بررسی سیاست‌های کاهش انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی[1]

علی محقر،[2] مهناز حسین زاده،[3] حنان عموزاد،[4] امین شاکرزاده[5]

چکیده

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های دهه‌های اخیر مسئلهٔ محیط زیست و کنترل آلاینده‌های حاصل از صنایع مختلف، از جمله صنعت ساختمان، است. از طرفی، افزایش ساخت‌وساز به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه امری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد و این صنعت در سرتاسر زنجیرهٔ تأمین خود، مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌ها را تولید و منتشر می‌کند. در این مقاله، یک مدل دینامیکی توسعه داده شده است که در آن انتشار گاز کربن دی‌اکسید از زنجیرهٔ تأمین ساختمان شبیه‌سازی شده است. مدل توسعه‌داده‌شده جهت تأیید اعتبار، تحت آزمون‌های اعتبارسنجی ساختاری و رفتاری قرار گرفت. سپس با استفاده از تحلیل حساسیت و سیاست مدل، سناریوهایی تدوین شد و نتیجهٔ شبیه‌سازی سناریوها بررسی شد. نتیجهٔ شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم نشان می‌دهد که با اتخاذ سیاست‌های تشویقی، تدوین قوانین و مقررات بازدارنده و تلاش جهت استقرار آموزه‌های زنجیرهٔ تأمین سبز امکان کاهش رشد انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان فراهم می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: کربن دی‌اکسید، مدل‌سازی پویا، زنجیرهٔ تأمین ساختمان، زنجیرهٔ تأمین سبز

---

۱. تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

۲. استاد دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران (نویسندهٔ مسئول)؛ رایانامه: ir.ac.ut@amohaghar

۳. استادیار دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران؛ رایانامه: ir.ac.ut@mhosseinzadeh

۴. استادیار دانشکده مدیریت دانشگاه تهران؛ رایانامه: ir.ac.ut@amoozad.h

۵. دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی، پردیس بین‌المللی کیش دانشگاه تهران؛ رایانامه: ir.ac.ut@amin_shaker

۱. مقدمه

صنعت ساختمان، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین صنایع، به ارائهٔ زیرساخت‌هایی برای بهبود شرایط مردم می‌پردازد اما در عین حال یکی از بزرگ‌ترین آلوده‌کنندگان محیط زیست است و به عنوان اصلی‌ترین عامل کمک‌کننده به آلودگی محیط زیست، از طریق کار در محل و خارج از محل پروژه، شناخته شده است (ضرغامی و همکاران، ۲۰۱۵: ۲).

گاز کربن دی‌اکسید[6] یکی از مهم‌ترین گازهایی است که منجر به تخریب آب‌وهوا و گرمایش کرهٔ زمین می‌شود. CO_2 حدود ۶۰ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای جهان را تشکیل می‌دهد. آلودگی ناشی از صنایع منبع اصلی آلودگی هوا است و در این میان، صنایع نیروگاه‌های حرارتی، کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی، سیمان، کاغذسازی، نساجی و ساخت فولاد مهم‌ترین صنایع آلوده‌کنندهٔ هوا هستند (بزازان و خسروانی، ۱۳۹۵: ۳) که همهٔ این‌ها به‌نحوی از اجزای زنجیرهٔ تأمین صنعت ساختمان محسوب می‌شوند. در این مقاله، ابتدا مفاهیم و مبانی نظری زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز و انتشار گاز کربن دی‌اکسید در جهان و ایران و انتشار این گاز از زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز بررسی می‌شود. سپس متدولوژی پویایی‌شناسی سیستم، به عنوان ابزاری برای بررسی انتشار آلاینده‌های کربنی از زنجیرهٔ تأمین و سیاست‌گذاری مدیران این حوزه، معرفی می‌گردد. در بخش بعدی مقاله، یک مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده است که مبنای بررسی و تحلیل تولید و انتشار گاز کربن دی‌اکسید از زنجیرهٔ تأمین ساختمان را شکل می‌دهد. سپس این مدل، بر اساس اطلاعات پارامتریک، آزمون می‌شود، تا بر این مبنا، سیاست‌ها و سناریوهای مختلف قابل تدوین

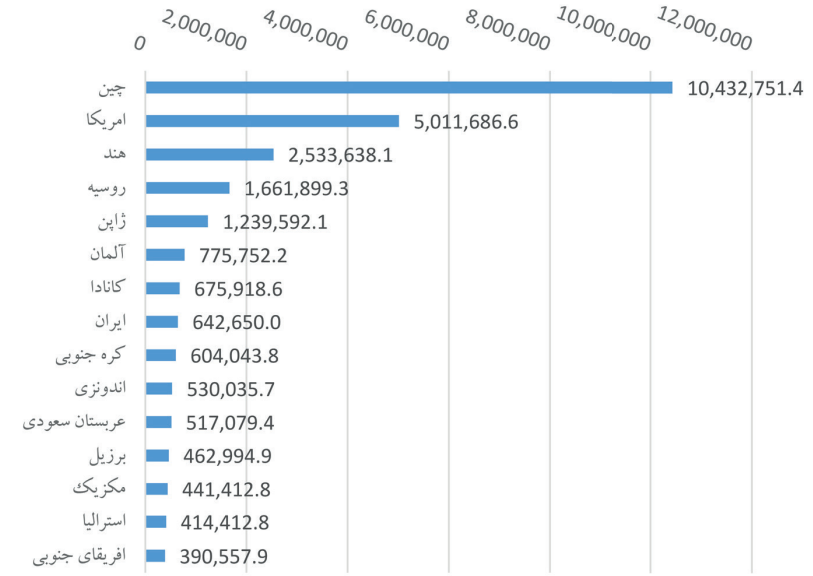
6. carbon dioxide (CO2)

و تحلیل باشد. سپس با تدوین سناریوهای بدبینانه و خوش‌بینانه، نتایج شبیه‌سازی این سناریوها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش آخر مقاله ضمن نتیجه‌گیری، پیشنهادهایی برای کاهش انتشار کربن دی‌اکسید از زنجیرهٔ تأمین ساختمان ارائه می‌شود.

۲. انتشار گاز کربن دی‌اکسید

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به ترتیب به CO_2 با ۸۲ درصد، CH_4 با ۱۱ درصد و NO_2 با ۵ درصد مربوط می‌شود (بزازان و خسروانی، ۱۳۹۵؛۳). از میان گازهای گلخانه‌ای، کربن دی‌اکسید بدترین تأثیر را در تخریب آب‌وهوا و گرمایش کره زمین دارد (Krejza et al, 2019: 1). برای اینکه درک درست‌تری از مقدار اثرگذاری گازهای گلخانه‌ای بر محیط زیست داشته باشیم، خوب است بدانیم که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اتمسفر زمین تا قبل از سال ۲۰۵۰ بایستی حداقل به میزان ۵۰ درصد سطوح این آلاینده‌ها در سال ۱۹۹۰ کاهش یابد تا با احتمال ۵۰ درصد بتوان افزایش دمای کرهٔ زمین را در حد دو درجهٔ سانتی‌گراد نگه داشت (Palmbeck, 2012: 64).

کشورهایی که در سال ۲۰۱۶ بالاترین میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید را در جهان داشتند، مطابق شکل ۱، کشورهای چین، آمریکا، هند، روسیه و ژاپن بودند و ایران در این رتبه‌بندی در رتبهٔ هشتم قرار دارد (پایگاه آمار جهانی knoema).



شکل ۱. نمودار رتبه‌بندی کشورهای دارای بالاترین میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید (2016)

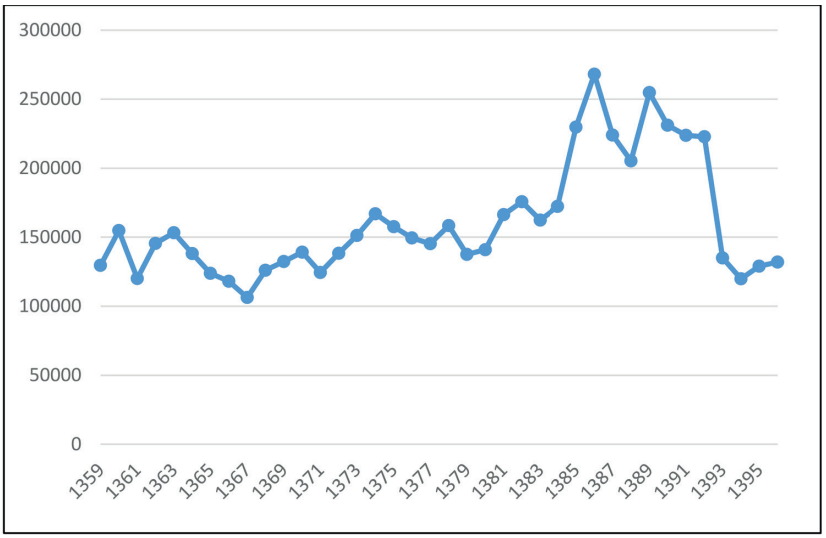
ایران در سال ۲۰۱۱ در رتبهٔ نهم این رده‌بندی قرار داشت (بزازان و خسروانی، ۱۳۹۵؛۳). سرانهٔ انتشار CO_2 در ایران نسبت به میانگین جهانی بالاتر است. مثلاً در سال ۲۰۱۳ سرانهٔ انتشار CO_2 در جهان ۴۵۲۰ کیلوگرم به ازای هر نفر بوده که همین شاخص در سال ۱۳۹۲ در ایران برابر با ۷۶۳۴/۹ کیلوگرم به ازای هر نفر بوده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

جدول ۱ روند انتشار گاز کربن دی‌اکسید را بر حسب تن در ایران طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید با یک روند افزایشی از ۴۶۵۲۴۷/۳ کیلوتن در سال ۲۰۰۵ به ۶۴۲۵۶۰/۰ کیلوتن در سال ۲۰۱۶ رسیده است (پایگاه آمار جهانی knoema).

جدول ۱. روند انتشار گاز کربن دی‌اکسید در ایران طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶

سال	میزان انتشار کربن دی‌اکسید (کیلوتن)	سال	میزان انتشار کربن دی‌اکسید (کیلوتن)
۲۰۱۶	۶۴۲۵۶۰/۰	۲۰۱۰	۵۶۸۸۲۳/۷
۲۰۱۵	۶۲۸۶۱۱/۳	۲۰۰۹	۵۶۴۶۴۶/۶
۲۰۱۴	۶۳۵۸۸۳/۴	۲۰۰۸	۵۴۴۰۹۳/۰
۲۰۱۳	۶۱۴۷۷۹/۱	۲۰۰۷	۵۳۳۷۴۹/۴
۲۰۱۲	۵۹۱۳۷۱/۲	۲۰۰۶	۴۹۹۳۱۶/۵
۲۰۱۱	۵۷۷۲۸۸/۹	۲۰۰۵	۴۶۵۲۴۷/۳

آمار موجود برای ایران نشان می‌دهد که میزان انتشار CO_2 در طول دوره ۴۰ ساله ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۶ تقریبا ۸/۴ برابر شده است. از طرفی، بخش ساختمان بیشترین پتانسیل را برای کاهش انتشار کربن در سراسر جهان دارد؛ چرا که ۳۰ درصد انتشار جهانی کربن و ۴۰ درصد مصرف منابع جهانی از نتایج فعالیت‌های ساخت‌وساز مسکن است (Sundarakani et al, 2014: 2). برای تشخیص میزان ساخت‌وساز در کشور، می‌توان به آمار تعداد پروانه‌های ساختمانی صادر شده مراجعه کرد. شکل ۲ روند ساخت‌وساز در کشور را بر اساس اطلاعات پروانه‌های ساختمانی صادر شده در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۵۹ تا ۱۳۹۶ نشان می‌دهد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷).



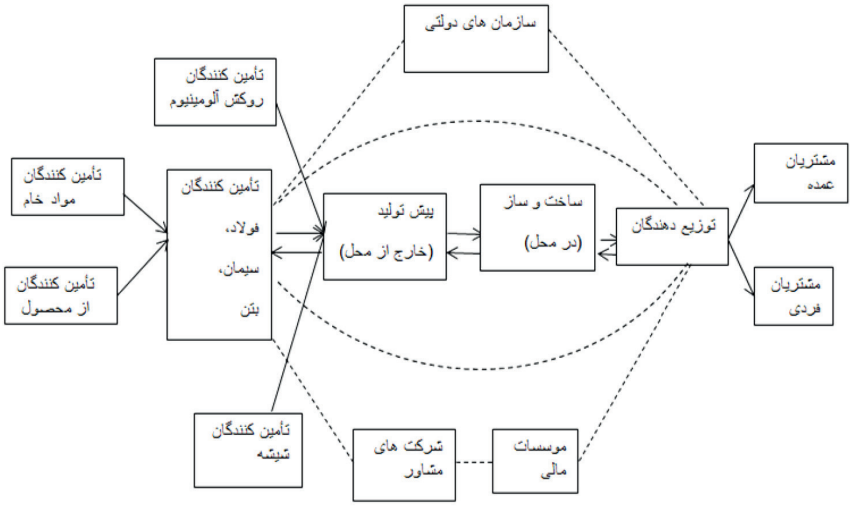
شکل۲. نمودار روند صدور پروانه‌های ساختمانی در ایران طی سال‌های ۱۳۵۹ تا ۱۳۹۶

این نمودار به خوبی نشان‌دهندهٔ دوره‌های رکود و رونق مسکن در کشور است. با عنایت به اینکه پس از هر دورهٔ رکود، شاهد رونق ساخت‌وساز بوده‌ایم، می‌توان پیش‌بینی کرد که در سال‌های آتی رونق ساخت‌وساز مسکن در کشور را داشته باشیم. رونق فعالیت‌های ساختمانی متعاقباً باعث افزایش انتشار گاز کربن دی‌اکسید از زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز می‌گردد که نیازمند توجه خاص در این حوزه است.

۳. زنجیرهٔ تأمین ساختمان

مفهوم زنجیرهٔ تأمین در اواخر دههٔ ۱۹۸۰ پدید آمد و در دههٔ ۱۹۹۰ به طور گسترده‌ای از آن استفاده شد. قبل از آن، عبارت‌هایی نظیر لجستیک و مدیریت عملکرد به جای مدیریت زنجیرهٔ تأمین استفاده می‌شد. زنجیرهٔ تأمین همهٔ مراحل مستقیم و غیر مستقیم که در تکمیل درخواست (سفارش) مشتری درگیر هستند را شامل می‌شود. به طور کلی، زنجیرهٔ تأمین زنجیره‌ای است که همه فعالیت‌های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد از مرحلهٔ مادهٔ اولیه تا مرحلهٔ تکمیل کالای نهایی و تحویل به مصرف کننده را شامل می‌شود (تربتی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲). در صنعت ساخت‌وساز، کارفرمایان، مشاوران، پیمانکاران و تأمین کنندگان، در یک مفهوم جامع‌تر، به صورت گره‌هایی هستند که با ارتباطاتی متشکل از انتقال دانش، مبادلهٔ اطلاعات، جهت و روابط مالی و قراردادی به هم وصل شده‌اند (پرایک، ۱۳۹۴: ۲).

به دلیل تنوع ساختمان‌ها، اندازه‌ها، فناوری‌ها و محصولات، چیزی به عنوان یک زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز عمومی وجود ندارد که بتواند مورد استفاده قرار گیرد، با وجود این شکل ۳ برخی از مهم‌ترین عناصر را نشان می‌دهد.



شکل۳. نمای شماتیک زنجیرۀ تأمین ساخت‌وساز. (Sundarakani et al, 2014;4)

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می گردد، انتشار گاز کربن دی‌اکسید می‌تواند هم از مراحل پیش‌تولید مواد اولیه یعنی سیمان، فولاد، بتن و آلومینیوم و هم در سایت ساخت‌وساز انجام گیرد. بخش بعدی انتشار کربن دی‌اکسید از زنجیرۀ تأمین ساخت‌وساز توسط لجستیک داخلی و خارجی اتفاق می‌افتد. بر اساس دستورالعمل برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرایندهای صنعتی وزارت صنعت، معدن و تجارت، مصوب مرداد ۱۳۹۴، منشأ مهم انتشار کربن دی‌اکسید در صنعت ساختمان در بخش تأمین مواد اولیه به سه بخش صنایع معدنی (شامل تولید سیمان، آهک، شیشه و چینی و سرامیک)، صنایع شیمیایی (مانند تولید کاربید، اتیلن، متانول) و صنایع فلزی (تولید آهن و فولاد و تولید آلومینیوم) تقسیم شده است (وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴). صنعت ساختمان تا سال ۲۰۲۰، سهمی معادل ۳۱ درصد از انتشار کربن را خواهد داشت و این میزان تا سال ۲۰۵۰ به ۵۲ درصد افزایش خواهد یافت (Qiang Du et all, 2018: 6).

٤. زنجیرۀ تأمین سبز

فعالیت‌های اقتصادی ــ اعم از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و خدماتی ــ از یک طرف از منابع طبیعی استفاده کرده و به آن‌ها وابسته هستند و از طرف دیگر ماهیت آن‌ها به گونه‌ای است که به طور بالقوه آلوده‌کنندۀ محیط زیست هستند. افزایش هزینه‌های ناشی از آسیب‌های زیست محیطی و افزایش دانش و نگرانی شرکت‌ها در ارتباط با اثرهای سوء فعالیت‌های اقتصادی بر روی منابع طبیعی، آن‌ها را به بازنگری راهکارهای رشد و توسعۀ اقتصادی مجبور کرده است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۲: ۹۷). دیدگاه‌هایی نظیر مدیریت زنجیرۀ تأمین سبز، بهره‌وری سبز، تولید پاک‌تر و سیستم‌های مدیریتی نوین جهت فعالیت‌های مدیریت سبز از جمله راهکارهایی

است که در این زمینه به کار گرفته شده‌اند (Chen & Shue, 2009: 667).

در گذشته، مدیریت زنجیرهٔ تأمین به دنباله یکپارچه‌سازی اعضای زنجیرهٔ تأمین و هماهنگی بین آن‌ها با هدف بهبود عملکرد کسب‌وکار، در راستای ارتقا، بهره‌وری و کسب سود بیشتر بود اما بهبود عملکرد محیط زیستی زنجیرهٔ تأمین، اهمیت هزینه‌های اجتماعی، آسیب‌های بوم‌شناختی و تخریب محیط زیست لحاظ نمی‌شد. فشار قوانین و مقررات دولتی در جهت کسب استانداردهای محیط زیستی و همچنین رشد فزایندهٔ تقاضای مشتریان نسبت به محصولات سبز (یعنی بدون اثر مخرب بر محیط زیست) مفهوم زنجیرهٔ تأمین سبز (GSC[7]) و مدیریت آن را پدیدار ساخت (جعفرنژاد، ۱۳۹۲).

محققان، برای مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز، تعاریف مختلفی ارائه کرده‌اند و GSCM را دارای ابعاد گوناگون می‌دانند؛ اما در اینکه GSCM[8] بر محیط زیست تأثیر مثبت دارد، هم‌عقیده هستند (رنگریز و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۹). بنابراین سبز کردن زنجیرهٔ تأمین، فرایند در نظر گرفتن معیارها یا ملاحظات محیط زیستی در سرتاسر زنجیرهٔ تأمین است. زنجیرهٔ تأمین سبز در ایران هنوز در مراحل ابتدایی است در حالی که صنعت ساخت‌وساز در کشور به‌خوبی پایدار شده است. از سوی دیگر، مدیریت سنتی زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز در کشور سبز کردن زنجیره را با دشواری مواجه کرده است. در خصوص ملاحظات محیط زیستی در ساختمان مطالعاتی در داخل انجام شده است که عمدهٔ تمرکز آن بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های جدید است که مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در خصوص کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان، از آن جمله است. کمبود ارزیابی و مطالعه در خصوص میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در طول زنجیرهٔ ساخت‌وساز، از تولید مواد اولیه تا ساخت در سایت، احساس می‌شود.

۵. روش تحقیق: پویایی شناسی سیستم

مفهوم پویایی‌شناسی سیستم برای اولین بار توسط فارستر مطرح شد و به سرعت طی پنجاه سال اخیر رشد کرده است. این علم، رویکردی جهت کشف رفتار دینامیکی غیر خطی و مطالعهٔ چگونگی تأثیر ساختارها و پارامترهای سیستم بر الگوهای رفتاری سیستم است. خروجی شبیه‌سازی گسستهٔ سیستم‌ها با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، طراحی سیاست‌های موثر بر عملکرد، برای دستیابی به سطوح بالای کارایی است. یک نظریهٔ بنیادی که از رویکرد پویایی‌های سیستمی حاصل می‌شود این است که ساختار هر سیستم رفتار دینامیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، در این رویکرد تصویری از سیستم بر اساس بازخوردها و تأخیرهای موجود ایجاد می‌شود تا رفتار پویای سیستم‌های پیچیده فیزیکی، زیستی و اجتماعی بهتر درک شود (مشایخی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰۰). از آنجا که رویکرد پویایی‌شناسی سیستم یکی از ابزارهای موثر در شرایط پویا و واقعی معرفی شده است (Khan et al, 2009: 1363)، در این تحقیق، از این رویکرد برای تحلیل پویای فرایند انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان استفاده شده است.

7. green supply chain
8. green supply chain management

۵. ۱. اجزای مدل دینامیکی

مدل‌های دینامیکی که توسط روش پویایی‌شناسی سیستم توسعه داده می‌شوند شامل این اجزاء هستند: نمودارهای علت – معلولی، نمـودار حلقه‌های علّی[۹] و نمـودار انباشت – جریان[۱۰]. نمودار علت-معلولی نشان‌دهندهٔ معماری کلی یک مدل است و برای ترسیم ارتباطات علّی میان مجموعهٔ متغیرها یا عوامل موجود در داخل یک سیستم استفاده می‌شود. وجود بازخورد در روابط علت و معلولی موجب ایجاد حلقه‌های علّی می‌گردد. نمودارهای حلقهٔ علّی(CLDs) ابزارهای قابل انعطاف و مفیدی برای ترسیم ساختار بازخورهای سیستم درحوزه‌های مختلف هستند (Sterman, 2000: 102).

حلقه‌های علّی، در یک تقسیم‌بندی کلی بر مبنای الگوهای رفتاری، به حلقه‌های تقویت‌کننده[۱۱] (معادل بازخورد مثبت) و حلقه‌های تعادلی[۱۲] (معادل بازخورد منفی) تقسیم می‌شوند. به عبارت دیگر، در نمودارهای حلقهٔ علّی، حلقه‌های بازخوردی دارای قطبیت (+) یا (–) هستند. بر اساس طبق قاعدهٔ تجربی، اگر تعداد پیوندهای (–) در حلقهٔ بازخوردی صفر یا زوج باشد، قطبیت آن حلقه مثبت و اگر تعداد پیوندهای (–) در حلقهٔ بازخوردی فرد باشد، قطبیت حلقه منفی خواهد بود (تیموری و همکاران ،۱۳۸۷: ۱۳۵).

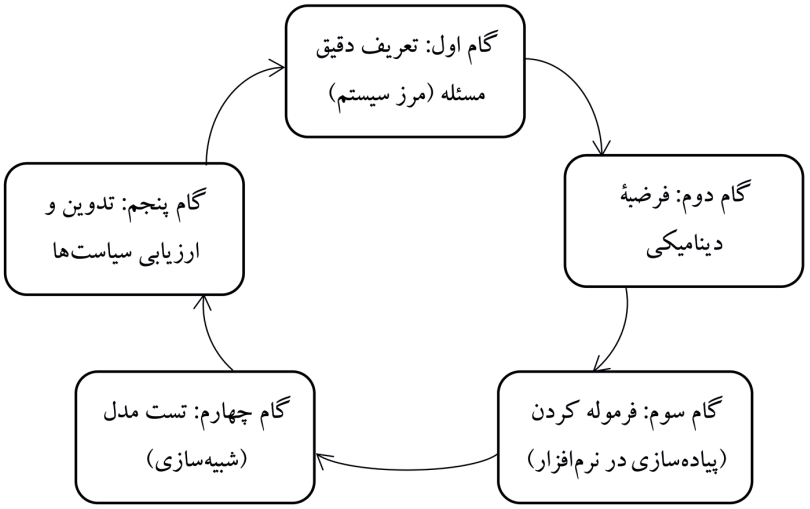
انباشت‌ها و جریان‌ها به همراه بازخورد دو مفهوم اصلی در تئوری سیستم‌های پویا به شمار می‌آیند. منظور از انباشت در واقع همان تجمعات است. انباشت‌ها نشان‌دهندهٔ وضعیت سیستم هستند و حاوی اطلاعاتی‌اند که براساس آن تصمیمات اتخاذ و اقدامات صورت می‌گیرد. انباشت با ایجاد تجمع که در نتیجهٔ اختلاف بین نرخ ورودی و نرخ خروجی یک فرایند است، تأخیرهایی را به وجود می‌آورد. انباشت‌ها عامل اختلاف بین جریان‌ها و نرخ‌های ورودی و خروجی است و در نتیجه منبع نامتعادل‌کنندهٔ پویایی سیستم‌ها است (Sterman, 2000: 191).

بررسی رفتار سیستم در طول زمان، نیازمند شبیه‌سازی روابط و متغیرها در نرم‌افزارهای خاصی است که در این مقاله از نرم‌افزار و نسیم[۱۳] استفاده شده است.

۵. ۲. فرایند مدل‌سازی پویا

در این مقاله برای مدل‌سازی پویا از فرایندی استفاده شده است که توسط استرمن ارائه شده و مراحل آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

9. causal loop diagram (CLD)
10. stock flow diagram (SFD)
11. reinforcing
12. balancing
13. vensim



شکل ٤. فرایند پنج مرحله‌ای مدل‌سازی در رویکرد پویایی‌شناسی سیستم

٦. مدل‌سازی انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان

در این بخش و بر اساس عواملی که در ادبیات موضوع صنعت ساختمان و انتشار آلاینده‌های کربنی مطرح شده است، مدل دینامیکی برای انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان منطبق با فرایند پنج مرحله‌ای استرمن ارائه می‌شود.

٦. ١. تعریف مسئله

بر اساس بررسی پیشینهٔ نظری تحقیق، صنعت ساختمان، در طول زنجیرهٔ تأمین خود، گاز کربن دی‌اکسید منتشر می‌کند. این آلایندگی در مرحلهٔ تولید مواد اولیه، انتقال به سایت و محل اجرای پروژه و فعالیت‌های تولید در محل اجرای پروژه ایجاد می‌گردد. از طرفی افزایش جمعیت و نیاز مبرم به تأمین احتیاجات اولیهٔ انسان، از جمله نیاز به مسکن، وجود فعالیت‌های ساختمانی را امری اجتناب‌ناپذیر ساخته و این صنعت همچنان به سرعت در سراسر جهان رو به افزایش است.

انتشار کربن به جو در حجم زیاد به عنوان مسئول اصلی آلودگی محیط زیست و تغییر آب و هوا شناخته شده است. گرم شدن کرهٔ زمین، افزایش دما و بالا آمدن سطح دریا، رویدادهای دمایی طاقت‌فرسا و مرگ گونه‌های مختلف سیاره زمین را تهدید می‌کند (Sundarakani et al, 2014: 2)؛ پس، شناسایی عوامل مختلفی که بر روی انتشار کربن دی‌اکسید در مراحل مختلف ساخت‌وساز نقش و اثر دارند ضروری به نظر می‌رسد. چنانچه بتوان این عوامل را شناسایی کرد، به وسیلهٔ تشخیص محرک‌ها[14] و بازدارنده‌ها[15] و تجزیه و تحلیل روابط و اثرهای هر کدام از این

14. drivers
15. inhibitors

عوامل و متغیرها، یافتن راه‌هایی برای کاهش انتشار میسر می‌گردد.

تعامل بین محرک‌ها و بازدارنده‌های انتشار کربن دی‌اکسید از زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز به ایجاد حلقه‌های بازخوردی منجر می‌شود که باعث پیچیدگی رفتار در زنجیرهٔ تأمین می‌شود و تصمیم‌گیری در جهت بهبود عملکرد سیستم را دشوار می‌سازد؛ لذا به منظور درک بهتر مدیریت زنجیرهٔ تأمین و تصمیمات مناسب‌تر مدیران و سرمایه‌گذاران، لازم است مدل‌هایی در اختیار آن‌ها قرار گیرد. همچنین تغییرات مستمر عوامل محیطی مؤثر بر انتشار کربن از زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز، نیاز به پویایی در برنامه‌ها و سیاست‌های ذی‌نفعان را ایجاب می‌کند.

٦. ٢. فرضیهٔ دینامیکی

در این تحقیق، تمرکز اصلی به روی تولید و انتشار گاز CO_2 در زنجیرهٔ تأمین صنعت ساخت‌وساز کشور است. بخشی از تولید این آلاینده در مرحلهٔ تولید مواد اولیه (نظیر فولاد، آلومینیوم، شیشه و سیمان) است و افزایش انتشار از این مرحله منجر به افزایش انتشار کربن سالیانه می‌گردد. بخش دیگری از انتشار گاز کربن دی‌اکسید ناشی از فعالیت‌های لجستیک ساخت‌وساز (انتشار ناشی از حمل مواد اولیه به سایت و حمل نخاله‌های ساختمانی به محل دفع) است. از طرفی، فعالیت‌های محل ساخت (ماشین‌آلات ساخت، ماشین‌های سنگین در محل ساخت، انتقال پوشش گیاهی و استفاده از الکتریسیته در محل ساخت) باعث افزایش انتشار کربن سالیانه می‌شود. رشد صنعت ساخت‌وساز، به صورت طبیعی، بر میزان تولید این آلاینده مؤثر است. برای کاهش این انتشارها، استفاده از فناوری‌های نوآورانه و حداقل کردن ضایعات ضروری است که وجود قوانین و مشوق‌های دولتی می‌تواند نقش این بازدارنده‌ها را پررنگ‌تر کند تا با استفادهٔ بیشتر از فناوری‌های نوین و به کارگیری روش‌های حداقل کردن ضایعات و آلایندگی، میزان انتشار کربن سالیانه را کاهش داد. یکی از این فناوری‌های نوین استفاده از فیلترهایی برای جذب کربن انتشار یافته است.

قوانین و دستورالعمل‌های دولتی در مورد طراحی سبز، تأمین سبز، مدیریت پسماند و مدیریت انرژی، منجر به کاهش انتشار کربن در ساختمان‌های تازه‌ساز یا در دست ساخت می‌گردد. هرچند این قوانین بایستی بیش از راهنما بودن، برای اجرا الزام گردند؛ مانند مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در خصوص کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان که منجر به کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای خواهد شد. از طرفی وجود پاداش‌ها و مشوق‌های دولتی نظیر برخی معافیت‌ها یا کسب جوایز و... می‌تواند به عنوان یک انگیزاننده در سازمان‌ها برای کاهش انتشار کربن عمل کند.

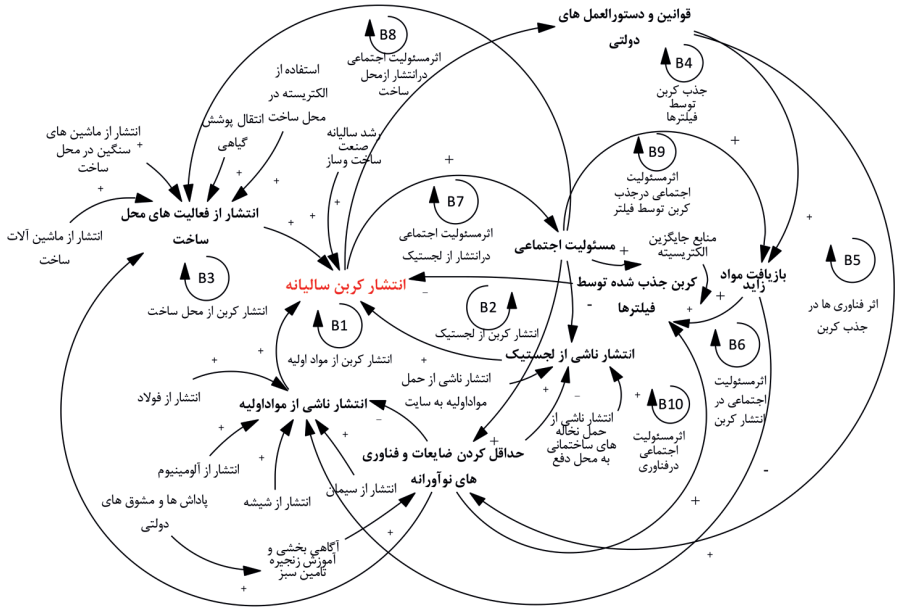
یکی از دیگر متغیرهایی که نقش بازدارندگی در انتشار آلاینده‌های محیط زیستی دارند، افزایش مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها در قبال جامعه و محیط زیست است. رشد مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها متأثر از رشد آلایندگی و فشارهای اجتماعی و آگاهی و آموزش عمومی است. آموزش و فرهنگ‌سازی برای پیاده‌سازی مفاهیم زنجیرهٔ تأمین سبز می‌تواند از طریق قوانین و مقررات دولتی و یا نقش داشتن بر روی افزایش مسئولیت اجتماعی روی کاهش انتشار کربن دی‌اکسید تأثیرگذار

باشد. استفاده از منابع جایگزین سوخت‌های فسیلی مانند انرژی خورشیدی هم یک گزینهٔ خوب در کاهش انتشار کربن است.

با مدل‌سازی دینامیکی فرضیهٔ فوق و تست سیاست‌های مد نظر، به این سوال پاسخ داده خواهد شد که با اعمال چه سیاست‌هایی می‌توان رفتار سیستم زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز کشور را طوری تغییر داد که میزان تولید آلایندهٔ CO_2 کاهش یابد.

۳.٦. توسعهٔ نمودارهای علّی

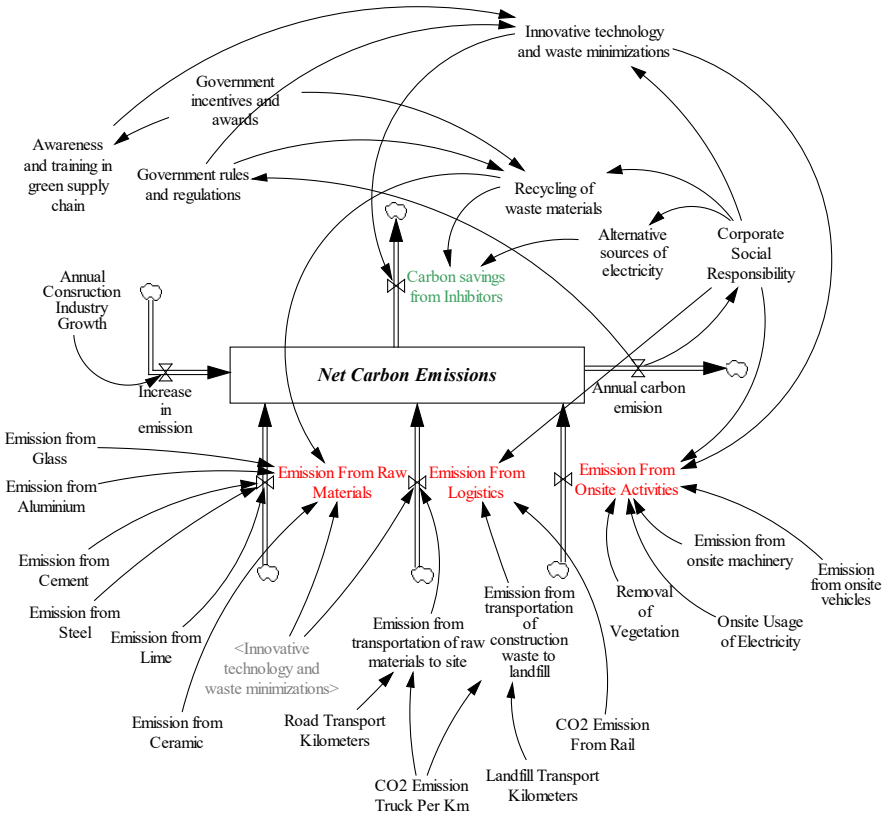
به منظور توسعهٔ نقشهٔ علّی و فرایندهای بازخوردی که علت اصلی پویایی سیستم است از تعاریف سیستم و الگوی مرجع استفاده خواهد شد. به همین منظور، علاوه بر توجه به تحقیقات پیشین، از نظر خبرگان صنعت ساختمان و محیط زیست برای توسعهٔ نمودار علّی انتشار کربن دی‌اکسید استفاده شده است. همان‌طور که در نمودار علت ـ معلولی (شکل ۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار حلقهٔ علّی مدل

٤.٦. نقشه انباشت‌ـجریان

نقشه انباشت ـ جریان مدل با استفاده از متدولوژی پویایی‌شناسی سیستم‌ها و در محیط نرم‌افزاری VENSIM PLE برای نشان دادن تأثیرات متغیرها در تولید حلقه‌های بازخوردی و پویایی سیستم ارائه شده است. شکل ۶ نقشه انباشت ـ جریان کلی مدل را نمایش می‌دهد.



شکل ٦. نقشهٔ انباشت ـ جریان کلی مدل

مدل از پارامترها و متغیرهایی تشکیل شده است که امکان محاسبهٔ آن‌ها با توجه به نبود اطلاعات میسر نیست. از این رو، برای تحلیل حساسیت و سیاست و در نهایت سناریوسازی، به ناچار مدل تا حدی که امکان محاسبهٔ پارامترها فراهم گردد ساده‌تر شده است. سال مبنا در مدل سال ۱۳۹۳ است که آخرین آمار انتشار گاز کربن دی‌اکسید مربوط به این سال است (وزارت نیرو، ۱۳۹۵). روند انتشار گاز کربن دی‌اکسید برای یک بازهٔ ده ساله بر اساس تن به ازای هر نفر (سرانه) پیش‌بینی شده است. مقدار اولیهٔ انباشت انتشار گاز کربن دی‌اکسید به ازای هر نفر بر اساس آمار انتشاریافته در ترازنامهٔ انرژی در سال مبنا که ۷/۵۵ تن بوده است (وزارنیرو، ۱۳۹۵) و بر اساس یافته‌های بیس (BIS, 2010: 46) که درصد انتشار گاز کربن دی‌اکسید در بخش ساختمان، در طی دورهٔ ساخت برابر با ۳/۷ درصد است، محاسبه شده است.

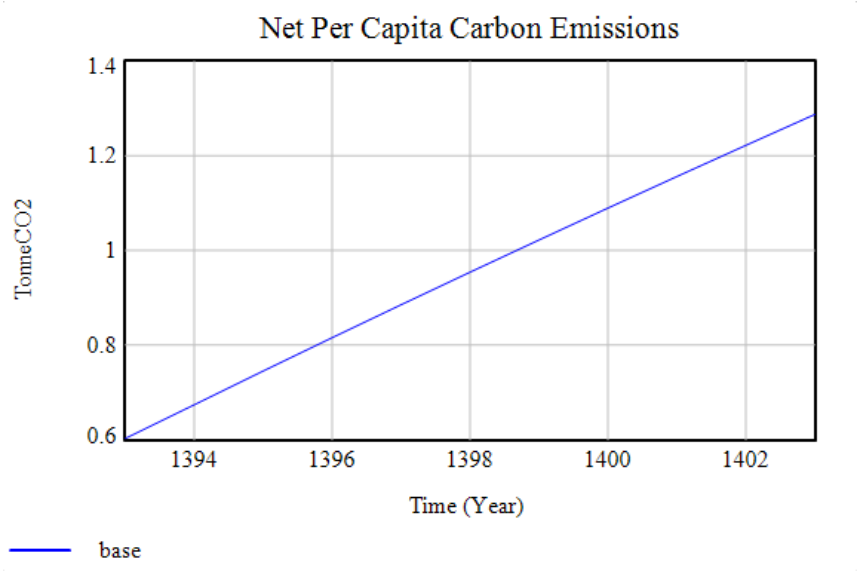
به علت اینکه قوانین ریاضی بین متغیرها در رویکرد پویایی‌شناسی سیستم صریح و اثبات‌شده نیستند، معمولاً به گروه‌های کانونی[۱۶] مراجعه می‌شود. یعنی نوع ارتباط میان متغیرها و وزن هر کدام از عوامل اثرگذار بر سایر عوامل، توسط کارشناسان و خبرگان آن موضوع تعیین می‌شود (Yim

16. focus group

et al, 2004: 143)؛ پس، در این تحقیق نیز برای مواردی که داده‌های قبلی و اطلاعات آماری وجود نداشتند، به نظر خبرگان مراجعه شده است. بدین منظور، سوالات مورد نظر در قالب یک پرسش‌نامه تنظیم شده و در بین خبرگان و متخصصان این موضوع توزیع و نظر ۱۱ تن از خبرگان حوزهٔ صنعت ساختمان و محیط زیست بررسی شد. برای اثربخشی بیشتر این مرحله، با الگوگیری از ترکیب اعضای خبرگان در روش دلفی، از مجموعه خبرگانی نظرخواهی شد که در حوزه‌های مختلف و از رویکردهای متفاوت با این موضوع آشنایی، تجربه و تبحر داشته‌اند.

۷. شبیه‌سازی و ارائه نتایج

شکل ۷ الگوی رفتار شبیه‌سازی‌شدهٔ متغیر سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید از زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز را نشان می‌دهد. مقدار این متغیر از ۰/۶۰۳ تن به ازای هر نفر در سال ۱۳۹۳ به ۱/۲۸ تن به ازای هر نفر در سال ۱۴۰۳ می‌رسد. نمودار نشان‌دهندهٔ شیب افزایشی است به نحوی که مقدار متغیر در مدت ۱۰ سال دو برابر می‌گردد. با توجه به اینکه مقادیر مبنای متغیرهای بازدارنده در کمترین حد خود هستند، با سیاست‌های موجود، انتشار کربن دی‌اکسید به صورت سالیانه افزایش می‌یابد.



شکل ۷. الگوی شبیه‌سازی‌شدهٔ رفتار متغیر سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید در مدل

۸. اعتبارسنجی مدل

هدف نهایی فرایند اعتبارسنجی در سیستم‌های پویا اطمینان از صحت رفتار ساختاری مدل در عین توجه به فرایند مدل‌سازی است. با توجه به اینکه مدل‌های سیستم‌های پویا قصد دارند تا در مورد پیامدهای بلندمدت هر سیاستْ تحلیلی ارائه کنند، لذا در اعتبارسنجی، به جای آنکه تمرکز بر

روی پیش‌بینی نقطه به نقطهٔ مقداری متغیرها باشد، باید بر میزان تولید رفتار ساختارهای سیستم باشد (تیموری و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۹۸).

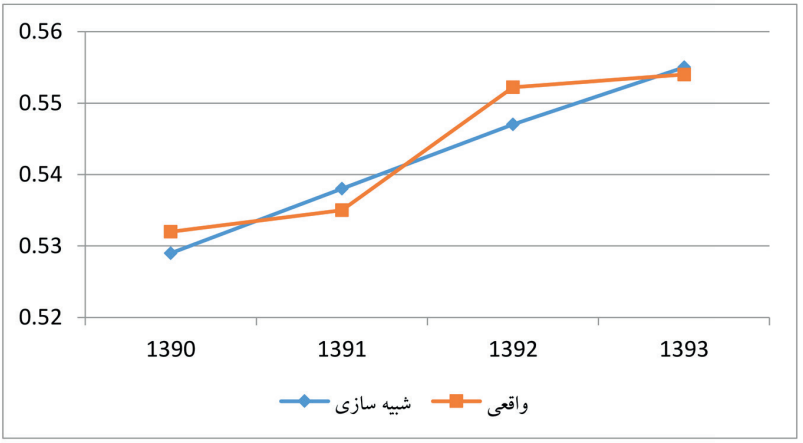
آزمون‌های مرتبط با مدل پویایی‌های سیستم را می‌توان در قالب آزمون‌های ساختار مدل، رفتار مدل و مضامین سیاست‌های مدل دسته‌بندی کرد. اعتبار ساختاری مدل بر اعتبار رفتاری آن اولویت دارد و فقط وقتی ساختار مدل معتبر باشد، می‌توان رفتار آن را بررسی کرد (Yim et al, 2004: 143).

در این مقاله، برای تأیید اعتبار ساختار مدل از آزمون تأیید ساختار[17] بر اساس نظر خبرگان و آزمون شرایط حدی[18] استفاده شده است. آزمون شرایط حدی به دنبال پاسخ این پرسش است که آیا تمامی معادلات مدل در صورتی که در معرض مقادیر حدّی ولی امکان‌پذیر متغیرها قرار بگیرند، معنادار باقی خواهند ماند؟ آزمون شرایط حدّی می‌تواند به دو طریق انجام گیرد؛ نخست با بازرسی مستقیم معادلات مدل و دوم از طریق شبیه‌سازی. مدل‌ساز بایستی برای هر قانون تصمیم‌گیری (معادلات نرخ) در مدل، بررسی کند که در شرایطی که ورودی معادلات مقادیر بیشینه و کمینه خود را می‌گیرند آیا خروجی قانون، تصمیم موجه و منطقی است یا خیر؟ (Sterman, 2000: 870) برای این منظور در این مقاله با قرار دادن مقدار صفر برای متغیر رشد سالانهٔ صنعت ساختمان، به عنوان حد پایین، مقدار انباشت کربن دی‌اکسید هم با شیب نزولی به حدود صفر می‌رسد.

برای تأیید اعتبار رفتار مدل از آزمون رفتار نامتعارف[19] و همچنین آزمون بازتولید رفتار[20] استفاده شده است. آزمون رفتار متعارف بررسی می‌کند که کدام رفتار نشان‌داده‌شده از طرف مدل با رفتار سیستم واقعی در تضاد است و در صورت تغییر فرضیات، رفتار نامعقول چگونه ایجاد می‌شود؟ (تیموری و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۰۵) در این مقاله، صفر کردن متغیر مقدار انتشار از تولید مواد خام که ۶/۵۸ درصد انتشار را تشکیل می‌دهد، باعث تقریباً ثابت شدن رشد انتشار گاز کربن دی‌اکسید می‌گردد که رفتاری نامتعارف بوده و اهمیت متغیر انتشار از تولید مواد خام را نشان میدهد.

هدف از آزمون بازتولید رفتار یا رفتار مجدد، مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی برای اطمینان از صحت عملکرد رفتار مدل است. به عبارت دیگر، در این حالت رفتار شبیه‌سازی‌شده برای مدل بازتولید می‌شود تا با داده‌های واقعی مقایسه شود. چنانچه در شکل ۸ نشان داده شده است، با قرار دادن سال مبنا بر روی سال ۱۳۸۹، رفتار مدل شبیه‌سازی‌شده با اطلاعات واقعی به صورت مقایسه‌ای به نمایش درآمده است و مشاهده می‌شود که رفتار متغیر مورد بررسی به‌خوبی شبیه‌سازی شده است.

17. structure verification test
18. extreme condition test
19. behavior anomaly test
20. behavior-reproduction tests



شکل ۸. مقایسهٔ رفتار مدل با اطلاعات واقعی برای متغیر سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید

برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌شده، علاوه بر باز تولید رفتار مدل، از شاخص‌های آزمون خطا نیز استفاده شده و میزان خطای متغیر کلیدی بر اساس شاخص‌های زیر محاسبه شده است:

درصد خطای مجذورات (RMSPE[۲۱]): بر اساس این شاخص، هرچه میزان تفاوت بین داده‌های واقعی با شبیه‌سازی کمتر باشد به نتایج شبیه‌سازی بیشتر می‌توان اعتماد کرد. هرچه میزان این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، به معنای خطای کمتر است و نزدیک بودن به ۱۰۰ درصد نیز نشان‌دهندهٔ خطای بالاتر است.

ضریب نابرابری (IT[۲۲]): محاسبهٔ ضریب نابرابری یکی از روش‌های سنجش میزان خطای داده‌های شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های واقعی است. میزان ضریب نابرابری عددی بین ۰ و ۱ خواهد بود. اگر برابر با صفر باشد یعنی مقادیر پیش‌بینی دقیقاً برابر با مقادیر واقعی است و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد به این مفهوم است که عملکرد مدل در پیش‌بینی مناسب نیست.

باتوجه به اهمیت خطا در پیش‌بینی، شناخت منابع خطا و کاهش آن می‌تواند در افزایش اعتماد به نتایج مدل بسیار مؤثر باشد. خطاهای بزرگ ممکن است ناشی از پراکندگی زیاد داده‌های تصادفی در مدل باشد. برای تعریف ریشه‌های خطا می‌توان از ضریب نابرابری استفاده کرد. بر این اساس، ریشه‌های خطا با توجه به این شاخص به سه عامل زیر مرتبط می‌شود:

۱. خطای مبنا:[۲۳] زمانی که خروجی‌های مدل با داده‌ها سنخیت نداشته باشند این خطا ایجاد می‌شود که اصطلاحاً خطای سیستماتیک نامیده می‌شود.

۲. خطای انحراف:[۲۴] این خطا زمانی ایجاد می‌شود که واریانس‌های داده‌های واقعی و شبیه سازی

21. root mean square percent error
22. inequity theils
23. basic error
24. diviation error

با هم تفاوت زیادی داشته باشند. ریشهٔ این خطا نیز ممکن است سیستماتیک باشد.

۳. خطای نابرابری کوواریانس‌ها:[۲۵] زمانی که نتایج شبیه‌سازی مدل و داده‌های واقعی همبستگی نداشته باشند، این خطا ایجاد می‌شود که اصطلاحاً خطای غیر سیستماتیک نامیده می‌شود.

در حالت بهینه، هرقدر میزان خطای سیستماتیک و غیر سیستماتیک کمتر شود به مفهوم بهینه بودن مدل در شبیه‌سازی نتایج است اما مجموع این خطاها باید برابر ۱ باشد.

برای محاسبهٔ خطاهای فوق‌الذکر از سه شاخص U^m، U^s و U^c استفاده می‌شود که مجموع این سه شاخص همواره مساوی ۱ است. U^m، میزان خطای سیستماتیک را بیان می‌دارد و حالت مطلوب آن است که نزدیک به صفر یا مساوی با آن باشد. U^s نوعی واریانس است که میزان برابری انحراف استاندارد مقادیر شبیه‌سازی و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد و مطلوب است که مقادیر مساوی و یا نزدیک به صفر داشته باشد. U^c نوعی کوواریانس است که خطای غیر سیستماتیک را اندازه می‌گیرد و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر است. نتایج مربوط به محاسبهٔ همه شاخص‌های گفته‌شده در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲. نتایج آزمون خطاهای مدل بر حسب شبیه‌سازی

حداقل خطای مجذورات (RMSPE)	شاخص نابرابری (IT)	محاسبه ریشه‌های خطا		
		U^m	U^s	U^c
۰/۹۲۲	۰/۰۰۶۷	۰/۱۶۲	۰/۰۶۸	۰/۷۷۰

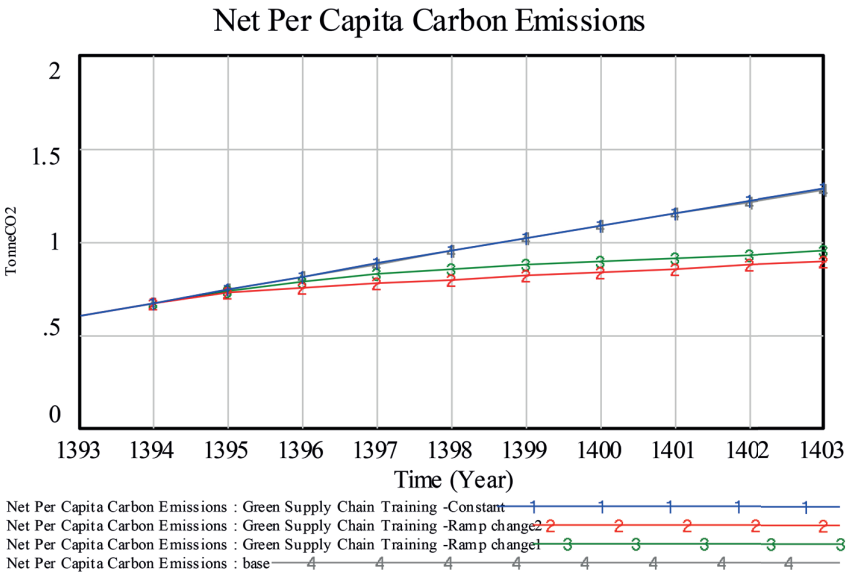
با توجه به آزمون‌های انجام گرفته بر روی مدل، می‌توان گفت که پایایی و اعتبار مدل مورد تأیید و نتایج حاصل از این مدل قابل بررسی و اتکا است.

۹. تحلیل حساسیت

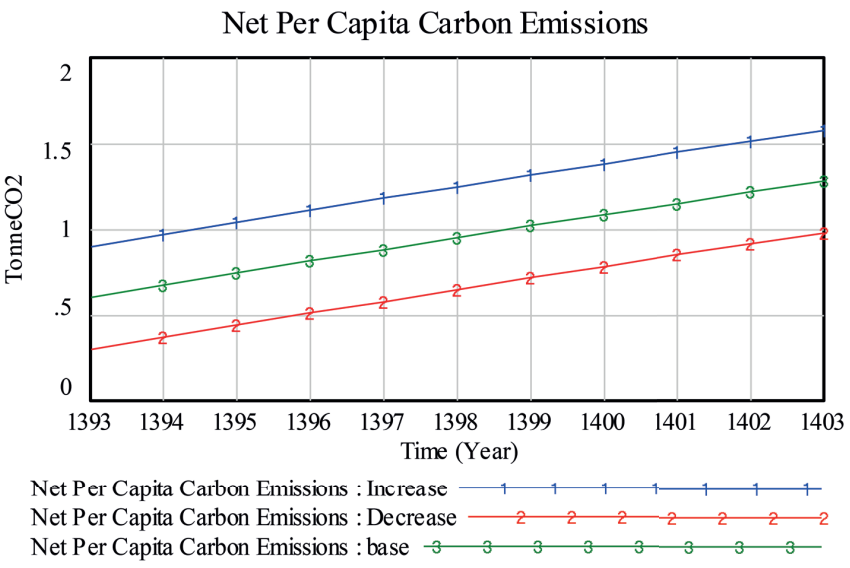
تحلیل حساسیتْ سازوکاری برای ایجاد یقین در تحلیل‌های مبتنی بر مدل و سیاست‌های پیشنهادی است. تحلیل حساسیت به این سوال پاسخ می‌دهد که مدل تا چه حد نسبت به تغییر در مقادیر پارامترها و تغییرات جزئی آشکار در ساختار مدل حساسیت دارد؟ (تیموری و همکاران، ۱۳۸۷: ۳۲۰) به طور کلی سه نوع تحلیل حساسیت وجود دارد: ۱) حساسیت عددی: وقتی که تغییر در فرضیاتْ ارزش‌های عددی نتایج را تغییر دهد؛ ۲) حساسیت رفتاری: وقتی که تغییر در فرضیاتْ الگوهای رفتار تولیدشده توسط مدل را تغییردهد و ۳) حساسیت سیاستی: وقتی که تغییر در فرضیاتْ اثرات یا ارزش سیاست پیشنهادی را معکوس کند (Sterman, 2000: 883). هر سه نوع حساسیت را می‌توان با انجام تغییرات در مقادیر پارامترها، مقادیر آغازین، توابع جدولی و تغییر ساختار مورد مطالعه قرار داد (تیموری و همکاران، ۱۳۸۷: ۳۲۳).

25. unequity covariance

در مدل مورد مطالعه در این مقاله، تحلیل حساسیت با تغییر ساختار متغیر آموزش زنجیرهٔ تأمین سبز و تغییر در مقدار آغازین متغیر انباشت سرانهٔ انتشار گاز کربن دی‌اکسید به انجام رسیده است که نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ قابل بررسی است.



شکل ۹. تحلیل حساسیت با تغییر معادلهٔ متغیر آموزش زنجیرهٔ تامین سبز

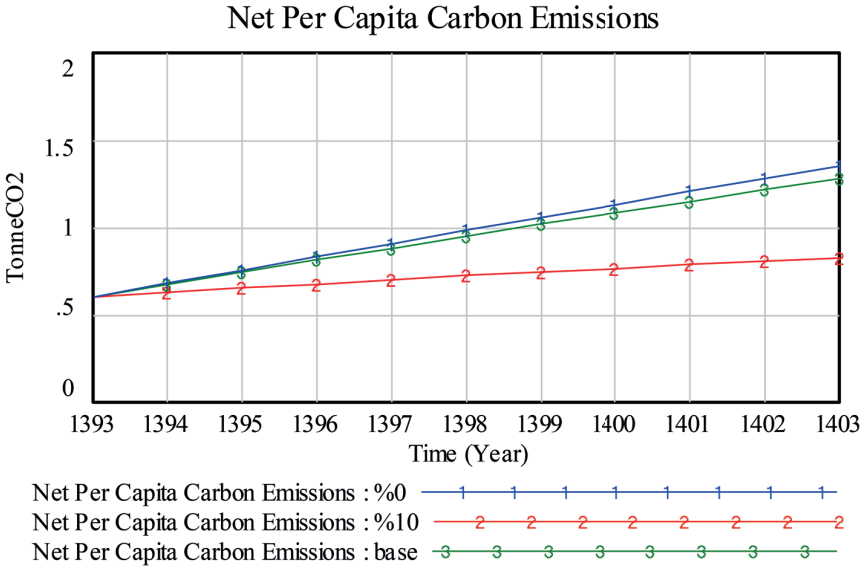


شکل ۱۰. تحلیل حساسیت با تغییر مقدار آغاین متغیر سرانهٔ انتشار CO_2

۱۰. تحلیل سیاست

در مدل پویایی‌های سیستم برخی پارامترها را می‌توان تحت عنوان پارامترهای سیاستی[۲۶] طبقه‌بندی کرد. یک پارامتر سیاستی حساس نشان‌دهندهٔ نقاط اهرمی در سیستم واقعی است که به منظور بهبود رفتار سیستم می‌توان از آن استفاده کرد (تیموری و همکاران، ۱۳۸۷: ۳۵۲).

در مدل دینامیکی این مقاله، یکی از پارامترهای سیاستی پارامتر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها است. در مدل، مقدار این پارامتر، بر اساس نظر خبرگان، معادل ۱ درصد در نظر گرفته شده است. ابتدا مقدار پارامتر را به ۱۰ درصد افزایش می‌دهیم. با توجه به اینکه این پارامتر به عنوان بازدارندهٔ انتشار گاز کربن دی‌اکسید عمل می‌کند، انتظار داریم که میزان انباشت سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید کاهش یابد. سپس مقدار پارامتر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها را به ۰ درصد کاهش می‌دهیم و اثر آن بر متغیر سطح را تحلیل می‌کنیم. شکل ۱۱ الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیر سرانهٔ انتشار گاز کربن دی‌اکسید را با توجه به تغییر پارامتر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیر سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید با تغییر پارامتر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها

۱۱. تدوین سناریو

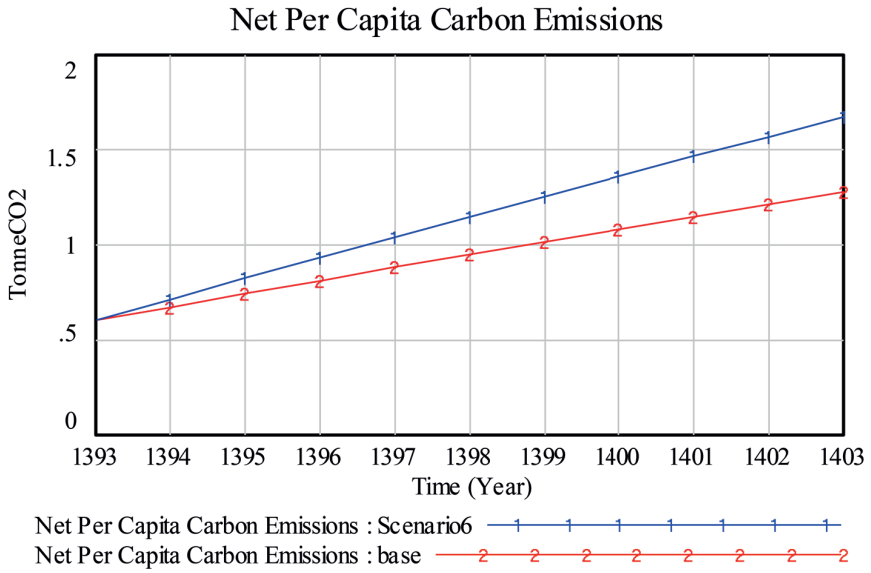
پس از آن که با تأیید اعتبار مدل و انجام تحلیل حساسیت، مدلی معتبر و با ساختار سیاستی بهبود

26. policy parameters

یافته به دست آمد، از آن می‌توان برای تدوین انواع سناریوهای مورد نظر برای آینده استفاده کرد. گزینه‌های متعددی را می‌توان با توجه به پارامترهای مختلف سیستم مد نظر قرار داد و تأثیر آن‌ها را بر پاسخ پویای مدل ملاحظه کرد. در این مقاله دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه با تغییر پارامترها در دامنهٔ موجح و با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت ارائه می‌گردد.

۱۱. ۱. سناریوی بدبینانه

در این سناریو فرض بر این است که همهٔ پارامترهای بازدارنده در حداقل ممکن باشند و پارامتر رشد صنعت ساخت‌وساز را به حداکثر آن بر طبق نظر کارشناسان یعنی ۱۵/۶ درصد تغییر می دهیم.



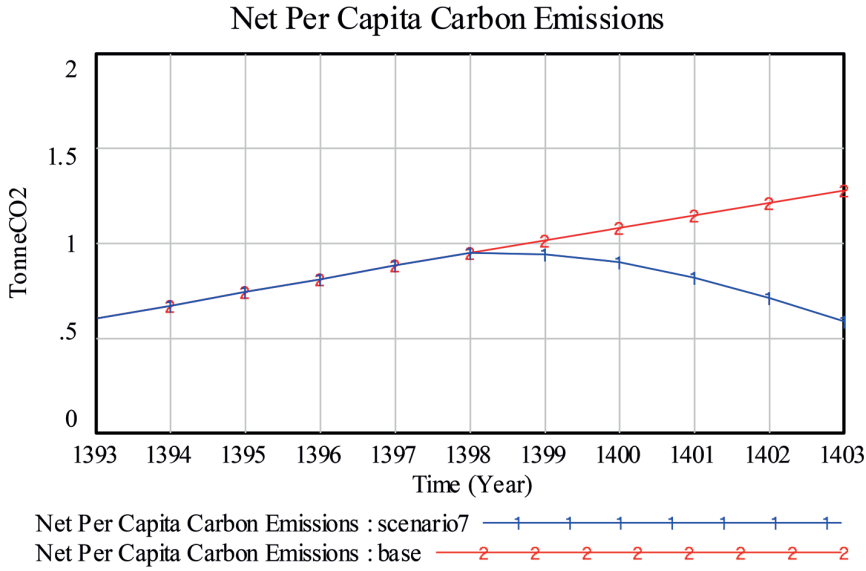
شکل ۱۲. الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیر سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید با اجرای سناریوی بدبینانه

همانطور که انتظار میرود میزان سرانهٔ انتشار گاز کربن دی اکسید که در مدل مبنا به ۱/۲۸تن در انتهای افق شبیه‌سازی (سال ۱۴۰۳) می‌رسد، با اجرای این سناریو به ۱/۶۷ تن در سال ۱۴۰۳ افزایش می‌یابد.

۱۱. ۲. سناریوی خوش‌بینانه

در این سناریو، تغییر پارامترها و ضرایب به این صورت است که شیب تابع Ramp متغیر بازدارندهٔ قوانین و دستورالعمل‌های دولت افزایش می‌یابد، از سال ۱۳۹۸، پارامتر مسئولیت

اجتماعی شرکت به میزان ۱۰درصد ، پارامتر پاداش‌ها و مشوق‌های دولت به میزان ۳ درصد و پارامتر آموزش زنجیرهٔ تامین سبز با شیب دو برابری افزایش می‌یابد. نتایج اجرای این سناریو در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیر سرانهٔ انتشار کربن دی‌اکسید با اجرای سناریوی خوش‌بینانه

۱۳. نتیجه و پیشنهاد

در این مقاله، پس از توسعهٔ مدل دینامیکی برای انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان کشور و تدوین و شبیه‌سازی سناریوهای مورد نظر، به این نتیجه رسیدیم که برای کاهش انتشار کربن دی‌اکسید، تدوین و اجرای قوانین و مقررات بازدارنده و تعیین مشوق‌هایی برای مجموعه‌هایی که در کاهش انتشار این آلاینده اقداماتی انجام داده‌اند، ضروری است و نقش بسیار مهمی ایفا می کند. اهتمام به آموزش و فرهنگ‌سازی در زمینهٔ زنجیرهٔ تأمین سبز و حرکت به سوی پیاده‌سازی آن نیز نقش موثری در کاهش انتشار آلایندهٔ CO_2 دارد. این نتیجه‌گیری هم‌راستا با نتیجهٔ مطالعاتی ساندراکانی و همکارانش در امارات متحدهٔ عربی و بیس در انگلستان است. بر اساس مدل شبیه‌سازی‌شده و نتایج آن، برای کاهش رشد انتشار کربن دی‌اکسید از صنعت ساختمان پیشنهاد می‌شود تا به صورت هم‌زمان سیاست‌های زیر پیگیری شود: افزایش قوانین و دستورالعمل‌های دولتی برای کاهش تولید و انتشار گاز کربن دی‌اکسید، فرهنگ‌سازی و ارتقای نقش مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، در نظر گرفتن مشوق‌هایی برای کاهش تولید کربن دی‌اکسید و آموزش و فرهنگ‌سازی برای پیاده‌سازی الزامات زنجیرهٔ تأمین سبز در صنعت ساختمان. در واقع آموزش‌های زنجیرهٔ تأمین سبز بسیار نوپا بوده و در حال حاضر بیشتر به عنوان یک مبحث نظری مطرح است و هنوز در سطح جامعه و در طول زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز اجرایی نشده است.

کتابنامه

احمدی، سیدعلی اکبر، محمدعلی افشاری و حمیده شکاری. ۱۳۹۲. «ارائهٔ مدلی برای سنجش موفقیت سازمان‌ها در مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز با رویکرد انتخاب تأمین‌کنندهٔ سبز (مورد: شرکت فولاد آلیاژی ایران)»، *پژوهشنامهٔ بازرگانی*. ویژه‌نامهٔ شماره ۶۶. صص ۹۵-۱۲۷.

اطلاعات پروانه‌های ساختمانی صادرشده توسط شهرداری‌های کشور ۱۳۹۶. ۱۳۹۷. مرکز آمار ایران.

بزازان، فاطمه و ندا خسروانی. ۱۳۹۵. «سنجش میزان انتشار کربن دی‌اکسید توسط بخش‌های مختلف تولیدی و خانوارها ناشی از مصرف انرژی در ایران (رویکرد داده‌ستانده زیست محیطی)». *اقتصاد محیط زیست و منابع طبیعی*. سال اول، شمارهٔ ۱. صص ۱-۲۵.

بنتون، دبلیوسی و لیندا اف مک هنری. ۱۳۹۱. *مدیریت خرید و زنجیرهٔ تأمین در پروژه‌های عمرانی*. ترجمهٔ محمد محمدی و محسن بابایی. چاپ اول. تهران: انتشارات حامی.

پرایک، استفان. ۱۳۹۴. *مدیریت زنجیرهٔ تأمین در صنعت ساخت‌وساز: مفاهیم و مطالعات موردی*. ترجمهٔ مهدی روانشادنیا. چاپ اول. تهران: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.

پورعبادالهان کویچ، محسن و دیگران. ۱۳۹۴. «تجزیهٔ عوامل مؤثر بر انتشار آلودگی کربن دی‌اکسید در صنایع محصولات کانی غیر فلزی ایران». *مطالعات اقتصادی کاربردی ایران*. سال چهارم. شمارهٔ ۱۶. صص ۴۳-۵۷.

ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۳. ۱۳۹۵. معاونت امور برق و انرژی، وزارت نیرو.

تربتی، امیر، محمدعلی ارسنجانی و محسن فیروزشاهی. ۱۳۹۴. «تدوین نقشهٔ استراتژی مدیریت زنجیرهٔ تأمین با تلفیق نمودار حلقهٔ علی و کارت امتیازی متوازن». *مدل‌سازی در مهندسی*. سال سیزدهم. شماره۴. صص ۱۵۱-۱۶۵.

تیموری، ابراهیم و مینا مزرعه فراهانی. ۱۳۸۷. *مقدمه‌ای بر مدل‌سازی سیستم‌های اقتصادی‌اجتماعی*. تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

جعفرنژاد، احمد(۱۳۹۲). *مدیریت تولید و عملیات نوین* (مفاهیم، *سیستم‌ها، مدل‌ها و زنجیرهٔ تأمین) مجموعه‌ای جامع از مباحث مدیریت تولید و عملیات نوین*. چاپ چهارم. تهران. انتشارات دانشگاه تهران.

دستورالعمل برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرایندهای صنعتی. ۱۳۹۴. تهران: وزارت صنعت، معدن و تجارت.

رنگریز، حسن، محمدرضا نورعلی و محمد ثواقبی فیروزآبادی. ۱۳۹۶. «بررسی نقش کلیدی زنجیرهٔ تأمین سبز، در کسب مزیت رقابتی سازمان‌ها». *پژوهش‌های جدید در مدیریت و حسابداری*. شمارهٔ ۲۲ . صص ۸۹-۱۰۵ .

سوشیل. ۱۳۸۷. *پویایی‌های سیستم (رویکردی کاربردی برای مسائل مدیریتی)*. ترجمهٔ ابراهیم تیموری، علیرضا نورعلی و نریمان ولی زاده. تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

ضرغامی، اسماعیل و دیگران. ۲۰۱۵. «شناسایی موانع تحقق مدیریت زنجیرهٔ تأمین سبز در صنعت ساختمان ایران» در: کنفرانس بین‌المللی فناوری‌ها، مهندسی و علوم محیط زیستی. تهران. دانشگاه تهران.

کریمی، رسول و دیگران. ۱۳۹۵. «ارتقای بهره‌وری با رویکرد مدل یکپارچه مدیریت زنجیرهٔ تأمین در پروژه‌های صنعت احداث». *مدیریت بهره‌وری*. شمارهٔ ۳۸. صص ۷-۳۲.

مشایخی، علی، عادل آذر و ابوذر زنگویی‌نژاد. ۱۳۹۳. «ارائهٔ مدل دینامیکی برای کاهش متوسط زمان پرداخت خسارت شرکت‌های بیمه». *فصلنامهٔ پژوهش‌های بازرگانی*. شمارهٔ ۷۱. صص ۱۱۷-۹۵.

هوگس، میشائل. ۱۳۸۷. *اصول و مبانی مدیریت زنجیرهٔ تأمین*. ترجمهٔ محسن شیخ سجادیه و محمدرضا اکبری جوکار. چاپ اول. تهران: انتشارات آدینه.

BIS. 2010. "Estimating the Amount of CO2 Emissions that the Construction Industry Can Influence". *Department for Business and Innovation*. Autumn. London, UK.

Chen, Yenming J. and Shue, Jiuh-Biing 2009. "Environmental-Regulation Pricing Strategies for Green Supply Chain Management". *Transportation Research*. Part E 45. 667–677.

https://knoema.com/atlas/ranks/CO2-emissions

Khan, S., Yufeng, L. & Ahmad, A. 2009. "Analyzing Complex Behavior of Hydrological Systems through a System Dynamics Approach". *Environmental Modeling & Software*. 24. pp.1363-1372

Krejza Z., Vaňková L. and Chovancová J. 2019. "Carbon Footprint Associated with Construction Industry and Determination of its Theoretical Amount". *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 222 012013. pp. 1-11.

Plambeck, E. 2012. "Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply-chain management". *Energy Economics* .34. S64–S74.

Qiang Du et al. 2018. "Carbon Emissions in China's Construction Industry: Calculations, Factors and Regions". *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15 (6). pp.1-17

Smith, P. 2007. "The Relevance of Systems Thinking and System Dynamics". *The Learning Organization*. 14 (6). pp.143-157.

Sterman, J. D. 2000. *Business Dynamics*:*Systems Thinking and Modeling for a complex world*. McGrow-Hill.

Sundarakani, B., Sikdar, A. & Balasubramanian, S. 2014. "System dynamics-based modeling and analysis of greening the construction industry supply chain". *International Journal of Logistics Systems and Management*. 18(4). 517-537.

Yim, N.H. et al. 2004. "Knowledge Based Decision Making on Higher Level Strategic Concerns: System Dynamics Approach". *Expert Systems with Applications*. no.27. pp.143-158.