

بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاهها بر میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای: رویکرد پویایی سیستمی

داود منظور* و حسین رضائی**

تاریخ دریافت: ۲۸ آبان ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۱ اسفند ۱۳۹۲

چکیده

انتظار می‌رود اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها در بازار برق مقررات زدایی شده کشور به افزایش قیمت برق در بازار و در نتیجه تغییر در تولید برق و به تبع آن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی منجر شود. جهت سنجش کمی اثرات اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها بر میزان انتشار آلاینده‌ها در کشور، در این مقاله بازار برق مقررات زدایی شده به روش پویایی سیستمی مدل سازی می‌شود. این مدل دارای بخش‌های نرخ بازگشت سرمایه گذاری، حجم سرمایه گذاری، تولید، تقاضا و قیمت‌نماست که برای شبیه‌سازی آن از نرم افزار پاورسیم^۱ استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند قیمت‌های قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها در چارچوب مدل، پیش‌بینی می‌شود میزان آلاینده‌های کربنی از ۶۱۵ میلیون تن دره تراوات ساعت در ابتدای دوره با ۵ درصد رشد سالیانه به ۲۷۷/۸ میلیون تن برای گازهای گلخانه‌ای و ۱۷۵ هزار تن برای گازهای آلاینده در پایان دوره شبیه‌سازی خواهد رسید. با اجرای مرحله اول قانون هدفمندسازی یارانه‌ها و افزایی شقیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، تولید برق و به تبع آن میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی کاهش محسوسی خواهد داشت. نتایج مدل نشان می‌دهد با حفظ رشد اقتصادی ۴/۵ درصد، میزان تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی در پایان دوره نسبت به زمان عدم اجرای طرح تحول ادرصد کاهش رشد سالیانه خواهد داشت و در صورت افزایش رشد اقتصادی به ۸ درصد، میزان انتشار سالانه حدود ۳ درصد افزایش رشد سالیانه خواهد داشت. همچنین در صورت افزایش رشد راندمان نیروگاهها براساس قانون پنجم توسعه، با رشد ۴/۵ درصدی در مدل کاهش رشد سالیانه و در صورت رشد ۸ درصدی،

حدود ۴/۰ درصد نسبت به پیش از اجرای طرح هدفمندی یارانه‌ها افزایش رشد خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: بازار برق – ظرفیت نیروگاهها، تولید انرژی الکتریکی – قیمت برق – پویایی سیستمی.

طبقه‌بندی JEL: D43, D50, C63, P22, C61

۱. مقدمه

استفاده از انرژی مطمئن کلید رشد و توسعه اقتصادی کشورها محسوب می‌شود، هر چند انرژی فسیلی عمدۀ ترین و رایج‌ترین انرژی مورد استفاده در تمامی کشورها محسوب می‌شود، لیکن آلدگی زیست محیطیاز مهمترین پیامدهای خارجی استفاده از سوختهای فسیلی است که تاثیرات منفی گرانباری بر کره زمین بر جای نهاده است. تعریف آلدگی محیط زیست موجب تنزل کیفیت محیط زیست از طریق افزودن ماده یا شکلی از انرژی نسبت به مقدار طبیعی آن می‌شود بطوری که سلامت انسان را تهدید می‌کند. در فرآیند تولید تا مصرف انرژی برق علاوه بر آسیب‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده، آلدگی ناشی از میدانیهای الکترومغناطیس نیز رخ می‌دهد. در این مقاله صرفاً به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها می‌پردازیم.

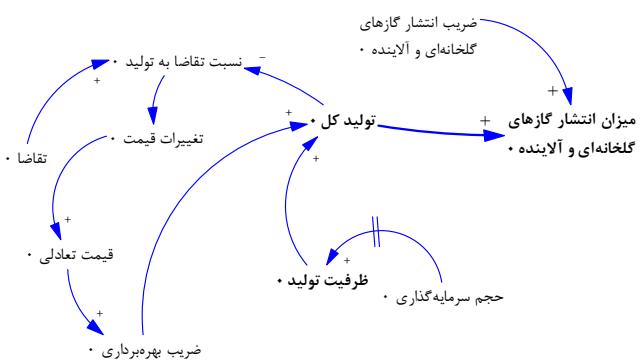
آمارها نشان می‌دهد که میزان انتشار دی اکسید کربن به ازای تولید یک کیلووات ساعت برق در کشور ۶۷۷/۸ گرم است که بر این اساس ایران بعد از هندوستان، عربستان، چین و اندونزی، در رتبه پنجم جهان قرار دارد (IEA, 2013). همچنین سرانه انتشار دی اکسید کربن ناشی از تولید و مصرف انرژی در کشور در سال ۱۳۹۰ معادل ۷/۲۱ تن است که از لحاظ رتبه در جهان هفتم و در خاورمیانه بعد از عربستان رتبه دوم را به خود اختصاص داده است. سیاستگذاری برای کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوختهای فسیلی مستلزم توجه به دو متغیر سطح مصرف انرژی و نوع فن‌آوری مورد استفاده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که قیمت اسمی و قیمت‌های نسبی مهمترین عوامل موثر بر این دو متغیر هستند (Schmitz, 2001). بنابراین سیاستهای اصلاح قیمت و مالیات بر کربن می‌تواند بر میزان مصرف و ارتقاء فن‌آوری‌های مصرف انرژی و به تبع آن کاهش انتشار تاثیر به سزایی داشته باشد.

مطالعات تجربی نشان می‌دهد با افزایش قیمت حاملهای انرژی در کشور، هم سطح مصرف حاملهای انرژی کاهش می‌یابد (منظور، رضائی، ۱۳۸۹) و هم فن‌آوری استفاده از انرژی تحت تاثیر قرار می‌گیرد (منظور و دیگران، ۲۰۰۹). با توجه به اینکه استفاده از انرژی‌های فسیلی عامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های زیستمحیطی هستند انتظار می‌رود اصلاح قیمت‌های انرژی می‌تواند تاثیر چشمگیری در کاهش انتشار در کشور داشته باشد.

هدف این مقاله بررسی میزان تاثیر افزایش قیمت سوخت تحويلی به نیروگاه‌ها بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده در نیروگاه‌ها است. برای این منظور با استفاده از رویکرد پویایی سیستمی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده تحت سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، در قسمت دوم ساختار کلی بازار برق در قالب نمودارهای علی-معلولی و نمودارهای جریان حالت تشریح شده، ضمن معرفی داده‌های مورد استفاده مقادیر پارامترهای الگوی پیشنهادی تعیین می‌شود. در قسمت سوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل تحت سناریوهای مختلف تعزیز و تحلیل می‌شود. قسمت پایانی به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌پردازد.

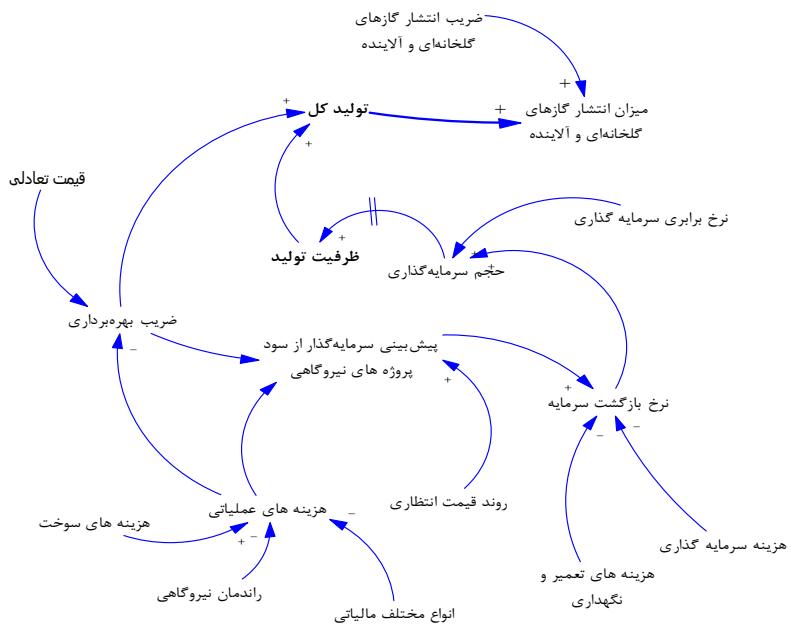
۲. مدل پیشنهادی

در این مدل روابط علی-معلولی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده توسط نیروگاه‌ها در چارچوب بازار برق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این منظور بازار برق با استفاده از روابط علی و معلولی در سه بخش شامل تقاضا، تولید و قیمت مدلسازی می‌شود. (نمودار ۱). طبعاً انتشار آلاینده‌ها در بخش تولید رخ می‌دهد.



منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

در زیر مدل تولید، به توضیع نحوه تصمیم گیری تولید کنندگان برق به ویژه تصمیمات مربوط به سرمایه‌گذاری در احداث نیروگاه‌های جدید و بهره‌برداری از نیروگاه‌های موجود می‌پردازیم (نمودار ۲).



نمودار ۱۰. نمودار علی - مخلوط تولید و سرمایه گذاری نیروگاهها

منبع: مستخرج از پایان نامه دکتری

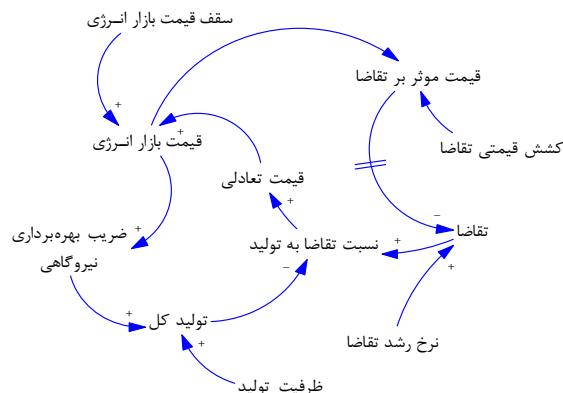
همانطور که ملاحظه می شود سرمایه گذاری های جدید نیروگاهی با توجه به پیشینی سرمایه گذار از سود پژوهه های نیروگاهی انجام می شود که این سود نیز به نوبه خود تحت تاثیر قیمت انتظاری ، هزینه های عملیاتی و ضریب بهره برداری از نیروگاه است. افزایش قیمت انتظاری و ضریب بهره برداری سود عملیاتی مورد انتظار را افزایش داده و افزایش هزینه ها عملیاتی سبب کاهش آن می شود. افزایش سود در مقابل افزایش مورد انتظار سبب افزایش نرخ بازگشت سرمایه و درنتیجه کاهش سرمایه گذاری نیروگاهی می شود. هزینه های تعمیر و نگهداری و هزینه های سرمایه گذاری سبب کاهش نرخ بازگشت سرمایه و درنتیجه کاهش سرمایه گذاری نیروگاهی می شود به هر حال، افزایش ظرفیت نیروگاهی با دو نوع وقفه مواجه است. زمان لازم برای تقاضای مجوز ساخت و برسی و دریافت تاییدیه آن وقفه اول و زمان لازم برای انجام سرمایه گذاری

بورسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاهها بر ... ۲۰۳

تاخیر دوم محسوب می‌شود که در مدل لحاظ شده است. با افزایش سرمایه‌گذاری، ظرفیت تولید نیروگاهها افزایش می‌یابد.

به برداری از نیروگاه‌های موجود برای تولید برق تابعی از ضریب بهره برداری^۱ و ظرفیت نیروگاهی موجود است. ضریب بهره برداری با قیمت برق رابطه مستقیم و با هزینه‌های عملیاتی رابطه‌ای معکوس دارد. سرانجام اینکه میزان انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای به حجم تولید نیروگاه‌های حرارتی و ضریب انتشار آلاینده بستگی دارد.

نمودار (۳) زیرمدل تقاضا را نشان می‌دهد. براساس این نمودار تغییرات تقاضا تابعی از عوامل قیمتی و عوامل حقیقی در اقتصاد است. قیمت تاثیر منفی و عوامل حقیقی تاثیر مثبت بر تقاضا دارند. افزایش تقاضا به خودی خود سبب افزایش نسبت تقاضا به تولید شده، که این امر افزایش قیمت در بازار برق موجب می‌شود. افزایش قیمت بازار برق تعادلی به نوبه خود کاهش تقاضا را در بازخورد بعد موجب می‌شود.

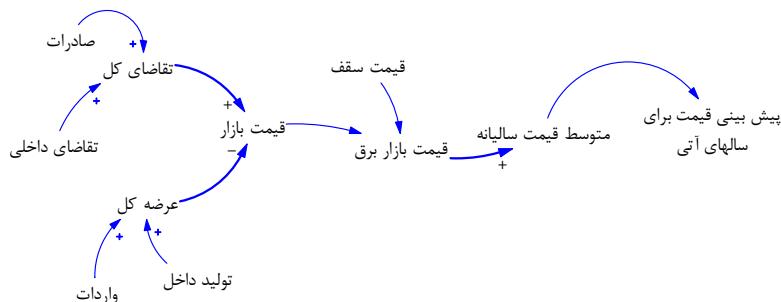


منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

نمودار (۳) روابط علی - معلولی قیمت را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش تقاضا سبب افزایش نسبت تقاضا به عرضه و در نتیجه افزایش قیمت بازار برق می‌شود. افزایش قیمت تعادلی در نهایت با رعایت سقف قیمت بازار سبب افزایش قیمت متوسط سالیانه بازار برق می‌شود.

۱. ضریب بهره برداری (capacity factor) بیانگر درصد استفاده از ظرفیت کامل نیروگاه در یک دوره زمانی معین است.

افزایش قیمت متوسط سالیانه بازار برق از یک طرف سبب کاهش تقاضا و در نهایت کاهش نسبت تقاضا به عرضه و از طرف دیگر سبب افزایش ضریب بهره‌برداری نیروگاهی می‌شود. با ثابت بودن هزینه‌های عملیاتی انواع مختلف نیروگاه‌ها، افزایش ضریب بهره‌برداری سبب افزایش تولید و کاهش نسبت تقاضا به تولید می‌شود که در نهایت تاثیر منفی بر قیمت بازار برق دارد. بنابراین افزایش قیمت از یک سو سبب کاهش تقاضا و از سوی دیگر سبب افزایش تولید شده، بازار به تعادل بازمی‌گردد.



نمودار ۱۱. روابط علی-معلولی قیمت

منبع: مستخرج از پایان‌نامه دکتری

یافتن ریاضی روابط علی-معلولی

در این قسمت اهم روابط علی-معلولی را که در قسمت قبل معرفی شد، با استفاده از توابع معمول در نرم‌افزار پاورسیم، به زبان ریاضی بیان می‌شود.

میزان تولید نیروگاه نوع آام که در مرحله ۷ از چرخه عمر خود قرار دارد از حاصل ضرب ظرفیت آن در ضریب بهره‌برداری و ساعت‌ها کل سال حاصل می‌شود.

$$G_{i,v} = Ca_{i,v} \times CF_{i,v} \times hr \quad [twh/yr] \quad (1)$$

با توجه به رابطه فوق، $G_{i,v}$ تولید کل انواع نیروگاه‌ها و $CF_{i,v}$ ، ضریب بهره‌برداری فن‌آوری نیروگاهی نوع آام از مرحله ۷ چرخه عمر و hr تعداد ساعت‌ها در طول سال است. همچنین:

$$TG = Im + \sum_{i \in T, v \in V} G_{i,v} \quad [twh/yr] \quad (2)$$

$$NG = TG \times (1 - gl) \quad [twh/yr] \quad (3)$$

$$Hr = 8760 \quad [hr/yr] \quad (4)$$

با توجه به روابط فوق، TG تولید کل شبکه، Im واردات، NG تولید خالص و Avg تلفات شبکه انتقال است. مقدار تولید هر نیروگاه تابعی از ظرفیت و ضریب بهره‌برداری آن نیروگاه است و قیمت بازار برق عامل مهمی در مقدار این ضریب بهشمار می‌رود.

ضریب بهره‌برداری نیروگاه که بیانگر درصد استفاده از ظرفیت کامل یک نیروگاه در یک دوره زمانی معین را نشان می‌دهد^۱، تابعی از قیمت بازار، هزینه سوخت، بازده نیروگاه، مالیات و یارانه‌ها است. به طور خلاصه، ضریب ظرفیت را متناسب با نسبت قیمت بازار برق و معکوس هزینه‌های عملیاتی درنظر می‌گیریم. برای حصول نتایج دقیق‌تر، ضریب بهره‌برداری را برای انواع مختلف نیروگاه و مراحل مختلف چرخه عمر نیروگاه‌های متفاوت درنظر می‌گیریم.

$$CF_i, v = CF(P, F_{ci}, e_{fi}, v, T_i) \quad \forall i \quad (5)$$

$$CF_{i,v} = \frac{P}{OC_{i,v}} \% \quad (6)$$

$$OC_{i,v} = \frac{F_{ci} - SO_i}{e_{fi,v}} + T_i \quad [Rial / MWh] \quad (7)$$

$$Em_i = G_i \times Ein_i \quad [Mt CO2 / yr] \quad (8)$$

$$TEm_i = \sum_{i \in T} Em_i \quad [Mt CO2 / yr] \quad (9)$$

$$E_i n_i = \text{constant} \quad [kg CO2/MWh] \quad (10)$$

۷ مراحل مختلف چرخه عمر نیروگاهی (جدید، میانی و قدیم)، P قیمت بازار برق، $OC_{i,v}$ هزینه عملیاتی نیروگاه آم از زنجیره v ، F_{ci} هزینه سوخت نیروگاه نوع آم، T_i اثر مداخلات (مالیات کربن) بر هزینه عملیاتی نیروگاه نوع آم، SO_i یارانه پرداختی به نیروگاه‌ها، $e_{fi,v}$ کارایی نیروگاه آم از زنجیره v است. متوسط سالیانه CF_i برای برآورد هزینه‌های نهایی بلندمدت استفاده می‌شود. Em_i میزان انتشار نیروگاه آم، Ein_i شدت انتشار آلودگی و G_i تولید نیروگاه نوع آم است. شدت انتشار بیانگر میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و آلاینده بر حسب کیلوگرم برای تولید یک مگاوات ساعت برق است. TEm_i مقدار کل انتشار در سال است.

ظرفیت نیروگاهی یکی از متغیرهای مهم در زیر مدل تولید است که در اینجا به توضیح آن می‌پردازیم. رابطه (۱۱)، حجم سرمایه‌گذاری در حال ساخت در هر دوره زمانی ($IV_{i,t}$) به ظرفیت

نصب شده نیروگاهی (CA_i)، در خواست مجوزهای سرمایه‌گذاری جدید متاثر از شاخص (fap_i) سودآوری و نرخ سرمایه‌گذاری (EI_i) بستگی دارد. نرخ معادل سرمایه‌گذاری بیانگر میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای حفظ سهم هر گروه از نیروگاهها در سبد تولیدی شبکه است که با عکس عمر نیروگاه متناسب است. اثر سودآوری بر سرمایه‌گذاری در واحدهای نیروگاهی از نسبت بازگشت سرمایه (ROI_i) و حداقل نرخ بازگشت سرمایه ($RROI_i$) برای شروع سرمایه‌گذاری حاصل می‌شود.

$$IV_{i,t} = \text{MIN}(pv_{i,t}, CA_i \times fap_i \times EI_i) \quad [\text{MW/yr}] \quad (11)$$

$$CA_i = \sum_{v \in V} Ca_{i,v} \quad [\text{MW}] \quad (12)$$

$$EI_i = 1/Lf_i \quad [1/\text{yr}] \quad (13)$$

$$PV_{i,t} = PV_{i,0} + \int (pc_{i,t} - IV_{i,t} - prj_{i,t}) dt \quad (14)$$

$$, \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n\}) \alpha_i, fap_i = \text{GRAPH}(ROI_i/RROI_i, \alpha_i) \quad (15)$$

$$RROI_i = 1 + Ir \quad (16)$$

$$Ir = \text{constant} \quad (17)$$

حجم سرمایه‌گذاری در حال ساخت در هر دوره زمانی، $IV_{i,t}$ نرخ سرمایه‌گذاری تعادلی، CA_i ظرفیت نصب شده فعلی نیروگاه آم، fap_i ضریب تاثیر شاخص سودآوری بر درخواست مجوزهای سرمایه‌گذاری جدید، β_i و α_i مقادیر ثابت و داده شده هستند. Lf_i دوره عمر نیروگاه نوع آم. با توجه به روابط فوق، $pc_{i,t}$ تایید نهایی نیروگاه نوع آم در دوره، $prj_{i,t}$ مقدار رد شدن طرح‌های نیروگاه نوع آم، $pv_{i,t}$ حجم طرح‌های سرمایه‌گذاری تایید شده و در نهایت Ir نرخ بازگشت داخلی است.

مهمنترین روابط ریاضی زیرمدل قیمت و تقاضا را در قالب علائم مورد استفاده در نرم افزار پاورسیم به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$P_{eq} = P_0 + \int_{s=1}^t \Delta P_s dt \quad [\text{NOK/MWh}] \quad (18)$$

$$= [(P_{eq} \times (D_t - TG)) / D_t] \times \frac{1}{AT} \Delta P_s \quad [\text{Rial/MWh/da}] \quad (19)$$

$$P_0 = \text{constant} \quad [\text{Rial /MWh}] \quad (20)$$

$$Q_d = D_t \times D_v \quad [\text{TWh/yr}]$$

بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاهها بر ... ۲۰۷

$$D_t = D_0 + \int_{s=1}^t \Delta D_s dt \quad [\text{TWh/yr}] \quad (22)$$

$$D_0 = \text{constant} \quad [\text{TWh/yr}] \quad (23)$$

$$P_{eq} = P_0 + \int \Delta P_t dt \quad [\text{RIAL/MWh}] \quad (24)$$

$$= D_t \times (\dot{D}_r + \dot{D}_p) \Delta D_t \quad [\text{TWh/yr}] \quad (25)$$

$$= G_r + p_{op} \dot{D}_r \quad [1/\text{yr}] \quad (26)$$

$$P_{fcs} = \text{FORECAST}(\text{Average Price}, 3 \text{ yr}, 4 \text{ yr}) \quad [\text{RIAL/MWh}] \quad (27)$$

با توجه به روابط فوق، D_t تقاضای سالیانه، ΔD_t تغییرات تقاضای سالیانه، P_{eq} قیمت تعادلی بازار

برق، P_0 قیمت اولیه در سال مبنا، ΔP_t تغییرات قیمت در سال t ، \dot{D}_r نرخ تغییرات تقاضا ناشی از

عوامل حقيقی معادل مجموع نرخ رشد جمعیت (p_{op}) و نرخ رشد تولید ملی حقيقی (G_r)، \dot{D}_p تغییرات تقاضا ناشی از عامل قیمت و AT تعديل زمانی است. P_{fcs} پیش‌بینی قیمت در سال‌های آینده است که برای محاسبه آن از دستور پیش‌بینی در نرم‌افزار پاورسیم^۱ استفاده می‌شود.

۳.دادهای مورد استفاده

همانگونه که ملاحظه می‌شود این مدل شامل پارامترهای برونزای متعددی است که مقادیر آنها باید پیش از حل مدل با توجه به وضعیت سالهای سالهای گذشته صنعت برق کشور تعیین شود. عناوین این پارامترها و مقادیر مورد استفاده برای آنها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. مقادیر مفروض برای پارامترهای مدل

نام متغیر	علامت اختصاری	نام متغیر	مقدار	نام متغیر	علامت اختصاری
نرخ تغییرات واقعی تقاضا (درصد)		کشش قیمتی بلندمدت تقاضای برق	۶/۴	\dot{D}_r	E_p
قیمت ^۲ اولیه بازار برق در سال ۸۸ (ریال بر کیلووات ساعت)		سقف قیمت بازار (ریال بر کیلووات ساعت)	۱۶۵	P_0	P_{cei0}
تقاضای اولیه (تراوات ساعت در سال)		نرخ رشد سقف قیمت بازار (درصد)	۱۶۷/۵	D_0	p_{cer}

۱. FORECAST

۲۰۸ فصلنامه اقتصاد انرژی ایران سال سوم شماره ۹

۲۰۶۸	M _p	وارادات بر حسب گیگاوات ساعت ^۴	۶۱۵۲	Ex	صادرات بر حسب گیگاوات ساعت ^۳
۱۶ ۲۳۲	P _{mp}	قیمت واردات بر حسب ریال بر گیگاوات ساعت	۴۶۰	P _{ex}	قیمت صادرات بر حسب ریال بر گیگاوات ساعت
۱۷/۷	FC _{gt}	هزینه سوخت تولید یک کیلووات ساعت برق توسط نیروگاههای گازی	۳۶/۲	ef	متوسط راندمان نیروگاهها (درصد)
۱۱/۸	FC _{cc}	هزینه سوخت تولید یک کیلووات ساعت برق توسط نیروگاههای سیکل ترکیبی	۱۱/۲	FC _{st}	هزینه سوخت تولید یک کیلووات ساعت برق توسط نیروگاههای بخاری
۷/۳	\dot{P}_t	نرخ رشد قیمت برق طی سالهای (۸۰-۸۸ درصد)	۸۷۶۰	FC _{gt}	تعداد ساعات سال
۱/۷	\bar{P}_{op}	نرخ رشد جمعیت	۵/۴	FC _{cc}	نرخ رشد تولید ناخالص داخلی

مأخذ: ۱- سایت بانک مرکزی. ۲- سایت شرکت مدیریت شبکه برق ایران. ۳- دفتر روابط برون مرزی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران

اجرای مدل‌های پویایی سیستمی مستلزم در اختیارداشتن مقادیر اولیه متغیرها در ابتدای دوره شیوه‌سازی است. جدول (۲) مقادیر اولیه متغیرهای مدل را نشان می‌دهد:

جدول ۲. مقادیر اولیه زیرمدلهای تولید، ارزیابی سودآوری سرمایه‌گذاری، فرآیند درخواست مجوز و سرمایه‌گذاری وزنجیره ظرفیت

نام متغیر	علامت اختصاری	گازی	بخاری	سیکل ترکیبی	برق آبی	بادی
هزینه تعمیر و نگهداری (R/MWh)	O&M _i	۲۲۵۹۹/۱	۶۶۸۸۷/۲	۳۲۵۲۶/۹	۲۶۷۱۲/۳	۲۲۵۹۹/۱
هزینه سوخت تحويلی (R/MWh)	fc _i	.	۱۱/۳	۱۱/۸	.	.
مجوز درخواست اولیه (MW)	P _{app,i,0}	۲۲۳۰	۳۵۵۵	۴۰۱۸۳	۴۸۷۷	۱۹۵۹
نرخ سرمایه‌گذاری تعادلی	El _i	۰/۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۲	۰/۰۵
مدت زمان ساخت نیروگاهها (yr)	Ct _i	۲	۵	۵	۷	۳
طول عمر نیروگاهها (yr)	Lf _i	۲۰	۳۰	۳۰	۵۰	۲۰
ظرفیت‌های درحال ساخت	Cu _{i,t}	۲۲۶۹۰	۶۴۰	۱۷۳۴۰	۴۵۷۰	۱۹۵۹

بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاهها بر ... ۲۰۹

							(MW)
.	.	۶۱۱	۹۸۵	۱۰۶۸	Eini		شدت انتشار گازهای آلینده نیروگاهی (گرم بر کیلووات ساعت)
۶۳	۵۴۲۲	۱۰۴۷۹	۳۲۵۰	۱۶۹۴	Nc _{i,t}	جدید	ظرفیت نیروگاهها (MW)
۱۵۲	۸۵	.	۴۹۲۵	۵۹۳۳	Imc _{i,0}	میان سال	
.	۱۹۱۴	.	۷۴۷۵	۳۴۸۹	Oc _{i,0}	قدیمی	راندمان نیروگاهها ^۳ (درصد)
۱۰۰	۱۰۰	۴۷	۴۵	۲۹/۹	ef _{i,n}	جدید	
۱۰۰	۱۰۰	۴۱/۵	۳۹	۲۹	ef _{i,m}	میان سال	
۱۰۰	۱۰۰	۴۰	۳۵	۲۵	ef _{i,0}	قدیمی	

ماخذ: ۱- تراز نامه انرژی، وزارت نیرو، ۱۳۸۷-۲. آمار تفصیلی صنعت برق ایران، ۱۳۸۷-۳- گزارش ۴۱ سال صنعت

برق ایران. راندمان هر خوش از میانگین گیری وزنی راندمان ظرفیت های نصب شده در آن خوش محاسبه شده است

۴. شبیه سازی مدل

در این بخش، روند انتشار گازهای آلینده و گلخانه ای از بخش نیروگاهی کشور در یک بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۹۸-۱۳۸۹) شبیه سازی می شود.

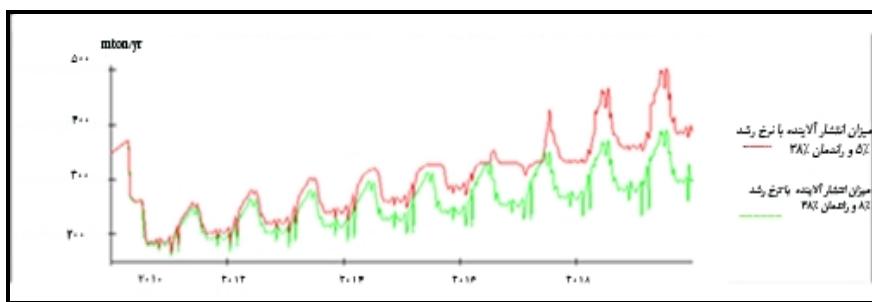
از حل مدل جواب متغیرهای درون زای مدل تعیین می شود. این مدل دارای بیش از ۲۰ متغیر درونز است که در اینجا صرفا نتایج مربوط به متغیرهای انتشار گازهای آلینده و گلخانه ای از بخش نیروگاهی کشور گزارش می شود. ابتدا مدل براساس فرض استمرار روند قیمت های سوخت نیروگاهی در سالهای قبل از ۱۳۸۹ اجرا می شود. سپس قیمت سوخت نیروگاه ها با توجه به افزایش قیمت ها در سال ۱۳۸۹ در اجرای مرحله اول قانون هدفمندی یارانه ها، تعدیل شده، اثرات آن در میزان انتشار گازهای گلخانه ای و آلینده در دوره (۹۸-۱۳۸۹) شبیه سازی می شود. نکته قابل ذکر این است که مدل براساس قیمت های ثابت اجراء شده است و به دلیل اینکه فضای تحریم بر عملکرد بازار برق اثر مستقیم ندارد در مدل لحاظ نشده است.

میزان انتشار گازهای آلینده و گلخانه ای از بخش نیروگاهی کشور به سطح تولید برق و کیفیت نیروگاه های فعال بستگی دارد. بنابراین انتظار می رود در صورت ادامه روند قیمت های پایین سالهای قبل از ۱۳۸۹، رشد بالای تقاضای برق تداوم یافته، انتشار گازهای آلینده و گلخانه ای از بخش نیروگاهی کشور روند نگران کننده قبلی را داشته باشد. به هر حال، با افزایش

۲۱. فصلنامه اقتصاد انرژی ایران سال سوم شماره ۹

قیمت سوخت نیروگاهی انتظار می رود ترکیب نیروگاه ها، میزان تقاضای برق و به تبع آن میزان انتشار گازها آلاینده و گازهای گلخانه ای تعديل شود.

در صورت استمرار قیمت های سوخت نیروگاهی در سال های قبل از اجرای مرحله اول قانون هدفمندی، روند انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده با فرض نرخ رشد اقتصادی $5/4$ درصد و 8 درصد^۱ در نمودار (۵) نشان داده شده است.

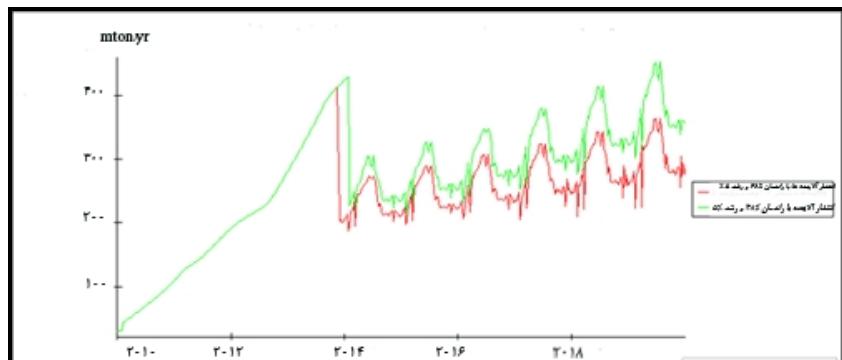


منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

از اجرای مدل پیشنهاد، روند انتشار گازهای آلاینده و زیست محیطی به دنبال اصلاح قیمت سوخت نیروگاهها با فرض نرخ رشد اقتصادی $5/4$ درصد و 8 درصد و متوسط راندمان نیروگاهی $۰/۳۶$ و $۰/۴۵$ در افق برنامه‌ریزی (۱۳۸۹-۹۸) در نمودارهای (۶) و (۷) نشان داده شده است.

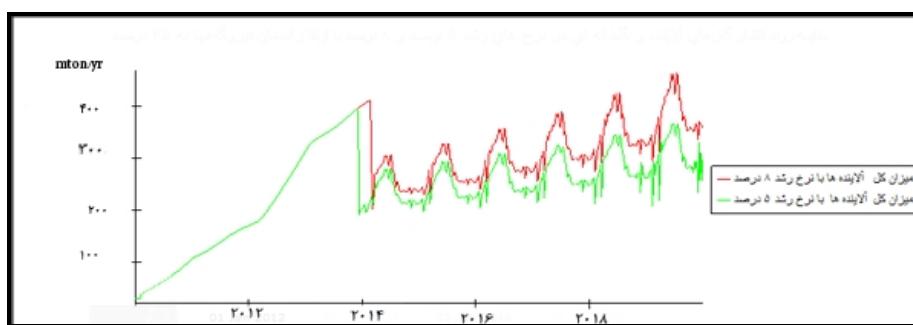
۱. نرخ رشد $5/4$ درصد را براساس متوسط نرخ رشد سالهای ۸۳ الی ۸۸ لحاظ شده است و نرخ رشد 8 درصد نیز نرخ هدف گذاری شده برنامه پنجم توسعه در نظر گرفته شده است.

۲. متوسط وزنی راندمان نیروگاههای گازی، سیکل ترکیبی و بخاری در ابتدای دوره شیوه‌سازی
۳. متوسط راندمان جهانی نیروگاهها



نمودار ۱۳. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاند در نرخ‌های رشد اقتصادی ۵/۴ درصد و ۸ درصد با ارتقاء راندمان نیروگاهها به ۳۸ درصد

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل



نمودار ۱۴. مقایسه روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاند در نرخ‌های رشد اقتصادی ۵ درصد و ۸ درصد با ارتقاء راندمان نیروگاهها به ۴۵ درصد

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به نتایج مدل، پیش‌بینی می‌شود در صورت استمرار روند گذشته قیمت‌های سوخت تحویلی به نیروگاهها، با فرض نرخ رشد اقتصادی ۵ درصد و متوسط راندمان نیروگاهی ۳۸ درصد، تولید کل شبکه از ۲۳۳ تراوات ساعت در ابتدای دوره با ۴ درصد رشد سالیانه به ۳۲۷ تراوات ساعت برسید. در این صورت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاند از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره با حدود ۵ درصد رشد سالیانه به ۲۷۷/۸ میلیون تن برای گازهای گلخانه‌ای و ۱۷۵ هزار تن برای گازهای آلاند در پایان دوره شیوه سازی خواهد رسید. با فرض افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸ درصد، میزان انتشار آلاند ها با ۱۱ درصد رشد سالیانه به ۳۶۰

میلیون تن در پایان دوره شیه سازی خواهد رسید که از این مقدار $359/8$ میلیون تن سهم گازهای گلخانه‌ای و 227 هزار تن سهم گازهای آلاینده خواهد بود.

در مرحله اول اجرای این قانون قیمت گاز تحویلی به نیروگاهها از $49/4$ ریال در هر متر مکعب به 700 ریال در هر متر مکعب افزایش یافته است. قیمت گازوئیل و نفت کوره نیز به ترتیب از $59/18$ و $30/6$ ریال بر هر لیتر به 2500 و 800 ریال برای هر لیتر افزایش یافته است.

نتایج مدل در پایان دوره شیه سازی نشان می‌دهد با حفظ رشد اقتصادی $5/4$ درصد، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و آلاینده از 156 میلیون تن در ابتدای دوره شیه سازی به $261/6$ میلیون تن افزایش خواهد یافت که نسبت به دوره مشابه در صورت عدم اجرای طرح تحول اقتصادی، با کاهش نرخ رشد سالیانه حدود ۱ درصدی همراه خواهد بود. از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای $16/4$ میلیون تن و گازهای آلاینده $10/3$ هزار تن در سال پایانی دوره شیه سازی خواهد بود.

طبعاً یکی از پارامترهای مهم در پیش‌بینی تولید برق و به طبع آن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده، نرخ رشد اقتصادی است. در تحلیل سیاستی اولیه نرخ رشد اقتصادی در دوره پیش‌بینی برابر با متوسط نرخ رشد ده سال گذشته ($5/4$ درصد) فرض شد. حال می‌توان اثرات افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۱ درصد، نرخ رشد هدفگذاری شده در قانون برنامه پنجم توسعه (۱۳۹۴-۱۳۹۰)، را بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده بررسی کرد. نتایج اجرای مدل نشان می‌دهد متوسط نرخ رشد انتشار آلاینده‌ها در پایان دوره با $10/6$ درصد رشد سالیانه در مقایسه با پیش از اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، به $322/3$ میلیون تن خواهد رسید و نسبت به حفظ نرخ رشد 5 درصدی بعد از اصلاح قیمت سوخت حدود 4 درصد (معادل 62 میلیون تن گازهای آلاینده و گلخانه‌ای) افزایش رشد سالیانه را نشان می‌دهد. از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای $37/7$ میلیون تن و گازهای آلاینده $23/8$ هزار تن در سال پایانی دوره شیه سازی خواهد بود. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود نرخ رشد اقتصادی به دلیل افزایش تولید انرژی الکتریکی، تاثیر بسیاری بر تولید نیروگاه‌ها و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای و گازهای آلاینده خواهد داشت. خلاصه نتایج مدل برای سال‌های پایانی دوره شیه سازی (۱۳۹۸) در جدول‌های (۳) و (۴) آمده است.

بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاهها بر ... ۲۱۳

جدول ۳. اثرات افزایش قیمت سوخت نیروگاهها بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۱۳۹۸

رشد اقتصادی ٪/۸ با متوسط راندمان ٪/۴۵	رشد اقتصادی ٪/۸ با متوسط راندمان ٪/۳۸	رشد اقتصادی ٪/۵ با متوسط راندمان ٪/۴۵	رشد اقتصادی ٪/۵ با متوسط راندمان ٪/۳۸	واحد	
۳۵۴/۳	۳۵۹/۸	۲۷۹/۸	۲۷۷/۸	میلیون تن در سال	میزان انتشار بدون تعدیل قیمت
۳۲۲/۵	۳۲۲/۱	۲۶۱/۷	۲۶۱/۴	میلیون تن در سال	میزان انتشار پس از تعدیل قیمت
۳۰/۸	۳۷/۷	۱۸/۱	۱۶/۴	میلیون تن در سال	کاهش انتشار در اثر افزایش قیمت سوخت نیروگاهی

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

جدول ۴. اثرات افزایش قیمت سوخت نیروگاهها بر کاهش انتشار گازهای آلاینده در سال ۱۳۹۸

رشد اقتصادی ٪/۸ با متوسط راندمان ٪/۴۵	رشد اقتصادی ٪/۸ با متوسط راندمان ٪/۳۸	رشد اقتصادی ٪/۵ با متوسط راندمان ٪/۴۵	رشد اقتصادی ٪/۵ با متوسط راندمان ٪/۳۸	واحد	در سال ۹۸
۲۲۳/۴	۲۲۶/۸	۱۷۶/۴	۱۷۵/۲	هزار تن در سال	میزان انتشار بدون تعدیل قیمت
۲۰۴	۲۰۳	۱۶۵	۱۶۴/۸	هزار تن در سال	میزان انتشار پس از تعدیل قیمت
۱۹/۴	۲۳/۸	۱۱/۴	۱۰/۳	هزار تن در سال	کاهش انتشار در اثر افزایش قیمت سوخت نیروگاهی

منبع: نتایج حاصل از اجرای مدل

۵. جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاهها بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و گازهای آلاینده با رویکرد پویایی سیستمی در یک بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۹-۱۳۹۸) می‌پردازیم. ابتدا به پیش‌بینی روند تولید نیروگاهی در صورت عدم اجرای طرح تحول

اقتصادی با قیمت دستوری و در چارچوب مدل میبردازیم. با توجه به نتایج مدل، پیش‌بینی می‌شود تولید کل شبکه از ۲۳۳ تراوات ساعت در ابتدای دوره با ۴ درصد رشد سالیانه به ۳۲۷ تراوات ساعت خواهد رسید. در این صورت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره با حدود ۵ درصد رشد سالیانه به $277/8$ میلیون تن برای گازهای گلخانه‌ای و ۱۷۵ هزار تن برای گازهای آلاینده در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید. با فرض افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸ درصد، میزان انتشار آلاینده‌ها با ۱۱ درصد رشد سالیانه به ۳۶۰ میلیون تن در پایان دوره شبیه سازی خواهد رسید که از این مقدار $359/8$ میلیون تن سهم گازهای گلخانه‌ای و ۲۲۷ هزار تن سهم گازهای آلاینده خواهد بود.

سپس میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده حاصل از فعالیت نیروگاه‌ها را در دوره مورد نظر با فرض اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها بر اساس قانون هدفمندی یارانه‌ها و افزایش راندمان نیروگاه هابررسی می‌کنیم. در مرحله اول اجرای این قانون قیمت گاز تحويلی به نیروگاه‌ها از $49/4$ در هر متر مکعب به 700 ریال در هر متر مکعب افزایش یافته است. قیمت گازوئیل و نفت کوره نیز به ترتیب از $59/18$ و $30/6$ ریال بر هر لیتر به 2500 و 800 ریال برای هر لیتر افزایش یافته است. در تحلیل سیاستی اول با حفظ رشد اقتصادی $5/4$ درصدی در یک بازه زمانی ده ساله، میزان تولید آلاینده‌های زیست محیطی از ۱۵۶ میلیون تن در ابتدای دوره شبیه سازی به 261 میلیون تن افزایش خواهد یافت که نسبت به دوره مشابه در صورت عدم اجرای طرح تحول اقتصادی، با کاهش نرخ رشد سالیانه همراه خواهد بود از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای $16/4$ میلیون تن و گازهای آلاینده $10/3$ هزار تن در سال پایانی دوره شبیه سازی خواهد بود. با افزایش نرخ رشد اقتصادی به ۸ درصد، نرخ رشد هدفگذاری شده در قانون برنامه پنجم توسعه -1394 ، متوسط نرخ رشد انتشار آلاینده‌ها در پایان دوره با $10/6$ درصد رشد سالیانه در مقایسه با پیش از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها به $322/3$ میلیون تن خواهد رسید و نسبت به حفظ نرخ رشد 5 درصدی بعد از اصلاح قیمت سوخت حدود 4 درصد (معادل 62 میلیون تن گازهای آلاینده و گلخانه‌ای) افزایش رشد سالیانه را نشان می‌دهد. از این میزان کاهش، سهم گازهای گلخانه‌ای $37/7$ میلیون تن و گازهای آلاینده $23/8$ هزار تن در سال پایانی دوره شبیه سازی خواهد بود. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود نرخ رشد اقتصادی به دلیل افزایش تولید انرژی

الکتریکی، تاثیر بسیاری بر تولید نیروگاهها و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای و گازهای آلاینده خواهد داشت.

منابع

الف- فارسی

۴۲ سال صنعت برق ایران در آئینه آمار (۱۳۸۷-۱۳۴۶) آمار تفصیلی صنعت برق ایران طی سالهای مختلف تراز نامه انرژی سالهای مختلف، وزارت نیرو. منظور، د. ، رضائی، ح. (۱۳۸۹). «پیش‌بینی تاثیر تغییر قیمت حامل‌های انرژی بر روند تقاضای انرژی الکتریکی با رویکرد پویایی سیستمی»، هشتمین همایش بین‌المللی انرژی، تهران

ب- انگلیسی

- <http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp>
<http://www.cbi.ir/page/2053.aspx>
<http://www.pep.moe.org.ir>
<http://www.tavanir.org.ir>
- Jäger, T., Schmidt, S., Karl, U. (2009). "A system dynamics model for the German electricity market – model development and application". 27th International Conference of the System Dynamics Society, Albuquerque, New Mexico, July 26 – 30.
- Manzoor, D., et al. (2009). "An analysis of energy price reform: A CGE approach", *Gas* 7(600): 85.71
- Schmitz, S. (2001). "Do Energy Prices Induce Progress in Energy-Related Technology? An Empirical Study", Discussion Paper Series 26224, Hamburg Institute of International Economics
- Sterman J. D. (2006). *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Vogstad, K. (2005). A system dynamics analysis of the Nordic electricity market : The transition from fossil fuelled toward a renewable electricity supply within a liberalized electricity market. PhD thesis 2005:15, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.