



سیاستگذاری در صنعت سیمان به منظور کاهش مصرف انرژی و انتشار CO₂ با استفاده از رویکرد سیستم داینامیک

زهرا جوکار^۱، علیرضا مختار^{۲*}

دانشگاه صنعتی شیراز، zahrajokar7113@gmail.com

دانشگاه صنعتی شیراز، mokhtar@gmail.com

چکیده

انرژی یکی از مهمترین موضوعات امروز جهان است، با توجه به محدودیت منابع انرژی و افزایش ناگهانی قیمت‌های حامل‌های انرژی در ایران، شناسایی روش‌ها و راهکارهای مدیریت مصرف انرژی در صنایع انرژی‌بری همچون سیمان بسیار ضروری است. در همین راستا، این مقاله به ارزیابی فرصت‌های کاهش مصرف انرژی و انتشار CO₂ در صنعت سیمان می‌پردازد. یک مدل دینامیکی تحت سه تکنولوژی کارآمد انرژی (کلینکر جایگزین، سوخت‌های جایگزین و بازیابی انرژی حرارتی) ارائه می‌شود و به مدت ۲۰ سال شبیه‌سازی انجام می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از کلینکر جایگزین در تولید سیمان، منجر به کاهش ۱۵٪ در مصرف انرژی و ۱۳٪ در انتشار CO₂ می‌شود، از این رو می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های کارآمد مدیریت انرژی برای دستیابی به تولید پایدار سیمان در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: صنعت سیمان، فن‌آوری‌های بهره‌وری انرژی، سیستم دینامیک، توسعه پایدار

۱- مقدمه

در قرن گذشته رشد سریع تکنولوژی در جوامع صنعتی به طور چشمگیری سهم مداخلات بشر را در تغییرات آب و هوایی افزایش داده است. این تغییرات که بیشتر ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد، افزایش دمای کره‌ی زمین را به همراه داشته است.

خطرهای چالش‌های زیست محیطی نه یک مسأله داخلی، بلکه یک مسأله جهانی است. اهمیت این موضوع در رابطه با آلودگی هوا بیش از هر عامل دیگری نمود دارد. از آنجا که مرزی در اتمسفر وجود ندارد، انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک مکان و زمان معین می‌تواند با گذشت زمان در یک مکان دیگر اثر خود را نمایان سازد.

در مطالعاتی که در خصوص ارزیابی زیست محیطی کارخانه‌های سیمان صورت گرفته، این صنعت با تولید ۵٪ از گازهای گلخانه‌ای در جهان و ۳۴٪ گازهای گلخانه‌ای در بخش صنعت، به عنوان یکی از منابع مهم تولید گاز CO₂ شناخته شده است و از این رو در کانون توجه دست اندرکاران محیط زیست قرار گرفته است [1,2].

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع - بهینه‌سازی سیستم‌ها

^۲ و * - استادیار گروه مهندسی صنایع



با توجه به نقش کلیدی سیمان در توسعه‌ی اقتصاد ملی و بخش‌های دیگر جامعه مانند ساخت و ساز، توسعه‌ی راه‌ها و زیرساخت‌های حمل و نقل، تقاضا برای این محصول در جهان و به خصوص در کشورهای در حال توسعه در حال افزایش است. همین مسئله باعث افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی برای تامین انرژی مورد نیاز در فرآیند تولید سیمان می‌شود که آلودگی بیشتر محیط زیست را به همراه دارد.

علاوه بر گرمایش زمین و سایر مشکلات زیست محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، چالش دیگری که فرآوری صنعت سیمان قرار دارد، پایان‌پذیر بودن منابع انرژی فسیلی و مواد اولیه‌ی تولید سیمان می‌باشد. این چالش‌ها و ضرورت استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر و مواد جایگزین این حقیقت را آشکار می‌سازد که وابستگی تولید سیمان به این منابع نمی‌تواند در بلند مدت به صورت پایدار ادامه یابد. از این رو، مدیران و تصمیم‌گیران این حوزه می‌بایست به ارائه‌ی برنامه‌هایی برای مدیریت و برنامه‌ریزی هرچه بهتر تولید پایدار سیمان بپردازند به گونه‌ای که توانایی نسل آینده برای تامین این منابع را به مخاطره نیافکنند. در این زمینه، توسعه‌ی پایدار بر پایه‌ی قانونمندی‌های حفاظت از محیط زیست طراحی شده که با ارائه‌ی یک الگوی مدیریت، مانع از تخریب و تهی‌سازی منابع غیر قابل تجدید می‌شود [3].

در ایران، صنعت سیمان به عنوان یکی از صنایع انرژی بر پس از صنعت فولاد و آهن، در جایگاه دوم قرار دارد و حدود ۱۳٪ مصرف انرژی حرارتی در بخش صنعت و ۳٪ از کل انرژی حرارتی کشور را به خود اختصاص می‌دهد [4]. بدیهی است که در چنین شرایطی یکی از نگرانی‌های اصلی در صنعت سیمان، مدیریت مصرف انرژی و آلودگی ناشی از آن است. در همین راستا هدف اصلی این پژوهش اتخاذ سیاست‌هایی در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌های ناشی از تولید سیمان در راستای تولید پایدار این محصول می‌باشد.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

به موازات معرفی و گسترش روز افزون راهکارهای کاهش مصرف انرژی و آلودگی ناشی از گازهای گلخانه‌ای در صنعت سیمان، پژوهش‌های بسیاری در کشورهای مختلف دنیا صورت گرفته که از جمله‌ی آنها می‌توان به مقالات زیر اشاره کرد: در سال ۲۰۰۴ نه‌دی^۳ و همکاران با استفاده از یک مدل دینامیکی، تولید CO_2 در صنعت سیمان را تخمین زدند و استفاده از مواد افزودنی را سیاستی جهت دستیابی به تولید پایدار سیمان و کاهش CO_2 معرفی کردند [5]. در سال ۲۰۰۶ آناند^۴ و همکاران با استفاده از روش سیستم دینامیک، مدلی جهت کاهش میزان انتشار CO_2 در صنعت سیمان، تحت سیاست‌های مدیریت انرژی و مدیریت ساختاری ارائه دادند [6]. در سال ۲۰۱۳ انصاری^۵ و سیفی^۶ مدلی دینامیکی جهت بررسی مصرف انرژی و انتشار CO_2 در صنعت سیمان تحت سناریوهای مختلف تولید و صادرات در ایران ارائه دادند. در این مدل اثر اصلاح قیمت سوخت بر تولید و مصرف انرژی در صنعت سیمان مورد بررسی قرار گرفت [7].

در برخی از پژوهش‌ها به شناسایی فرصت‌های کاهش مصرف انرژی در کشورهای مختلف دنیا پرداخته شده است که مبنای اصلی آنها، مقایسه‌ی جایگاه کنونی کارخانه‌های سیمان با کارخانه‌ی ایده‌آل و یا با الگوها و استانداردهای شناخته شده

³ Nehdi

⁴ Annand

⁵ Ansari

⁶ Seifi



است. برای نمونه، به پژوهشی که مویا⁷ و همکارانش برای شناسایی بهبود بهره‌وری و کاهش انتشار CO₂ در ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا انجام دادند می‌توان اشاره کرد [8].

در سال ۲۰۱۳ اوسن^۸ و همکاران به منظور کاهش اثرات زیست محیطی، کاهش مصرف منابع انرژی و کاهش هزینه‌های اقتصادی در صنعت سیمان، استفاده مناسب از سوخت و مواد جایگزین را به عنوان روشی جهت تولید سیمان پایدار معرفی کردند [9].

یانگ آه^۹ و همکاران در پژوهش خود، استفاده از سیمان جایگزین را به عنوان سیاستی جهت کاهش CO₂ معرفی کردند. این مواد که شامل مصالح ساختمانی تخریب شده و پودر بتن می‌باشد، با توجه به خواص معدنی خود می‌توانند به عنوان سیمان جایگزین مصرف شوند. به این ترتیب میزان سنگ آهک به کار رفته در تولید سیمان کاهش یافته و از این طریق میزان تولید CO₂ نیز کاهش می‌یابد [10].

در سال ۲۰۱۵ وارگاس^{۱۰} و هالوگ^{۱۱} یکی از راه‌های کاهش تولید CO₂ را استفاده از خاکستر بادی به عنوان ماده‌ی جایگزین کلینکر معرفی کردند و با ارائه مدل دینامیکی تاثیر آن را روی رشد اقتصادی، آلودگی محیط زیست بررسی کردند [11]. زوبری^{۱۲} و پتل^{۱۳} در سال ۲۰۱۷ با استفاده از منحنی هزینه‌ی بهره‌وری انرژی، پتانسیل کاهش CO₂ و انرژی را در صنعت سیمان سوئیس مورد بررسی قرار دادند و فناوری جذب CO₂ را به عنوان راه‌حلی جهت کاهش آلاینده‌های صنعت سیمان معرفی کردند [12].

در بررسی ادبیات موضوعی به کارگیری مدل سیستم دینامیک در حوزه‌ی صنعت سیمان، باید به این نکته توجه کرد که بیشتر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، به بحث کاهش آلاینده‌های زیست محیطی در این صنعت پرداخته‌اند و کمتر به بحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی توجه شده است. از این رو، این مقاله با ارائه‌ی یک مدل دینامیکی، تاثیر سیاست‌های ارائه شده را بر روی مصرف انرژی و انتشار CO₂ مورد بررسی قرار می‌دهد.

۳- روش شناسی تحقیق

ردپای تفکر سیستمی در طول تاریخ به طور گسترده وجود داشته است، اما شروع نظریه‌ی عمومی سیستم، در سال ۱۹۳۲ با ارائه‌ی نظریه ارگانیستی لودویگ فون برتalanفی آغاز شد و پس از او جی‌فارستر در سال ۱۹۶۱ نیاز به کاربرد تفکر سیستمی را در جامعه و علوم اجتماعی، مورد مطالعه قرار داد.

در دنیای مدرن مشکلات جوامع و سازمانها روز به روز پیچیده‌تر می‌گردد، و در پی آن تصمیم‌گیری و شناخت راه‌حل‌های مناسب برون‌رفت از این مشکلات نیز دشوارتر می‌شود، به نحوی که ممکن است راه‌حل اتخاذ شده شرایط سیستم را در کوتاه مدت بهبود ببخشد اما در بلند مدت وضعیت را از شرایط کنونی بدتر کند [13]. در بین روش‌های مدل‌سازی سیستم‌ها، روش سیستم دینامیک با ارائه‌ی رویکردی جامع‌نگر و پویا به مسائل و مشکلات می‌تواند در جهت رفع پیچیدگی‌های سیستم راهگشا باشد.

⁷ Moya

⁸ Usón

⁹ Young Oh

¹⁰ Vargas

¹¹ Halog

¹² Zuberi

¹³ Patel



اولین کنفرانس ملی

انجمن ایرانی پویاشناسی سامانه‌ها

با وجود مطالعات فراوان در زمینه‌ی سیستم دینامیک، هیچ‌گونه دستورالعمل آماده‌ای مبنی بر مدل‌سازی سیستم‌ها وجود ندارد، با این حال فرآیند و مراحل منظمی وجود دارد که در مدل‌سازی باید از آن تبعیت کرد که به شرح زیر می‌باشد:

گام ۱- تعرف مسأله: در این مرحله باید بررسی شود بیشترین نگرانی در مورد چه موضوعی است و چه متغیرهایی در بوجود آوردن این رفتار تاثیرگذارند.

گام ۲- تدوین فرضیه‌ی دینامیکی: فرضیه‌ی دینامیک، نظریه‌ای درباره‌ی چگونگی به وجود آمدن مسأله است و با تمرکز بر روی ساختارهای مشخص، امکان مدل‌سازی سیستم را فراهم می‌کند.

گام ۳- تدوین مدل شبیه‌سازی: در این مرحله جهت شناخت و تبیین بهتر ارتباط میان سیستم و زیر سیستم‌های مورد مطالعه، مسأله به صورت روابط علت و معلولی ترسیم می‌گردد.

گام ۴- آزمون: در این گام، هر معادله باید از نظر سازگاری در ابعاد، چک شود و حساسیت رفتار مدل و سیاست‌های توصیه شده، نسبت به عدم اطمینان در فرضیات بررسی گردد.

گام ۵- طراحی و ارزیابی سیاست‌ها: پس از آن که نسبت به ساختار و رفتار مدل اطمینان حاصل گردید، می‌توان از مدل برای طراحی و ارزیابی سیاست‌های بهبود استفاده کرد [14].

با توجه به طرح‌های توسعه‌ی کشور در سال‌های اخیر، میزان تولیدات سیمان به شدت افزایش یافته است. این امر باعث افزایش مصرف انرژی به ویژه سوخت‌های فسیلی شده که آلودگی بیشتر محیط‌زیست را به همراه داشته است. در جدول ۱، فهرست متغیرهای تاثیرگذار در رفتار سیستم نمایش داده شده است. روابط بین این متغیرها و سیاست‌های تاثیرگذار به منظور کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان، در بخش ۴ شرح داده شده است.

جدول ۱. متغیرهای استفاده شده در مدل

واحد	فهرست نمادها	نماد
Million ton	Cement nominal capacity	CNC
Million ton/Year	Cement production capacity growth	CPCG
1/Year	Cement production capacity growth rate	CPCGR
Million ton/Year	Depreciation rate	DR
Dmnl	Cement capacity utilization	CCU
Million ton	Cement production	CP
Million ton	The amount of OPC production	AOPCP
Million ton	The amount of PPC production	APPCP
Million ton	The amount of PSC production	APSCP
Dmnl	OPC share in cement production	OPCSCP
Dmnl	PPC share in cement production	PPCSCP
Dmnl	PSC share in cement production	PSCSCP
Dmnl	Clinker ratio in OPC	CROPC
Dmnl	Clinker ratio in PPC	CRPPC
Dmnl	Clinker ratio in PSC	CRPSC
Million ton	Clinker used in OPC	CUOPC
Million ton	Clinker used in PPC	CUPPC
Million ton	Clinker used in PSC	CUPSC
Million ton	Clinker used in cement production	CUCP
kWh/ton	Electricity requirement for producing a ton of cement	ERPC
Million kWh	Total electricity consumption	TEC
Dmnl	Average proportion of renewable energy in power generation	APREPG
Million kWh	Renewable energy power generation	REPG
Million kWh	Fossil-based fuel in power generation	FBFPG
Dmnl	Average proportion of fossil fuel in power generation	APFFPG
kcal/Ton	Thermal energy requirement for producing a ton of clinker	TERPC



نماد	فهرست نمادها	واحد
TTEC	Total thermal energy consumption	Million kcal
SOTE	The share of oil in thermal energy	Million kcal
SNLTE	The share of natural gas in thermal energy	Million kcal
APNLTE	Average proportion of natural gas in thermal energy	Dmnl
ESWHRF	Electricity saving from waste heat recovery in one factory	Million kWh
NCF	The number of cement factory	Dmnl
SRDF	Share of RDF	Dmnl
HVRDF	The heat value of RDF	kcal/ton
RDFC	RDF consumption	Million ton RDF
STDF	Share of TDF	Dmnl
HVTDF	The heat value of TDF	kcal/ton
TDFC	TDF consumption	Million ton TDF
HVNG	The heat value of natural gas	kcal/cubic meters
HVO	The heat value of oil	kcal/Liter
NGC	Natural gas consumption	Million cubic meters
OC	Oil consumption	Million Liter
SAF	The share of alternative fuel	Dmnl
SCS	The share of clinker substitution	Dmnl
CO ₂ EPKWH	CO ₂ emission per kWh	Ton/kWh
CO ₂ EEC	CO ₂ emission from electricity consumption	Million ton
CO ₂ EPKcalO	CO ₂ emission per kcal oil	Ton/Kcal
CO ₂ EOC	CO ₂ emission from oil consumption	Million ton
CO ₂ EPKcal NG	CO ₂ emission per kcal natural gas	Ton/Kcal
CO ₂ ENGCG	CO ₂ emission from natural gas consumption	Million ton
CO ₂ EFF	CO ₂ emission from fossil fuel	Million ton
CO ₂ ETEC	CO ₂ emission from thermal energy consumption	Million ton
CO ₂ EC	CO ₂ emission from calcination	Dmnl
CO ₂ ECP	CO ₂ emission from clinker production	Million ton
CO ₂ ERDF	CO ₂ emission from RDF	Ton CO ₂ /Ton RDF
CO ₂ ETDF	CO ₂ emission from TDF	Ton CO ₂ /Ton RDF
TCO ₂ E	Total CO ₂ emission	Million ton

۴- مدل سازی، بررسی و تحلیل داده‌ها

در این قسمت جهت شناخت و تبیین بهتر روابط میان متغیرهای به کار رفته در سیستم، مسأله به صورت نمودار انبار و جریان ترسیم گردیده و روابط بین متغیرها شرح داده شده است.

۴-۱- زیر سیستم تولید سیمان

به طور کلی تولید سیمان در سه مرحله‌ی استخراج مواد اولیه، تولید کلینکر و تولید سیمان انجام می‌شود. در ابتدا با استخراج سنگ آهک از معدن و ترکیب آن با موادی همچون سیلیس، آلومینوم و آهن، پودری حاصل می‌شود که پس از عبور از منطقه‌ی پیش گرمکن، با حرارت بالای ۱۴۰۰ °C در کوره، به کلینکر تبدیل می‌شود و در نهایت در بخش آسیاب سیمان با ترکیب با مواد افزودنی همچون گچ، سرباره و ... به سیمان تبدیل می‌شود [15].

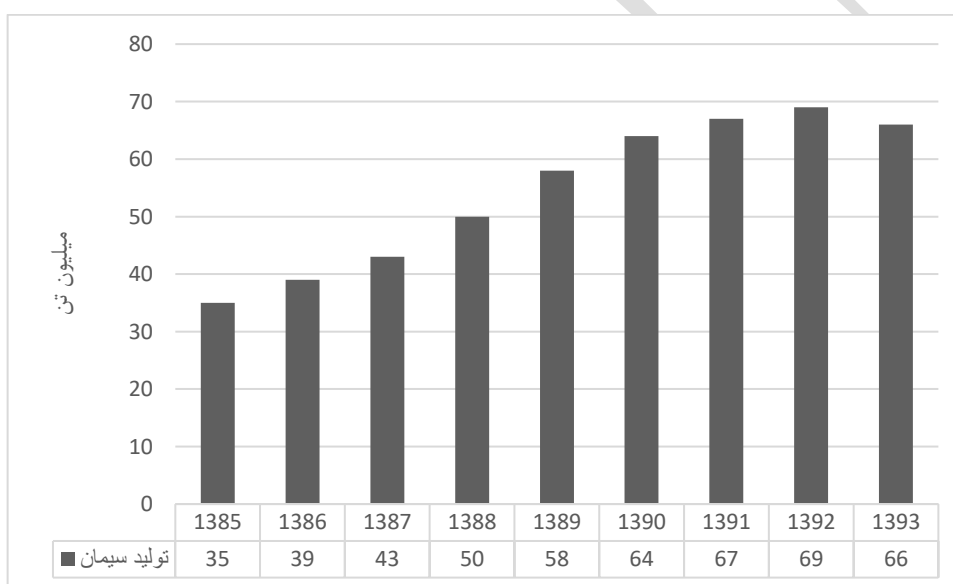
با توجه به نوع و سهم مواد افزودنی مصرف شده، سیمان تولید شده در ایران به سه دسته‌ی سیمان پرتلند، سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند سرباره تقسیم می‌شود که در جدول ۲ به اختصار شرح داده شده است.



جدول ۲. سهم انواع مختلف سیمان و مواد تشکیل دهنده‌ی آن [7].

نوع سیمان	مواد افزودنی	سهم مواد افزودنی (%)	درصد کلینکر به کار رفته (%)	سهم در تولید (%)
سیمان پرتلند معمولی ^{۱۴}	گچ	۴-۵	۹۵	۹۵
سیمان پرتلند پوزولانی ^{۱۵}	گچ، پوزولان	۳۵	۶۵	۳
سیمان پرتلند سرباره ^{۱۶}	گچ، سرباره	۷۰	۳۰	۲

در ۱۰ سال اخیر، با افزایش سرمایه‌گذاری در بخش‌های مختلف اجتماعی و اقتصادی کشور، میزان تقاضا برای سیمان افزایش قابل توجهی داشته و همانطور که در شکل ۱ مشخص است، میزان تولید سیمان از ۳۵ میلیون تن در سال ۱۳۸۵ به ۶۶ میلیون تن در سال ۱۳۹۳ رسیده است.



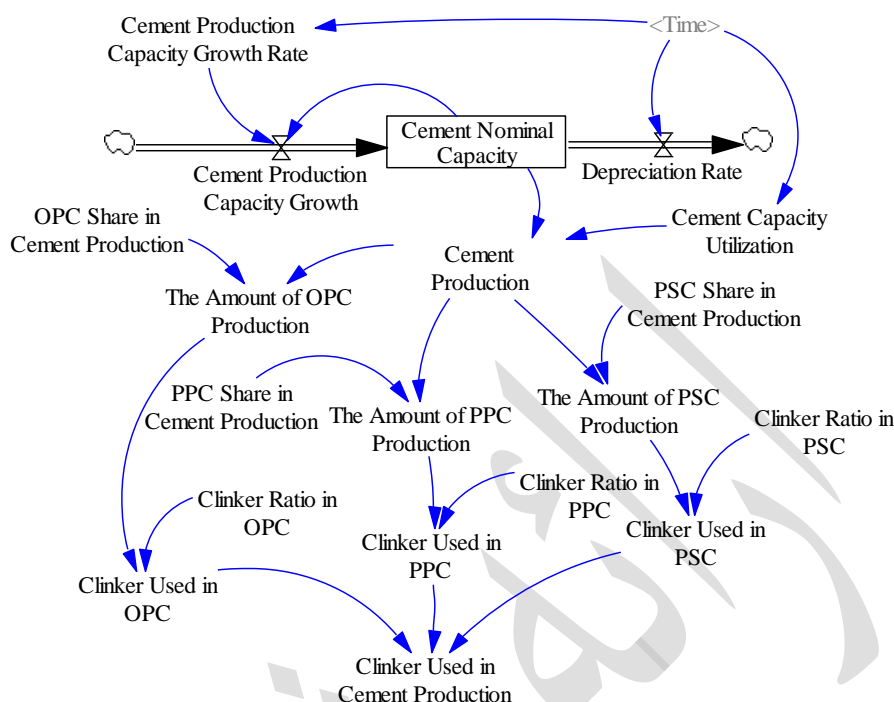
شکل ۱. آمار تولید سیمان در ایران [16]

شکل ۲ نمودار انباره و جریان تولید سیمان را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، میزان تولید سیمان وابسته به ظرفیت تولید و میزان استفاده از این ظرفیت است.

¹⁴ Ordinary Portland Cement (OPC)

¹⁵ Portland Pozzolana Cement (PPC)

¹⁶ Portland Slag Cement (PSC)



شکل ۲. زیر سیستم تولید سیمان

معادلات مربوط به زیر سیستم تولید سیمان به شرح زیر است:

$$CNC = \int (CPCGR - DR) \quad (1)$$

$$CPCGR = CNC * CPCGR \quad (2)$$

$$CP = CNC * CCU \quad (3)$$

$$AOPCP = CP * OPCSCP \quad (4)$$

$$APPCP = CP * PPCSCP \quad (5)$$

$$APSCP = CP * PSCSCP \quad (6)$$

$$CUOPC = AOPCP * CROPC \quad (7)$$

$$CUPPC = APPCP * CRPPC \quad (8)$$

$$CUPSC = APSCP * CRPSC \quad (9)$$

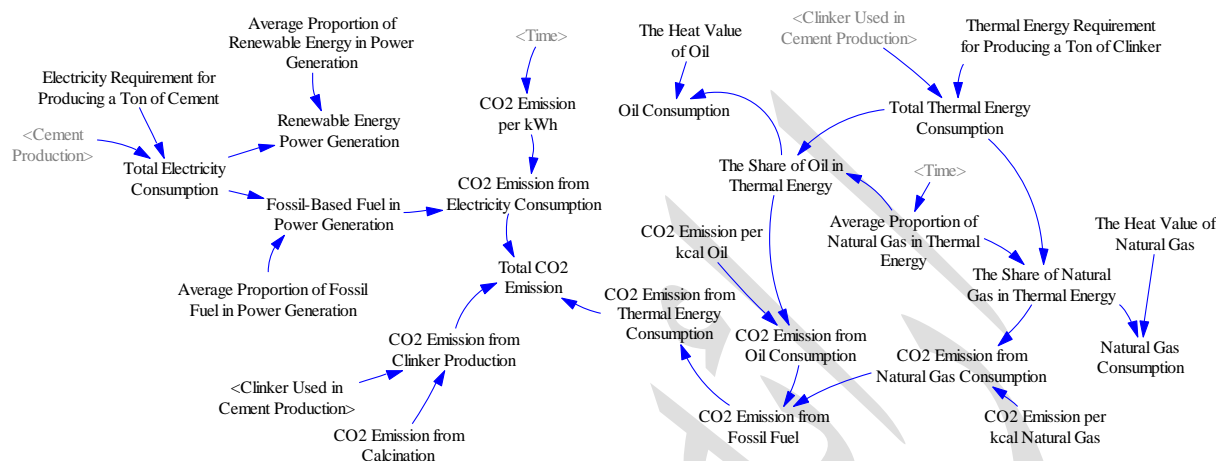
$$CUCP = CUOPC + CUPPC + CUPSC \quad (10)$$

۲-۴- زیر سیستم تولید CO₂ در صنعت سیمان

انرژی در صنعت سیمان به دو صورت الکتریکی و حرارتی به مصرف می‌رسد. میزان مصرف انرژی الکتریکی برای تولید یک تن سیمان ۱۰۰ کیلو وات ساعت و متوسط انرژی حرارتی مصرف شده برای تولید یک تن کلینکر ۸۰۰ کیلو کالری می‌باشد [17]. بیشترین میزان مصرف انرژی حرارتی در فرآیند پخت کلینکر رخ می‌دهد. چنانچه انرژی الکتریکی لازم برای این فرآیند را نیز در نظر بگیریم، پخت کلینکر در مجموع ۹۰٪ از کل انرژی مصرفی در یک کارخانه سیمان را به خود اختصاص می‌دهد [18]. طبق مطالعات زیست محیطی انجام شده در صنعت سیمان، بیشترین میزان تولید CO₂ در فرآیند تولید کلینکر رخ می‌دهد که



بخشی از آن از طریق سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای تامین انرژی حرارتی کوره منتشر می‌شود و مابقی در فرآیند تجزیه سنگ آهک به کلینکر، منتشر می‌شود. همچنین ۱۰٪ از CO₂ تولید شده در صنعت سیمان، به صورت غیر مستقیم و در فرآیند تولید برق در نیروگاه‌ها وارد محیط می‌شود. نمودار انباره و جریان تولید CO₂ در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. زیر سیستم تولید CO₂

معادلات مربوط به زیر سیستم تولید CO₂ در صنعت سیمان به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} TEC &= CP * ERPC & (11) \\ REPG &= TEC * APREPG & (12) \\ FBFGP &= TEC * APFFPG & (13) \\ CO2EEC &= CO2EPKWH * FBFGP & (14) \\ CO2ECP &= CUCP * CO2EC & (15) \\ TTEC &= TERPC * CUCP & (16) \\ SOTE &= TTEC * (1 - APNGTE) & (17) \\ SNGTE &= TTEC * APNGTE & (18) \\ NGC &= HVNG * SNGTE & (19) \\ OC &= HVO * SOTE & (20) \\ CO2EOC &= SOTE * CO2EPKcalO & (21) \\ CO2ENG &= SNGTE * CO2EPKcalNG & (22) \\ CO2EFF &= CO2EOC + CO2ENG & (23) \\ CO2ETEC &= CO2EFF & (24) \\ TCO2E &= CO2EEC + CO2ETEC + CO2ECP & (25) \end{aligned}$$

۳-۴- سیاست‌های کاهش مصرف انرژی

با گسترش روزافزون کاربرد سیمان در ساخت و سازها و همچنین پیشرفت همه جانبه دانش و صنعت، فرآیندها و فناوری‌های تولید سیمان نیز بهبود چشمگیری یافته است. در آغاز، توسعه‌ی فناوری‌ها به منظور افزایش ظرفیت و کیفیت تولید



بود اما با اهمیت یافتن موضوع بهره‌وری انرژی و در پی آن، کاهش انتشار آلاینده‌ها، به تدریج، مصرف پایین‌تر انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها از جمله ملاحظات اصلی در طراحی فناوری‌های تولید سیمان گردید.

۴-۳-۱- بازیابی انرژی حرارتی

از جمله‌ی این اقدامات می‌توان به فناوری بازیافت انرژی حرارتی اشاره کرد. گازهای خروجی از کوره، خنک‌کن کلینکر و پیش‌گرمکن، دارای توان کافی برای تولید نیرو هستند اما به دلیل عدم به کارگیری، به هدر می‌روند. در صورتی که با هدایت این جریان به سمت ژنراتورها می‌توان توربین‌های گازی را به حرکت درآورد و بخشی از برق مورد نیاز در فرآیند تولید سیمان را تامین کرد [19].

تکنولوژی‌های به کار رفته در بازیابی انرژی حرارتی در صنعت سیمان به دو دسته‌ی سیکل بخار رانکین^{۱۷} (SRC) و سیکل رانکین آلی^{۱۸} (ORC) تقسیم می‌شود. رایج‌ترین تکنولوژی به منظور بازیابی انرژی حرارتی در صنایع سیمان، سیستم‌های SRC می‌باشند که در بیش از ۹۶٪ از تاسیسات از آن استفاده می‌شود، با این وجود این تجهیزات برای ارزش حرارتی پایین طراحی نشده است. با پیشرفت‌های متوالی در تکنولوژی‌های تولید سیمان دمای گاز در کوره‌ها و پیش‌گرمکن‌ها کاهش یافته است و بازده سیستم‌های SRC به طور چشم‌گیری افت کرده است. تکنولوژی‌های ORC با استفاده از سیال‌های ارگانیک با نقطه‌ی جوش کمتر، قابلیت بازیابی حرارت در دماهای پایین‌تر را دارند و از این جهت امروزه در صنایع سیمان کاربرد بیشتری دارند [20]. در مدل پیشنهادی فرض شده که کلیه‌ی کارخانه‌های سیمان به این فناوری مجهز شوند.

۴-۳-۲- سوخت جایگزین

یکی از منابع تولید انرژی در صنعت سیمان در جهان، سوخت‌های جایگزین می‌باشند. سوخت‌های جایگزین به مواد باقی‌مانده و دورریزی اطلاق می‌شود که قابلیت جایگزینی سوخت‌های فسیلی را دارند. در بیشتر موارد، سوخت‌های جایگزین از زباله‌های شهری، صنعتی و حتی زباله‌های پرخطر تشکیل شده است در چنین شرایطی نیاز است که افزودنی‌های شیمیایی به ترکیب آن‌ها افزوده گردد تا قابلیت کاربرد در صنعت سیمان را پیدا کنند.

با توجه به توسعه‌ی روز افزون صنایع خودرو در ایران و جهان، تایلرهای فرسوده به یکی از مهمترین مواد زائد تبدیل شده‌اند. حمل و نقل، جمع‌آوری و فضای مورد نیاز برای دفن این زباله‌ها، هزینه‌ی زیادی به مدیریت شهری تحمیل می‌کند، همچنین به دلیل آلودگی زیست محیطی این پسماندها، نمی‌توان بدون انجام عملیات مقدماتی، آن‌ها را دفن کرد. با توجه به انرژی حرارتی بالای لاستیک‌ها، تزریق آن به دهانه‌ی کوره به عنوان سوخت جایگزین علاوه بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در محیط زیست می‌شود. با توجه به تولید سالانه ۲۵۰ هزار تنی لاستیک فرسوده در ایران، در صورت استفاده از تمام این ظرفیت، ۲٪ از نیاز انرژی حرارتی صنعت سیمان از این طریق قابل تامین است [21].

سوخت‌های مشتق شده از زباله نوع دیگر از سوخت‌های جایگزین هستند که پس از عبور از فرآیندهای مختلف بازیافت می‌توانند به عنوان سوخت جایگزین استفاده شوند. از هر تن زباله شهری حدود ۲۴۰ کیلوگرم سوخت مشتق می‌شود. با توجه به تولید سالانه‌ی ۴ میلیون تن زباله در ایران و ارزش حرارتی ۳۳۵۰ کیلو کالری به ازای هر تن، نزدیک به ۲۵٪ از انرژی مورد نیاز در صنعت سیمان از این طریق قابل تامین است [21]. در مدل پیشنهادی، سهم مصرف سوخت‌های مشتق شده از لاستیک و زباله، به ترتیب ۲٪ و ۲۳٪ در نظر گرفته شده است.

¹⁷ Steam Rankine Cycle

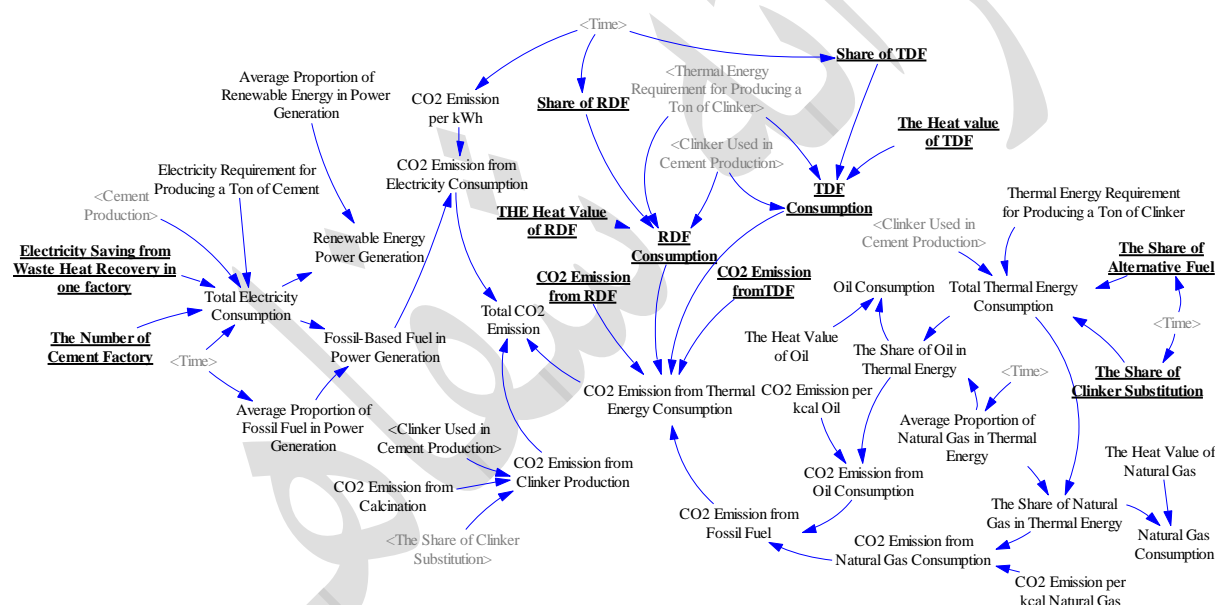
¹⁸ Organic Rankine Cycle

۴-۳-۳- تولید سیمان‌های آمیخته

با افزودن موادی همچون خاکستر، پوزولان، سرباره، میکروسیلیس و خاکستر آتشفشانی می‌توان سهم کلینکر به کار رفته در تولید سیمان را کاهش داد و انرژی مصرفی در کوره‌های سیمان را کاهش داد. این سرباره‌ها گزینه‌ی مناسبی برای جایگزینی بخشی از کلینکر به کار رفته در تولید سیمان هستند و با کاهش انرژی مورد نیاز در فرآیند کلسیناسیون^{۱۹} (تجزیه‌ی سنگ آهک)، باعث کاهش مصرف انرژی می‌شوند [22]. در مدل پیشنهادی، سهم استفاده از این مواد ۱۵٪ در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۴- نمودار انباره و جریان تحت سیاست‌های کاهش مصرف انرژی

با وارد کردن سیاست‌های اتخاذ شده جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان، تغییراتی در نمودارهای انبار و جریان و معادلات به کار رفته در مدل ایجاد شده است. در شکل ۴، متغیرهای اضافه شده به مدل و تاثیرات آن روی سایر متغیرها نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار انبار و جریان زیر سیستم تولید CO₂ تحت سیاست‌های کاهش مصرف انرژی

معادلات مربوط به سیاست‌های در نظر گرفته شده در مدل به شرح زیر است:

$$TEC = (CP * ERPC) - (ESWHRF * NCF) \quad (26)$$

$$RDFC = (SRDF * TERPC * CUCP) / HVRDF \quad (27)$$

$$TDFC = (STDF * TERPC * CUCP) / HVTDF \quad (28)$$

$$CO2ETEC = CO2EFF + (TDFC * CO2ETDF) + (RDFC * CO2ERDF) \quad (29)$$

$$TTEC = TERPC * CUCP * (1 - SAF) * (1 - SCS) \quad (3)$$

¹⁹ Calcination



$$CO2ECP = (CUCP * CO2EC) * (1 - SCS) \quad (31)$$

$$SAF = 0.25 \quad (32)$$

$$STDF = 0.02 \quad (33)$$

$$SRDF = 0.23 \quad (34)$$

$$SCS = 0.15 \quad (35)$$

$$NCF = 72 \quad (36)$$

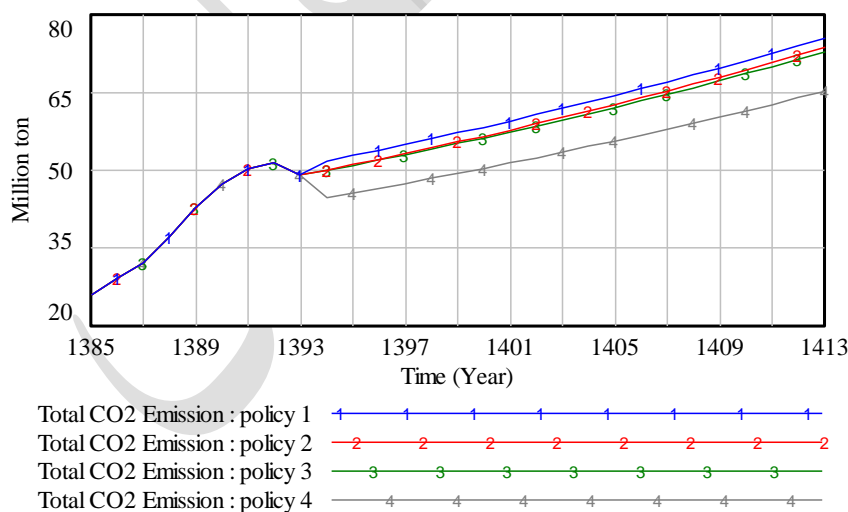
۴-۴- نتایج شبیه سازی شده

نتایج حاصل از شبیه سازی مدل تحت سیاست های کاهش مصرف انرژی، در شکل های ۵ تا ۸ نمایش داده شده است. به منظور بررسی بهتر نتایج مدل، افق زمان بندی به مدت ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. خطوط ۱ تا ۴ به ترتیب بیانگر سیاست های ادامه ی روند کنونی، استفاده از فناوری بازیابی انرژی حرارتی، استفاده از سوخت جایگزین و استفاده از کلینکر جایگزین می باشند.

نتایج حاصل از انتشار CO_2 نشان می دهد که حتی با وجود استفاده از سوخت های جایگزین و فناوری بازیابی انرژی حرارتی، میزان تولید CO_2 در مقایسه با سیاست ۱ کاهش چندانی نداشته است که این مسأله به دلیل محدود بودن ظرفیت سوخت های جایگزین و سهم اندک مصرف انرژی الکتریکی در تولید سیمان است.

با توجه به اینکه بیش از ۵۰٪ از CO_2 تولید شده در صنعت سیمان، در فرآیند تجزیه ی سنگ آهک برای تولید کلینکر صورت می گیرد [6]، استفاده از کلینکر جایگزین بهترین گزینه برای کاهش آلاینده ها می باشد. این سیاست نه تنها CO_2 ناشی از فرآیند کلسیناسیون را کاهش می دهد، بلکه با صرفه جویی در مصرف انرژی حرارتی باعث کاهش مصرف سوخت های فسیلی و در نتیجه CO_2 تولید شده ناشی از سوزاندن این منابع انرژی می شود. شکل ۵ این مسأله را به خوبی به تصویر می کشد.

Total CO2 emission

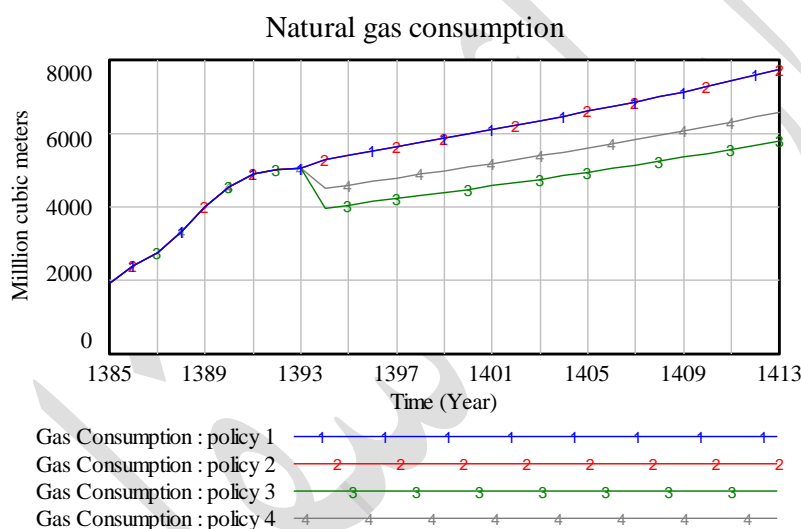


شکل ۵. میزان انتشار CO_2 در سیاست های مختلف

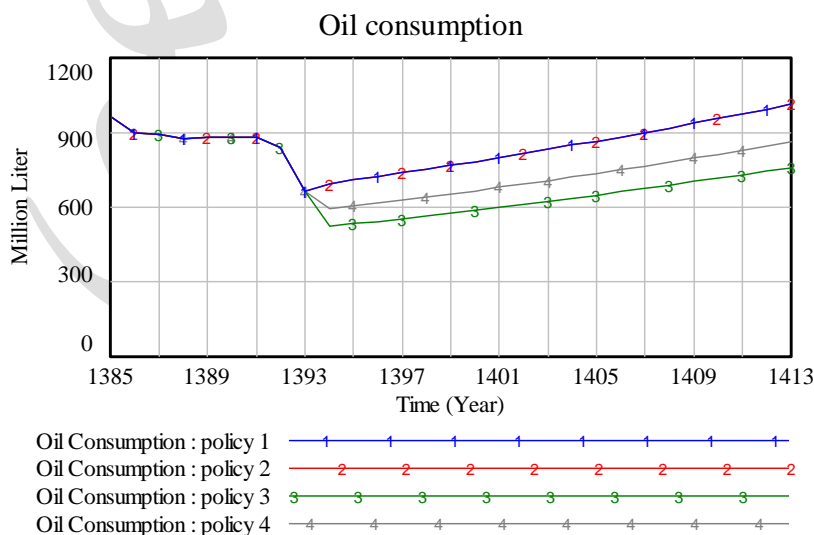


انرژی‌های الکتریکی و حرارتی دو منبع اصلی مصرف انرژی در صنایع سیمان هستند. به طور متوسط ۸۷٪ انرژی حرارتی مورد نیاز در این صنعت، با مصرف گاز طبیعی و مابقی با استفاده از فرآورده‌های نفتی تامین می‌شود [7]. همانطور که در شکل‌های ۶ تا ۸ مشخص است، سیاست‌های سوخت‌های جایگزین و کلینر جایگزین تنها باعث صرفه جویی در مصرف انرژی حرارتی می‌شوند و تاثیری در مصرف انرژی الکتریکی ندارند همچنین سیاست بازیابی انرژی حرارتی تنها سیاست تاثیر گذار در کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد.

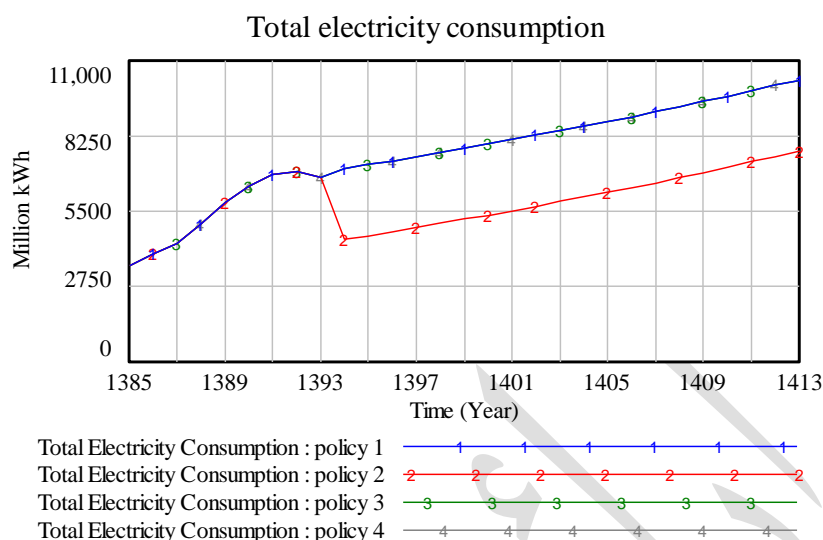
با توجه به سهم بیشتر سوخت‌های جایگزین در تامین انرژی حرارتی، میزان مصرف گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی در سیاست ۳ به مراتب کمتر از سیاست ۴ می‌باشد و پتانسیل صرفه جویی در انرژی در حالت استفاده از سوخت‌های مشتق شده از لاستیک‌های فرسوده و زباله‌های شهری بیشتر از حالتی است که از سیمان‌های آمیخته استفاده می‌شود.



شکل ۵. میزان مصرف گاز طبیعی در سیاست‌های مختلف



شکل ۶. میزان مصرف فرآورده‌های نفتی در سیاست‌های مختلف



شکل ۷. میزان مصرف انرژی الکتریکی در سیاست‌های مختلف

۵- نتیجه گیری

با توجه به محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و حذف تدریجی یارانه‌های انرژی، لزوم پیاده‌سازی سیاست‌های مدیریت انرژی در صنایع انرژی بر احساس می‌شود. صنعت سیمان با مصرف ۳٪ از انرژی حرارتی کل کشور، به عنوان دومین صنعت انرژی‌بر شناخته می‌شود. با توجه به طرح‌های توسعه‌ی زیر ساخت‌های کشور، تقاضا برای این محصول رو به افزایش است، در چنین شرایطی گزینش مناسب‌ترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان، به یک چالش اساسی تبدیل شده است. از این رو این پژوهش با ارائه‌ی یک رویکرد داینامیکی به مقایسه‌ی روش‌های کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان پرداخته است. سیاست‌های استفاده از بازیابی انرژی حرارتی، سوخت‌های جایگزین و کلینکر جایگزین به عنوان روش‌های کاهش مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از کلینکر جایگزین و سوخت‌های جایگزین، می‌توان به میزان ۱۵٪ و ۲۵٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. نتایج حاصل از انتشار CO_2 در سیاست‌های مختلف نیز بیانگر این است که استفاده از کلینکر جایگزین، بیشترین تاثیر را در کاهش آلودگی‌های محیط زیست دارد و منجر به کاهش انتشار CO_2 به میزان ۱۳٪ می‌شود. از این رو این سیاست می‌تواند به عنوان یکی از کم‌هزینه‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌های مدیریت انرژی، مورد توجه دست‌اندرکاران این صنعت قرار گیرد. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد تحلیل‌های اقتصادی در زمینه‌ی پیاده‌سازی راهکارهای کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان در مدل در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] Huang, Yun., Chang, Yi., Fleiter, Tobias (2016). **A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan's cement industry**. Energy Policy, Vol. 96.
- [2] Liu, Xianbing., Fan, Yongbin., Wang, Can (2017). **An estimation of the effect of carbon pricing for CO_2 mitigation in China's cement industry**. Applied Energy, Vol. 185.



- [3] Satchs, J. D. (2015). **The age of sustainable development**. Colombia university press, New York.
- [4] Iranian Fuel Conservation Company. Available: <http://ifco.ir/index.php/2013-01-31-07-20-52/2016-02-23-10-33-36/2016-02-23-13-37-41>.
- [5] Nehdi, Moncef., Rehan, Rashid., Simonovic, Slobodan P. (2004). **System dynamics model for sustainable cement and concrete: Novel tool for policy analysis**. Aci Materials Journal, vol. 101.
- [6] Anand, Shalini., Vrat, Prem., Dahiya, R.P. (2006). **Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO2 emissions from the cement industry**. Journal of Environmental Management, vol. 79, No. 4: 383–398.
- [7] Ansari, Nastaran., Seifi, Abbas (2013). **A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO2 emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios**. Energy Policy, Vol. 58.
- [8] Moya, José Antonio., Pardo, Nicolás., Mercier, Arnaud (2011). **The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgeting decision criteria**. Journal of Cleaner Production, Vol. 19, No. 11: 1207–1215.
- [9] Aranda Usón, Alfonso., López-Sabirón, Ana M., Ferreira, Germa'n., Llera Sastresa, Eva (2013). **Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options**. Renewable and Sustainable Energy Reviews., Vol. 23.
- [10] Oh, Da-Young., Noguchi, Takafumi., Kitagaki, Ryoma., Park, Won-Jun (2014). **CO2 emission reduction by reuse of building material waste in the Japanese cement industry**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 38.
- [11] Vargas, J., Halog, A. (2015). **Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry**. Journal of Cleaner Production, Vol. 103.
- [12] Zuberi, M. Jibran S., Patel, Martin K. (2017). **Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials in the Swiss cement industry**. Journal of Cleaner Production, Vol. 142.
- [13] Sterman, J.D. (2000). **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. McGraw-Hill, Boston.
- [14] مختاری، قاسم (۱۳۹۲). **تفکر سیستمی (مبانی، ابزار و روش)**، ویرایش ششم، قم، انتشارات دانشگاه قم.
- [15] WBCSD and IEA (2009). **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emission reductions up to 2050**.
- [16] Iranian Cement Association. Available: <http://www.cementassociation.ir/>
- [17] محمد بد، علی (۱۳۹۳). **تحلیلی از صنعت سیمان، ماهنامه علمی- تخصصی فن‌آوری سیمان**، شماره ۷۳، تیرماه ۱۳۹۳.
- [18] Madlool, N.A., Saidur, R., Rahim, N.A., Kamalisarvestani, M. (2013). **An overview of energy savings measures for cement industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews., Vol. 19.
- [19] Worrell, E., Galitsky, C., Price, Lynn (2008). **Energy efficiency improvement opportunities for the cement industry**. Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.
- [20] دشتگلی، نوید (۱۳۹۴). **بازیابی حرارت تلفاتی در بخش سیمان به وسیله‌ی سیکل رانکین آلی**، ماهنامه علمی- تخصصی فن‌آوری سیمان، شماره ۹۱، بهمن ماه ۱۳۹۴.
- [21] رکنی زاده، جلیل؛ نجاتی، وحید (۱۳۹۳). **بررسی فنی و اقتصادی ورود سوخت حاصل از زباله و تاثیر فرسوده در صنایع سیمان ایران**، نشریه انرژی ایران، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳.
- [22] Bettye, R., Walsh, S., Lee-Greco, J. (2000) **NOX control technologies for the cement industry**. U.S. environmental Protection Agency, Triangle Park, NC.



Policy Making in Cement Industry for Mitigation of Energy Consumption and CO₂ Emission Using System Dynamics Approach

Zahra Jokar¹, Alireza Mokhtar^{2,*}

Shiraz University of Technology, zahrajokar7113@gmail.com

Shiraz University of Technology, mokhtar@gmail.com

Abstract

Today, energy access is one of the most challenging issues in the world. Due to limitation of energy resources and the rapid rise of energy carriers' tariffs in Iran, identifying the methods and the strategies for energy management in energy intensive industries such as cement is imperative. In this regard, this paper evaluates the opportunities for reducing energy consumption and CO₂ emission in the cement industr. A system dynamics model is developed under three energy efficient technologies (clinker substitution, alternative fuels and waste heat recovery) over a period of 20 years. The simulation results indicate that utilizing clinker substitution in producing cement, could potentially lead to reductions of 15% and 13%, respectively in energy consumption and CO₂ emission. Hence, it can be considered as one of the most influential policies in energy management to achieve sustainable cement production.

Keywords: cement industry, energy efficiency technologies, system dynamics, sustainable development

¹ postgraduate student

^{2,*} Assistant Professor