلوگرم لحاظ شده است. با نسبت گیری از دو عدد فوق مقدار پارامتر محاسبه شده است.

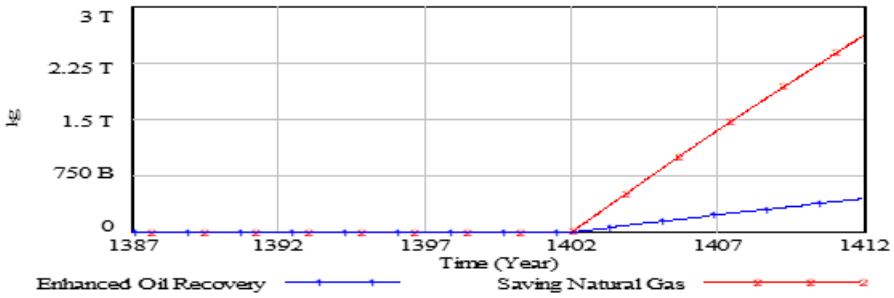
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

[۶]. با نسبت گیری نسبت وزنی دو گاز دی اکسید کربن و گاز طبیعی از جداول تبدیل واحد حاصل شده است.

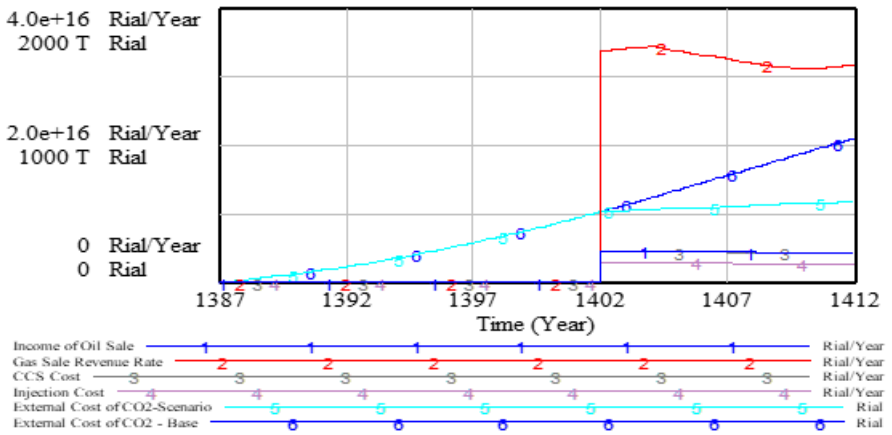
[۷]. با در نظر گرفتن متوسط قیمت هر بشکه نفت ۵۰ دلار آمریکا و قیمت ارز ۲۵۰۰۰۰ ریالی محاسبه شده است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد با اجرای سیاست جذب کربن و تزریق آن به چاه‌های نفت، روند تجمیعی افزایش انتشار دی اکسید کربن به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر آن تولید ناخالص داخلی نیز با فرض شروع اجرای سیاست از سال ۱۴۰۲ به طور فوق‌العاده افزایش می‌یابد. سایر نتایج اعمال این سیاست به شرح شکل ۱۲ ارائه می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل ۱۱: تحلیل تغییرات گاز طبیعی و نفت در سناریو CCUS



شکل ۱۲: تحلیل درآمدی و هزینه‌ای در سناریوی تزریق کربن به چاه‌های نفت

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

دفتر زمین شناسی اقتصادی تگزاس (BEG) تخمین زده است که ۷۷۶ مخزن نفت و گاز طبیعی قابل امتزاج در منطقه ساحل خلیج فارس وجود دارد که می توانند ابتدا برای EOR و سپس برای ذخیره سازی با حجم بالا مورد استفاده قرار گیرند(هیل و همکاران، ۲۰۱۳). این پژوهش با هدف کنترل پیامدهای انتشار دی اکسید کربن تولید

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

شده از منابع نیروگاه‌های تولید برق حرارتی ایران انجام شده است. برای دستیابی به این هدف امکان سنجی استفاده از دی اکسید کربن منتشر شده توسط نیروگاه‌ها که از طریق جذب و ضبط آن صورت می‌گیرد برای تزریق در چاه‌های نفت کشور به منظور ازدیاد بازیافت در تولید نفت و افزایش راندمان تولیدی در این صنعت مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی‌که مسئله تولید و انتشار در نیروگاه‌ها چند وجهی و چند جانبه می‌باشد و بررسی پیچیدگی‌های آن در طی زمان معلول توجه به تغییرات ده‌ها متغیر و همزمان تاثیرات آن‌ها بر یکدیگر در طی زمان است، استفاده از ابزار مدلسازی سیستمی به منظور درک و شناخت بیشتر پویایی‌های مورد مطالعه و سناریوپردازی در آن مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور پس از تشکیل مدل و طی مراحل اعتبارسنجی، دو سناریو جذب و ضبط کربن به تنهایی و جذب و ضبط کربن و تزریق آن به چاه‌های نفت با محاسبه پارامترهای اختصاصی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اعمال سیاست نصب و بکارگیری سیستم‌های CCS نشان داد که پس از نصب تکنولوژی حجم دی اکسید کربن در حال انتشار کاملا کنترل شده و از روند فزاینده آن به شدت کاسته می‌شود لاکن هزینه استفاده از آن با وجود فروش مقادیر کربن جذب شده در بازار نمی‌تواند بر هزینه‌های تحمیلی استفاده از آن فایق آید و بدین ترتیب هزینه سنگینی بر صنعت برق تحمیل خواهد شد. لاکن با اجرای سیاست جذب کربن و تزریق آن به چاه‌های نفت، روند تجمیعی افزایش انتشار دی اکسید کربن به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر آن تولید ناخالص داخلی نیز با فرض شروع اجرای سیاست از سال ۱۴۰۲ به طور فوق‌العاده و بیش از ۳ برابر افزایش می‌یابد. این نتیجه با خروجی تحقیقات در ایالات متحده و چین نیز هم راستاست. چنانکه تنها در ایالات متحده، تخمین زده شده که صنعت CO_2-EOR می تواند درآمد۱/۲ تریلیون دلاری را برای جذب و تحویل CO_2 از نیروگاه‌های سوخت فسیلی و تاسیسات صنعتی فراهم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

کند. علاوه بر این، با فناوری «نسل بعدی»، بخشCO_2-EOR ، در طول سی سال، فعالیت اقتصادی داخلی معادل ۸/۵ تریلیون دلار را تنها در ایالات متحده ایجاد خواهد کرد و به این ترتیب و به همان اندازه مهم، ۳۰ میلیارد تن دی‌اکسید کربن انسانی که در غیر این صورت به اتمسفر تخلیه می‌شد، به‌طور دائم ذخیره می‌شود (هیل و همکاران، ۲۰۱۳)(والوری و همکاران، ۲۰۲۲)(انجمن تجزیه کربن ایالات متحده، ۲۰۱۱). همچنین در مطالعه‌ای که توسط لیو و همکاران در چین انجام شد نشان داده شد که تنها از طریق کربن زدایی نیروگاه‌های زغال‌سوز و انتقال کربن حاصل با خطوط انتقال کمتر از ۱۰۰ کیلومتر می‌توان تریلیون‌ها یوآن در هزینه‌های صنعت برق صرفه‌جویی کرد(لیو و همکاران، ۲۰۲۲). طبیعتا اگر پارامترهای ورودی به مدل با نتایج محاسبات کارشناسی وزارت نفت کشور صورت گیرد، نتایج حاصل از اجرای این سیاست بسیار دقیقتر خواهد بود. در نتیجه نتایج این پژوهش لزوم توجه به برنامه‌ریزی برای تحقیقات وسیع‌تر و عمیقتر را برای استفاده از فرصتی که هزینه فرصت از دست رفته اهمال در آن برای منافع بلندمدت کشور خسارت بار به شمار می‌رود مورد تاکید قرار می‌دهد.

منابع

مرادی،مسلم. (۱۳۹۶). بررسی وضعیت افزایش ضریب بازیافت و ازدیاد برداشت در میادین نفتی ایران. *اکتشاف و تولید نفت و گاز*, ۱-۸.

Ahmad, S., Tahar, R. M., Muhammad-Sukki, F., Munir, A. B., & Rahim, R. A. (۲۰۱٦). Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56*, ۲۹-۳۷. doi:http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱٥,۱۱,۰۳٤

Ahmad, S., Tahar, R. M., Munir, A. B., Muhammad-Sukki, F., & Rahim, R. A. (۲۰۱٥). Role of feed-in tariff policy in promoting solar photovoltaic investments in Malaysia: A system dynamics approach. *Energy, 84*, ۸۰۸-۸۱٥. doi:http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.energy.۲۰۱٥,۰۳,۰٤۷

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

Alavian, S. A., & Curtis H, W. (۲۰۱۰). CO۲ EOR Potential in Naturally Fractured Haft Kel Field. Iran. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, ۷۲۰-۷۲۹.

Aminu, M. D., Nabavi, S. A., Rochelle, C. A., & Manovic, V. (۲۰۱۷). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, ۱-۱٤۲.

Central Bank of Iran. (۲۰۲۲). *Economic indicators, number 107.* Central Bank of Iran. Retrieved from https://www.cbi.ir/simplelist/۲۳۹۳۳.aspx

Chen, P., Bose, S., Selveindran, A., & Thakur, G. (۲۰۲۳). Application of CCUS in India: Designing a CO۲ EOR and storage pilot in a mature field. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 124*, ۱-۱۵. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.ijggc.۲۰۲۳,۱۰۳۸۵۸

Cooney, G., Littlefield, J., Marriott, J., & Skone, T. (۲۰۱۵). Evaluating the climate benefits of CO۲ enhanced oil recovery using life cycle analysis. *Environ. Sci. Technol, 49*(۱۲), ۷٤۹۱-۷۵۰۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۲۱/acs.est.۵b۰۰۷۰۰

Council, U. S. (۲۰۱۱). *Enhanced Oil Recovery & CCS.*

DECC,CCS. (۲۰۱۲). *CCS Roadmap - Supporting deployment of Carbon Capture and Storage in the.*

Deenapanray, P. N., & Bassi, A. M. (۲۰۱٦). System dynamics modelling of the power sector in mauritius. *Environmental and Climate Technologies*, ۲۰-۳۵. doi:۱۰,۱۵۱۵/rtuect-۲۰۱۵-۰۰۱۰

Elia, A., Kamidelivand, M., Rogan, F., & Gallachóir, B. Ó. (۲۰۲۰). Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱-۳۱. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۲۰,۱۱۰٤۸۸

English, J. M., & English, K. L. (۲۰۲۲). An overview of carbon capture and storage and its potential role in the energy transition. *First Break, 40*(٤), ۳۵-٤۰. doi:https://doi.org/۱۰,۳۹۹۷/۱۳٦۵-۲۳۹۷.fb۲۰۲۲۰۲۸

Esmaieli, M., & Ahmadian, M. (۲۰۱۸). The effect of research and development incentive on wind power investment, a system dynamics approach. *Renewable energy, 126*, ۷٦۵-۷۷۳. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۸,۰٤,۰۰۹

Hasani, M., & Hosseini, S. H. (۲۰۱۱a). Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms. *Energy, 36*(۱), ۲۷۷-۲۹۳. doi:http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.energy.۲۰۱۰,۱۰,۰٤۱

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

Hasani-Marzooni, M., & Hosseini, S. H (۲۰۱۱b). Dynamic model for market-based capacity investment decision considering stochastic characteristic of wind power. *Renewable Energy, 36*(۸), ۲۲۰۵-۲۲۱۹. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۱,۰۱,۰۱۸

Hasani-Marzooni, M., & Hosseini, S. H. (۲۰۱۲b). Trading strategies for wind capacity investment in a dynamic model of combined tradable green certificate and electricity markets. *IET generation, transmission & distribution, 6*(٤), ۳۲۰-۳۳۰. doi:۱۰,۱۰٤۹/iet-gtd.۲۰۱۱,۰۲۳٤

Hasani-Marzooni, M., & Hosseini, S. H. (۲۰۱۳). Dynamic analysis of various investment incentives and regional capacity assignment in Iranian electricity market. *Energy policy, 56*, ۲۷۱-۲۸٤. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.enpol.۲۰۱۲,۱۲,۰٥۹

Hill, B., Hovorka, S., & Melzer, S. (۲۰۱۳). Geologic carbon storage through enhanced oil recovery. *Energy Procedia, 37*, ٦۸۰۸-٦۸۳۰.

Hsu, C.-W. (۲۰۱۲). Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. *Applied energy,* ۱۰۰, ۲۰٥-۲۱۷. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.apenergy.۲۰۱۲,۰۲,۰۳۹

Ibanez-Lopez, A. S., Martinez-Val, J. M., & Moratilla-Soria, B. Y. (۲۰۱۷). A dynamic simulation model for assessing the overall impact of incentive policies on power system reliability, costs and environment. *costs and environment, 102*, ۱۷۰-۱۸۸. doi:http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.enpol.۲۰۱٦,۱۲,۰۲٦

IEA. (۲۰۱۹). Putting CO۲ to Use , Creating value from emissions. ۲۳.

Kamali, F., Khosravi, M., Vahidi, A., & Roayaei, E. (۲۰۱۱). Miscible GOGD Using CO۲ in One of the Iranian Fractured Reservoirs - A Case Study. *SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia*. doi:https://doi.org/۱۰,۲۱۱۸/۱٤٤۹۳٥-MS

Kemp, A., & Kasim, S. (۲۰۱۳). The economics of CO۲-EOR cluster developments in the UK Central North Sea. *Energy Policy, 62*, ۱۳٤٤–۱۳٥٥. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.enpol.

Klokk, O., Schreiner, P., Pages-Bernaus, A., & Tomasgard, A. (۲۰۱۰). Optimizing a CO۲ value chain for the Norwegian continental shelf. *Energy Policy, 38*, ٦٦۰٤–٦٦۱٤. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.enpol.۲۰۱۰,۰٦,۰۳۱.

Kord, S., Zerafat, M., Ayatollahi, S., & Zobeidi, K. (۲۰۰۹). Screening of Iranian Carbonate Oil Reservoirs for CO۲ Injection. *12th National Iranian Chemical Engineering Congress*.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

Lee, B. J., Lee, J. I., Yun, S. Y., Lim, C. S., & Park, Y. K. (۲۰۲۰). Economic evaluation of carbon capture and utilization applying the technology of mineral carbonation at coal-fired power plant. *Sustainability, 12*(۱۵), ۱-۱٤. doi:۱۰,۳۳۹۰/su۱۲۱٥٦۱۷٥

Liu, S. Y., Ren, B. L., Yang, Y. Z., Wang, Z. Q., Wang, B., & ... & Agarwal, R. (۲۰۲۲). CO۲ storage with enhanced gas recovery (CSEGR): A review of experimental and numerical studies. *Petroleum Science, 19*, ٥۹٤-٦۰۷. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.petsci.۲۰۲۱,۱۲,۰۰۹

Liu, S., Li, H., Zhang, K., & Lau, H. C. (۲۰۲۲). Techno-economic analysis of using carbon capture and storage (CCS) in decarbonizing China's coal-fired power plants. *Journal of Cleaner Production, 351*. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jclepro.۲۰۲۲,۱۳۱۳۸٤

Mardani, H. (۲۰۱۸). A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the Ph.D. degree. Sharif University of Technology, Management and Economics. Tehran: Sharif University of Technology.

Mishra, G. K., Meena, R. K., Mitra, S., Saha, K., Dhakate, V. P., Prakash, O., & Singh, R. K. (۲۰۱۹). Planning India's First CO۲-EOR Project as Carbon Capture Utilization & Storage: A Step Towards Sustainable Growth. *In SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. OnePetro.* doi:https://doi.org/۱۰,۲۱۱۸/۱۹٤٦۲۹-MS

Ministry Of Energy. (۲۰۱۱). Retrieved from https://moe.gov.ir/

Mousavian, H. M., Shakouri, G. H., Mashayekhi, A. N., & Kazemi, A. (۲۰۲۰). Does the short-term boost of renewable energies guarantee their stable long-term growth? Assessment of the dynamics of feed-in tariff policy. *Renewable Energy, 159*, ۱۲٥۲-۱۲٦۸. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۲۰,۰٦,۰٦۸

Movahednasab, A., Masoud, R., & Amir, A. (۲۰۱۷). A system dynamics analysis of the long run investment in market-based electric generation expansion with renewable resources. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 27*(۸), ۱-۱٤. doi:۱۰,۱۰۰۲/etep.۲۳۳۸

Olalotiti-Lawal, F., Onishi, T., Kim, H., Datta-Gupta, A., Fujita, Y., & Hagiwara, K. (۲۰۱۹). Post-combustion carbon dioxide enhanced-oil-recovery development in a mature oil field: model calibration using a hierarchical approach. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 22*(۳), ۹۹۸-۱۰۱٤. doi:https://doi.org/۱۰,۲۱۱۸/۱۸۷۱۱٦-PA

Olsina, F., Garcés, F., & Haubrich, H.-J. (۲۰۰٦). Modeling long-term dynamics of electricity markets. *Energy Policy, 34*, ۱٤۱۱-۱٤۳۳. doi:۱۰,۱۰۱٦/j.enpol.۲۰۰٤,۱۱,۰۰۳

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

Ren, D., Wang, X., Kou, Z., Wang, S., Wang, H., Wang, X., . . . Zhang, R. (۲۰۲۳). Feasibility evaluation of CO۲ EOR and storage in tight oil reservoirs: a demonstration project in the Ordos Basin. *Fuel, 331*. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.fuel.۲۰۲۲,۱۲٥٦٥۲

Rezaee, H. (۲۰۱۲). Modeling And Policy Simulation Of Long Run of Restructured Electricity Market Of Iran:Hybrid System Dynamics And Optimization Approachs. Doctoral dissertation, Imam Sadiq (a.s) University, Islamic Studies And Economics Science, Tehran.

Roefs, P., Moretti, M., Welkenhuysen, K., Piessens, K., & Compernolle. (۲۰۱۹). CO۲-enhanced oil recovery and CO۲ capture and storage: An environmental economic trade-off analysis. *Journal of environmental management, 239*, ۱٦۷-۱۷۷. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jenvman.۲۰۱۹,۰۳,۰۰۷

SATBA. (۲۰۲۰). Tehran: Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA). Retrieved from https://www.satba.gov.ir/en/home

Saysel, A. K., & Mustafa, H. (۲۰۱۳). Exploring the options for carbon dioxide mitigation in Turkish electric power industry: System dynamics approach. *Energy Policy, 60*, ٦۷٥-٦۸٦. doi:http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.enpol.۲۰۱۳,۰٤,۰٥۳

Soltanieh Mohammad, E. A. (۲۰۰۹). Feasibility Study of Carbon Dioxide Capture from Power Plants and other Major Stationary Sources and Storage in Iranian Oil Fields for Enhanced Oil. *Energy Procedia, 1*(۱), ۳٦٦۳-۳٦٦۸. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.egypro.۲۰۰۹,۰۲,۱٦۳

Stewart, R., & Haszeldine, R. (۲۰۱٥). Can producing oil store carbon? Greenhouse Gas footprint of CO۲-EOR, offshore North Sea. *Environ. Sci. Technol, 49*(۹), ٥۷۸۸–٥۷۹٥. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۲۱/es٥۰٤٦۰۰q

TAVANIR Co. (۲۰۱۰). *The detailed annual data of Iran electric power ndustry: generation section in 2009–2010.*

Valluri, S., Claremboux, V., & Kawatra, S. (۲۰۲۲). Opportunities and challenges in CO۲ utilization. *journal of environmental sciences, 113*, ۳۲۲-۳٤٤. doi:https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jes.۲۰۲۱,۰٥,۰٤۳

Wei, N., Li, X., Dahowski, R. T., Davidson, C. L., Liu, S., & Zha, Y. (۲۰۱٥). Economic evaluation on CO۲-EOR of onshore oil fields in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 37*, ۱۷۰-۱۸۱. doi:Economic evaluation on CO ۲ -EOR of onshore oil fields in China

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

WMO. (۲۰۱۹). WMO Greenhouse Gas Bulletin: the State of Greenhouse Gases in the. Retrieved from https://library.wmo.

Yamasaki, A. (۲۰۰۳). An overview of CO۲ mitigation options for global warming—emphasizing CO۲ sequestration options. *Journal of chemical engineering of Japan, 36*(٤), ٣٦١-٣٧٥. doi:https://doi.org/١٠,١٢٥٢/jcej.٣٦,٣٦١

Zangeneh, H., Jamshidi, S., & Soltanieh, M. (۲۰۱۳). Coupled optimization of enhanced gas recovery and carbon dioxide sequestration in natural gas reservoirs: Case study in a real gas field in the south of Iran. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 17*, ٥١٥-٥٢٢. doi:http://dx.doi.org/١٠,١٠١٦/j.ijggc.٢٠١٣,٠٦,٠٠٧

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

ضمائم

جدول الف : محاسبه شاخص میانگین خطا ظرفیت نیروگاه سیکل ترکیبی

سال	رفتار مرجع	مقدار نرمالایز شده داده مرجع	رفتار شبیه سازی	مقدار نرمالایز شده رفتار شبیه سازی	$\frac{(Actual\ Data - Simulation\ Data)}{Actual\ Data}$
۱۳۸۹	۱۳۹۸۳.۵	۰.۰۸۳۷۴۶۶۷۲	۱۷۹۱۰	۰.۰۸۷۵۶۲۳۳۵	۰.۰۴۵۵۶۲
۱۳۹۰	۱۴۷۷۹.۵	۰.۰۸۸۵۱۳۸۸۷	۱۹۷۱۰	۰.۰۹۶۳۶۲۵۷	۰.۰۸۸۶۷۲
۱۳۹۱	۱۵۷۴۳.۵	۰.۰۹۴۲۸۷۲۴۷	۲۱۱۹۰	۰.۱۰۳۵۹۸۳۱۸	۰.۰۹۸۷۵۲
۱۳۹۲	۱۷۸۴۹.۱	۰.۱۰۶۸۹۷۶۰۹	۲۲۳۹۰	۰.۱۰۹۴۶۵۱۴۱	۰.۰۲۴۰۱۹
۱۳۹۳	۱۸۴۹۳.۱	۰.۱۱۰۷۵۴۵۰۲	۲۳۳۸۰	۰.۱۱۴۳۰۵۲۷	۰.۰۳۲۰۶
۱۳۹۴	۱۸۴۹۳.۱	۰.۱۱۰۷۵۴۵۰۲	۲۴۱۷۰	۰.۱۱۸۱۶۷۵۹۶	۰.۰۶۶۹۳۳
۱۳۹۵	۱۹۴۶۸	۰.۱۱۶۵۹۳۱۴۲	۲۴۸۰۰	۰.۱۲۱۲۴۷۶۷۸	۰.۰۳۹۹۲۱
۱۳۹۶	۲۳۱۶۴	۰.۱۳۸۷۲۸۳۵۱	۲۵۳۰۰	۰.۱۲۳۶۹۲۱۸۷	۰.۱۰۸۳۸۶
۱۳۹۷	۲۵۰۰۰	۰.۱۴۹۷۲۴۰۸۸	۲۵۶۹۰	۰.۱۲۵۵۹۸۹۰۵	۰.۱۶۱۱۳۱
			میانگین خطای داده واقعی یا داده شبیه سازی		**۰.۰۷۳۹۳۷۱۹۹**

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]

جدول ب: محاسبه شاخص میانگین خطا ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک

سال	رفتار مرجع	مقدار نرمالایز شده داده مرجع	رفتار شبیه سازی	مقدار نرمالایز شده رفتار شبیه سازی	$\frac{\lvert(Actual\ Data - Simulation\ Data)\rvert}{Actual\ Data}$
۱۳۸۹	۹۷	۰.۰۰۰۱۸۴۲۲۳	۸۱	۰.۰۰۰۱۴۷۳۲	۰.۲۰۰۳۱۷
۱۳۹۰	۷۰	۰.۰۰۰۱۳۲۹۴۵	۷۹	۰.۰۰۰۱۴۳۶۸۳	۰.۰۸۰۷۷۱
۱۳۹۱	۶۹	۰.۰۰۰۱۳۱۰۴۵	۷۶	۰.۰۰۰۱۳۸۲۲۶	۰.۰۵۴۷۹۷
۱۳۹۲	۶۹	۰.۰۰۰۱۳۱۰۴۵	۷۴	۰.۰۰۰۱۳۴۵۸۹	۰.۰۲۷۰۴
۱۳۹۳	۵۶۱.۲	۰.۰۰۱۰۶۵۸۳۵	۱۹۳	۰.۰۰۰۳۵۱۰۲۲	۰.۶۷۰۶۶
۱۳۹۴	۹۱۶۴.۲	۰.۰۱۷۴۰۴۷۲۱	۹۲۸۰	۰.۰۱۶۸۷۸۱۵۹	۰.۰۳۰۲۵۴
۱۳۹۵	۴۰۲۴۲.۲	۰.۰۷۶۴۲۸۳۰۴	۴۳۵۴۰	۰.۰۷۹۱۸۹۱۲۱	۰.۰۳۶۱۲۳
۱۳۹۶	۱۷۴۵۷۲.۷	۰.۳۳۱۵۴۹۸۵۱	۱۶۳۰۰۰	۰.۲۹۶۴۵۹۰۴۲	۰.۱۰۵۸۳۹
۱۳۹۷	۳۰۱۶۹۰	۰.۵۷۲۹۷۲۰۳۱	۳۳۳۵۰۰	۰.۶۰۶۵۵۸۸۳۸	۰.۰۵۸۶۱۹
میانگین خطای داده واقعی یا داده شبیه سازی					**۰.۱۴۰۴۹۱**

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]



شکل الف: شمای کلی نمودار جریان پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-22]