

انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی انرژی

پروژه درس تحلیل سیستم‌های انرژی

## موضوع

# انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

استاد راهنما

دکتر عباس رجبی

گردآوری

کیان ابتکار

امیرحسین باقرزاده

تاریخ

بهمن ۱۴۰۰

چکیده

درک روبرو و تعاملات انقلاب صنعتی چهارم<sup>۱</sup> و پایداری موضوعی تحقیقاتی و پیچیده می‌باشد. در این پروژه سعی بر این است که چگونگی و روش‌های کمک انقلاب صنعتی چهارم در پایداری انرژی توضیح داده شود. در واقع این‌بخش یک بررسی کیفی و مرور ادبیات انقلاب صنعتی چهارم و شناسایی نحوه کارکرد پایداری انرژی اولیه است. همچنین از تکنیک مدل‌سازی ساختاری تفسیری به عنوان بیان و ترسیم روابط بین توابع مختلف پایداری انرژی استفاده می‌شود. با توسعه مدل تفسیری و تجزیه و تحلیل آن درک بهتری نسبت به تعاملات انقلاب صنعتی چهارم و پایداری انرژی شکل گرفت. سپس مبحث پایداری در تولید در انقلاب صنعتی چهارم بررسی می‌شود. بعد از آن دو مورد مطالعاتی پتروشیمی‌های کوچک مقیاس تولید کربن‌قلیایی و پنل‌های خورشیدی با راندمان بالا مورد تحلیل قرار می‌گیرد و در نهایت توضیحات مختصری در رابطه با انقلاب صنعتی پنجم ارائه خواهد شد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که انقلاب صنعتی چهارم و پایداری انرژی را بوسیله یک سازکار پیچیده مرتبط به یکدیگر بهبود می‌بخشد. برخلاف باور عمومی افزایش بهره‌وری در تولید به وسیله دیجیتالی شدن صنعت تولید، مهم‌ترین نتیجه تحول صنعتی دیجیتال در بهره‌وری نیست. انقلاب صنعتی چهارم در درجه اول به پایداری انرژی کمک می‌کند و صنعت انرژی را قادر می‌سازد تا دورنمای عملیاتی خود را تغییر دهد و از تجهیزات تولید و توزیع انرژی هوشمندتر و پیچیده‌تر استفاده کند. دیجیتالی شدن بخش تقاضای انرژی و صنعت تولید و معرفی محصولات هوشمندتر و پایدارتر از جمله فرصت‌های اصلی انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی است. به طور کلی، مطالعه و مدل<sup>۲</sup> ISM پایداری انرژی توسعه‌یافته توضیح می‌دهد که چگونه انقلاب صنعتی چهارم از طریق عملکردهای مختلف به پایداری انرژی کمک می‌کند و چگونه هر عملکرد بر اساس قدرت محرک و وابستگی آن در مدل ساختاری قرار می‌گیرد.

**کلمات کلیدی:** انقلاب صنعتی چهارم، پایداری انرژی، مدل‌سازی ساختاری

---

1 . Industry 4.0

2. Interpretive Structural Modelling

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول مقدمه .....	۱
فصل دوم پایداری انرژی .....	۱۳
فصل سوم پایداری در تولید .....	۳۱
فصل چهارم نمونه‌های مطالعاتی .....	۴۲
فصل پنجم انقلاب صنعتی پنجم .....	۴۸
فصل ششم نتیجه‌گیری .....	۵۲
ABSTRACT .....	۶۰

فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول 1 .....	۳۷

شکل ۱ : شماتیکی از معماری انقلاب صنعتی چهارم .....	۱۸
شکل ۲: مراحل اجرای روش ISM .....	۲۰
شکل ۳: مدل ساختاری انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی .....	۲۶
شکل ۴: تجزیه و تحلیل قدرت اجرا و وابستگی .....	۲۸
شکل ۵: رابطه بین تنوع و حجم .....	۳۴
شکل ۶: کارخانه تولیدی .....	۳۵
شکل ۷: مراحل تولید .....	۴۰
شکل ۸ : انقلاب صنعتی پنجم .....	۵۰

# فصل اول

## مقدمه

توسعه سریع و بی‌سابقه در زمینه‌های اینترنت اشیا، تحلیل داده‌های بزرگ، رباتیک، تکنولوژی بلاکچین، سنسورها، واقعیت افزوده و تکنولوژی‌های تسریع ساخت نمونه‌های اولیه در حوزه صنعت به انقلاب صنعتی چهارم یا صنعت ۴ مشهور شده است و توجه زیادی را به خود جلب کرده است. انقلاب صنعتی چهارم می‌تواند باعث تحول در انتقال، تولید و مصرف کالاها؛ ایجاد مدل‌ها و سرویس‌ها و رفتارهای تجاری جدید شود. این درحالی است که انقلاب صنعتی چهارم می‌تواند اثراتی نامشخص بر وضع تغییرات اقلیمی، امنیت غذایی، عدم دسترسی به انرژی، کمبود آب، نابودی محیط زیست، کاهش گونه‌های حیوانی یا گیاهی داشته باشد یا بر روندهای کلانی مانند رشد جمعیت، نرخ شهرنشینی، میزان مهاجرت جمعی و منازعات جهانی تأثیری نامشخص بگذارد.

در ماه سپتامبر سال ۲۰۱۵ بخش توسعه پایدار سازمان ملل متحد دستورکار<sup>۱</sup> ۲۰۳۰ را ارائه کرد و ۱۷ هدف را برای توسعه پایدار برشمرد که به اهداف توسعه پایدار نیز شهرت دارند (SDGs). همچنین ۱۶۹ هدف مشخص دیگر نیز در زمینه‌های کلیدی توسعه مانند فقر، آب، انرژی، تحصیلات، برابری جنسیتی، اقتصادی، گوناگونی زیستی، فعالیت اقلیمی، و ... تعریف نمود. انقلاب صنعتی چهارم و انرژی می‌تواند باعث ارضای اهداف هفتم و نهم و سیزدهم از اهداف توسعه پایدار شود.

هدف هفتم (SDG7)، تأمین انرژی پاک، ارزان، قابل اطمینان، پایدار و مدرن برای همه‌ی مردم دنیا تا سال ۲۰۳۰ است که این امر با افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی و ارتقاء کارایی مصرف کنندگان انرژی امکان‌پذیر است. همچنین توسعه زیرساخت‌ها و سرویس‌های انرژی پایدار از اهداف SDG7 برای کشورهای در حال توسعه<sup>۳</sup> با تمرکز بر کشورهای کمتر توسعه یافته، جزایر کوچک در حال توسعه و کشورهای بدون دسترسی به آب‌های آزاد در حال توسعه می‌باشد.

هدف نهم (SDG9) به صنعت، نوآوری و زیرساخت‌ها می‌پردازد. در این هدف درمورد ارتقای صنایع چند ملیتی پایدار، افزایش استخدام نیرو و افزایش سهم درآمد ملی از تولیدات صنایع، بحث شده است. همچنین در SDG9 بر افزایش ارتباطات و اطلاعات در کشورهای کمتر توسعه یافته تا سال ۲۰۲۰ تأکید دارد.

هدف سیزدهم (SDG13) به فعالیت اقلیمی اختصاص داده شده است. این هدف با قرارداد پاریس؛ که در ۴ نوامبر ۲۰۱۶ انعقاد شد، رابطه بسیار تنگاتنگ دارد و هدف آن افزایش تلاش برای کاهش تغییرات اقلیمی و سازگاری با پیامدهای آن است.

---

<sup>۱</sup>Agenda

<sup>۲</sup>Sustainable Development Goals

<sup>۳</sup>Developing countries



## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

در بخش دوم این گزارش مروری بر انقلاب صنعتی چهارم صورت گرفته است. در بخش سوم انرژی پایدار توضیح داده شده است و در بخش چهارم مبانی دو بخش قبل با یکدیگر اقدام شده‌اند. در بخش پنجم تأثیر ترکیب انقلاب صنعتی چهارم و انرژی پایدار در کشورها بر اساس میزان صنعتی بودن کشورها بررسی شده است. در پایان خدمات سازمان توسعه صنعتی ملل متحد در زمینه انقلابی صنعتی چهارم و انرژی توضیح داده شده است.

برای فهم بهتر انقلاب صنعتی چهارم لازم است که ابتدا سه انقلاب صنعتی قبل از آن را مورد بررسی قرار دهیم.

### انقلاب صنعتی اول

اولین انقلاب صنعتی در قرن هجدهم و با جایگزین موتورهای بخار با نیروی انسانی، شکل گرفت. کارهای تکراری که کارکنان صنایع مجبور به انجام آن‌ها بودند، اکنون توسط ماشین‌ها انجام می‌شد. این امر باعث افزایش بهره‌وری صنایع و کاهش هزینه تمام شده محصولات شد. در نتیجه آن، استانداردهای زندگی افراد نیز افزایش پیدا کرد و باعث گسترش شهرهای مجاور صنایع شد. موتورهای بخار همچنین باعث توسعه‌ی صنعت چاپ و راه آهن شد که باعث افزایش سرعت انتقال اطلاعات بود.

### انقلاب صنعتی دوم

انقلاب صنعتی دوم در اواخر قرن نوزدهم و با معرفی خطوط خطی مونتاژ که محرک آن انرژی الکتریکی به دست آمده از نفت و گاز بود، رخ داد. این امر باعث افزایش بیشتر کارایی صنایع و تولید در مقیاس بزرگ شد.

### انقلاب صنعتی سوم

با بکارگیری ادوات الکترونیکی، تکنولوژی‌های اطلاعات و ارتباطات گسترش چشمگیری پیدا کردند که در صنعت باعث ایجاد فرصت‌های جدیدی در اتوماسیون و مهندسی شد. با استفاده از این قابلیت و افزایش بهره‌وری صنایع، انقلاب صنعتی سوم شکل گرفت.

### انقلاب جدیدی در راه است

ردپای انقلاب صنعتی چهارم با مشاهده‌ی ادغام دنیای فیزیکی تولید صنعتی و دنیای تکنولوژی ارتباطات دیجیتال قابل رؤیت شد. سیستم سایبرفیزیکی سیستمی است که از اتصال تولید صنعتی و دنیای دیجیتال آن بوجود می‌آید. سیستم‌های سایبرفیزیکی در مناطق مختلف با نام‌های مختلفی شناخته می‌شوند. در آلمان

برای اولین بار اصطلاح "صنعت ۴.۰"<sup>۱</sup> و در آمریکا نام های اینترنت اشیا صنعتی (IIOT)، تولید پیشرفته<sup>۳</sup> یا تولید دیجیتال<sup>۴</sup> برای سیستم های سایبرفیزیکی بکار گرفته شد.

در آینده زنجیره عرضه پیوسته و تولید صنعتی دیجیتال باعث اتصال کارگران، اجزای ماشین ها، مواد، تولیدات و حتی آمایش<sup>۵</sup> به یکدیگر با نرخ تبادل اطلاعات بالایی خواهد شد. هر شیء دارای یک مشخصه دیجیتال، سنسور و عملگر خواهد بود تا بتواند به طور هوشمندانه ای ارتباط برقرار کند. بنابراین محصولات تولیدی با اجزای تولید در تعامل خواهند بود تا الگوریتم بهینه تولید اعمال گردد و در صورتی که خرابی در خط تولید پیش آمد، به طور هوشمند راه جایگزین دیگری برای تولید پیدا کنند تا تولید متوقف نشود. بنابراین کارخانه ها توسط خود اداره می شوند و می توان تنوع محصولات را مطابق ذائقه و میل مشتری گسترش داد. برخی از فرصت های تولید که با تولید هوشمند قابل دستیابی هستند، عبارتند از

- ساخت محصولات سفارشی با قیمت به صرفه به علت انعطاف بیشتر در تولید، بطوری که محصولات سفارشی سازه شده اختلاف قیمت چندانی با محصولات تولید انبوه نخواهند داشت.
- با توجه به افزایش داده ها می توان مدل های تجاری جدیدی به وجود آورد که محصول را از زمان تولید تا مصرف و بعد تا بازیافت (در تمام طول عمر محصول) مدل کنند.
- بیشترین تأثیر بر بخش آمایش خواهد بود، این بخش ها عبارتند از حمل و نقل برقی، رانندگی خودکار، انبار سازی خودکار.

انقلاب صنعتی چهارم در حال حاضر نقل مجالس است، تا جایی که در نشست G20 سال ۲۰۱۷ با تیکه بر مقوله هایی چون ساخت و بکارگیری استانداردها و نرم های مشترک، محافظت از اطلاعات شخصی، شفافیت، فرصت های کشورهای در حال توسعه، خطرات احتمالی ناشی از تکنولوژی های دیجیتال و اختراعات در باب انقلاب صنعتی چهارم بحث شد.

### چالش های انقلاب صنعتی چهارم

مزیت های اقتصادی و صنعتی انقلاب صنعتی چهارم بدون توجه به چالش های پیش روی این تحول ممکن نیست. کشورهای صنعتی بر روی این سؤال متمرکز شده اند که دیجیتالی شدن صنعت، چگونه آینده کار را تحت تأثیر قرار می دهد که منظور نه تنها کیفیت و تعداد شغل ها است بلکه، رابطه کاری بین ماشین ها

<sup>۱</sup>Industry 4.0

<sup>۲</sup>Industrial IOT

<sup>۳</sup>Advanced Manufacturing

<sup>۴</sup>Digital Manufacturing

<sup>۵</sup>Logistics

و انسان‌ها به چه صورتی خواهد بود. به عنوان مثال اگر انسان‌ها بخواهند از تک تک دستورات ماشین‌ها پیروی کنند، درک کامل فرآیند ممکن نخواهد بود که این موضوع می‌تواند به سردرگمی و ترس بیانجامد.

ممکن است که صنعتی شدن به کاهش اشتغال نیانجامد و حتی برعکس، باعث اشتغال بیشتر شود، اما باید در نظر داشت که در بعضی موارد این شغل‌های جدید لزوماً اثرات مثبتی بر زندگی افراد ندارد. برای مثال در انقلاب صنعتی سوم و با گسترش کاربران اینترنت شغلی جدید به عنوان ناظران محتوای تبلیغاتی<sup>۱</sup> بوجود آمد (۳۸). وظیفه این افراد بررسی محتوای آپلود شده توسط کاربران در سایت‌ها می‌باشد تا از مناسب بودن آن‌ها اطمینان حاصل کنند. به همین دلیل این اشخاص معمولاً به دلیل مواجهه با صحنه‌های ناخوشایند در فضای وب مانند خشونت، تعرض جنسی و ... از نظر روانی مورد آسیب قرار می‌گیرند (۳۹). دیگر چالش‌های دیجیتال سازی صنعت عبارتند از :

- تقاضای منابع : تمامی ابزارهای دیجیتال از سخت افزارهایی به وجود آمده‌اند که نیازمند مواد اولیه برای تولید آنها هستیم.
- امنیت اطلاعات و حریم شخصی : یکی از نگرانی‌های اکثر شرکت‌ها با حرکت به سوی دیجیتال سازی، مورد حمله قرار گرفتن اطلاعات آن‌ها توسط هکرها می‌باشد. همچنین موردی که کمتر بیان شده است، حفظ حریم شخصی کارکنان است که روزانه در حال کار با تجهیزات دیجیتالی شده هستند و رفتار آن‌ها با استفاده از این ابزارها قابل تشخیص می‌شود.
- عدم کفایت دولت‌ها : دیجیتالی سازی نتیجه‌ی تأثیرات اقتصادی است و باعث رشد سریع اقتصادی نیز می‌شود. از طرفی این سرعت رشد از سرعت سیاستگذاران و قانون‌گزاران در این عرصه بیشتر است که باعث کم اثر شدن سیاستگذاری در مقابل خطرات جانبی دیجیتالی شدن صنعت در مواردی مانند امنیت اطلاعات، حقوق کارکنان و شرایط و محیط می‌شود.
- مسابقه نوآوری : رشد سریع و سرعت روز افزون دیجیتال سازی و ارتقاء تکنولوژی می‌تواند منجر به برتری پیشگامان این عرصه شود. در این صورت، چند شرکت یا چند کشور پیش‌تاز در تکنولوژی دیجیتال تأثیر اقتصادی بیشتری در صحنه بین‌المللی خواهند داشت و در صورتی که قوانین محکمی وجود نداشته باشد، می‌توانند به سادگی از استانداردهای زیست محیطی و اجتماعی تخطی کنند.
- عمیق تر شدن نابرابری در دنیا : پیرو نکته قبل، نابرابری توسعه اقتصادی میان کشورهای صنعتی شده، کشورهای در حال توسعه و کشورهای کمتر توسعه یافته عمیق تر خواهد شد.

---

<sup>۱</sup>Commercial Content Moderation (CCM)

دو عنصر اصلی سازنده مفهوم انرژی پایدار، انرژی‌ها تجدیدپذیر و کارآیی انرژی می‌باشند که نقش مهمی در کاهش آلاینده‌گی و توسعه پایدار دارند (۴۰). در ادامه به توضیح این عناصر می‌پردازیم.

بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت با چالش‌هایی همراه است. شبکه‌هایی که قبلاً توسط چند نیروگاه احتراقی به صورت متمرکز تغذیه می‌شدند، هم اکنون باید توسط چندین نیروگاه غیر متمرکز تأمین شوند، که این امر از پیچیدگی بالایی برخوردار است. در این موضوع نیز دیجیتال سازی می‌تواند در برابر پیچیدگی ایجاد شده، شبکه را یاری کند (۴۱).

### کارآیی انرژی

بخش صنعتی مصرف کننده حدود یک سوم انرژی نهایی است و ۴۰٪ از آلاینده ناشی از انرژی را تولید می‌کند. در سال ۲۰۰۹ آژانس بین المللی انرژی بیان کرد که انرژی مصرفی صنایع از ۱۳٪ الی ۲۹٪ با کاهش مصرف انرژی در ۵ صنعت انرژی بر شامل، صنایع پتروشیمی، صنایع آهن و فولاد، سیمان، کاغذسازی و آلومینیوم، قابل کاهش است.

### چرا دیجیتالی سازی و انرژی پایداری دو مبحث پیوسته به یکدیگر هستند؟

شبکه‌های انتقال قدرت برای تأمین نیاز مشتریان خود من جمله مشتریان صنعتی باید از مصرف حدودی آنها آگاه باشند. با توجه به این موضوع دیجیتالی سازی صنایع باعث تشخیص هوشمند مصرف انرژی الکتریکی صنایع می‌شود و می‌تواند اطلاعات دقیق تری در اختیار تأمین کنندگان انرژی قرار دهد تا پایداری شبکه راحت تر حفظ شود. این مورد تنها یک مورد از موارد کاربرد دیجیتال سازی در راستای رسیدن به هدف هدف انرژی پایدار است.

انرژی پایدار و انقلاب صنعتی دو تغییر همزمان و پیوسته به یکدیگر هستند اما از نظر سیاسی هنوز ادغام نشده‌اند ضمن اینکه این دو تغییر دارای ویژگی‌های مشترکی هستند. هردو تحت تأثیر ابداعات، نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های جدید در حال شکل گیری هستند؛ وابسته به احداث زیرساخت‌های جدید و شکل گرفتن قوانین جدید می‌باشند و هردو تغییر پتانسیل زیادی در ایجاد مدل‌های جدید تجاری دارند. پس ادغام کردن این دو سیستم زیر سایه اهداف توسعه پایدار می‌تواند منجر به برآوردن اهدافی در زمینه انرژی، آب و هوا و موارد دیگر شود. اما اگر با این دو سیستم توأم برخورد نشود ممکن است راهکارهایی توسط صنایع یا تولید کنندگان انرژی در پیش گرفته شود که منجر به صدمه به محیط زیست یا ایجاد فقر گردد.

### دیجیتالی سازی بخش انرژی

عوامل اصلی حرکت بخش انرژی به سمت دیجیتالی سازی، پیشرفت تکنولوژی‌های ارتباطات و اطلاعات؛ مانند دسترسی عمومی به اینترنت و گوشی‌های هوشمند، و توسعه شبکه‌های بلاکچین می‌باشد.

تکنولوژی‌های دیجیتالی راهکارهایی برای ادغام منابع تجدیدپذیر با شبکه‌های بزرگ و کوچک را ارائه می‌دهند. برای مثال می‌توان به شبکه‌های هوشمند<sup>۱</sup> اشاره کرد. شبکه هوشمند اصطلاحی است که اشاره به استفاده از پتانسیل‌های تکنولوژی‌های ارتباطات و اطلاعات در پایش کارایی تولید، انتقال و مصرف برق از منابع مختلف (و پراکنده) برای عرضه انرژی به میزان تقاضا را دارد. اما موانع فنی و قانونی از یک سو و از سوی دیگر پیچیدگی شبکه‌های انتقال قدرت مانع شکل‌گیری شبکه‌های هوشمند از طریق ساز و کار بازار می‌شود.

راه کار دیگری که از کاربرد بحث دیجیتالی سازی در بخش انرژی ارائه می‌شود، نیروگاه‌های مجازی (VPP) می‌باشد. نیروگاه‌های مجازی مجموعه‌ای یکنواخت از منابع پراکنده انرژی متشکل از منابع تجدیدپذیر با توان متناوب، سیستم‌های ذخیره، بارهای انعطاف‌پذیر و نیروگاه‌های سنتی کوچک است که در صورت نیاز به این منابع جهت تأمین انرژی باید ارتباطی دو طرفه میان نیروگاه‌های مجازی و شبکه شکل بگیرد. نیروگاه‌های مجازی عموماً یک مرکز متمرکز یا پراکنده ابری کنترلی دارند و از تکنولوژی‌های اینترنت اشیاء بهره می‌برند. تحقیقات دانشمند آلمانی Korf نشان می‌دهد که ادغام منابع تولید انرژی تجدیدپذیر با نیروگاه‌های مجازی می‌تواند باعث بی‌نیازی انسان از انواع انرژی غیر تجدیدپذیر شود.

### کاهش مصرف انرژی در بخش تولید

یکی از مشخصات انقلاب صنعتی چهارم، دیجیتالی سازی فرآیند تولید است. این گذار باعث ایجاد فرصت‌هایی در کاهش انرژی مصرفی کارخانه‌ها می‌شود. یکی از تغییرات این گذار، قابلیت بکارگیری تکنولوژی‌های خاص در فرآیند تولید می‌باشد که باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود. به عنوان مثال کنترل رفتار یک گروه بزرگ از ربات‌های متصل به یکدیگر توسط الگوریتمی که مصرف انرژی آن‌ها را کاهش دهد یکی از مصادیق بهینه سازی یک تکنولوژی خاص است. در تحقیقی که Lennartson و Bengtsson انجام دادند، متوجه شدند که با کاهش شتاب‌گیری ربات‌ها در یک صنعت خاص بدون لطمه زدن به تولید می‌توان تا ۳۰٪ از مصرف انرژی جلوگیری کرد. همچنین می‌توان با استفاده از تکنولوژی‌های نمونه سازی سریع<sup>۲</sup> آجای استفاده از روش‌های قدیمی، مصرف انرژی را کاهش داد بدون اینکه از کیفیت محصول کاسته شود (حتی در

<sup>۱</sup>Smart grid

<sup>۲</sup>Virtual Power Plants

<sup>۳</sup>Rapid Prototyping

مواردی محصول خروجی شکل تر و زیبا تر نیز می‌شود). به همین ترتیب می‌توان یک فرآیند انرژی بر را به یک فرآیند مصرف کننده بهینه انرژی تغییر داد.

از دیگر تغییرات گذار دیجیتالی سازی، تأثیر آن بر شبکه‌های ارزش آفرینی است که باعث توانایی ارتباط مستقیم با مصرف کننده کالا می‌شود و می‌توان به سادگی تجربه کاربران را در تولید محصولات آینده به کار گرفت. به همین ترتیب سفارشی سازی تولیدات و حذف کردن قابلیت‌های غیر ملزوم محصولات از منظر تکنولوژی ممکن می‌شود و باعث صرفه جویی ددر مصرف انرژی و استفاده بهینه از منابع تولید می‌شود چراکه افزودن هر قابلیت به محصول تولیدی نیازمند انرژی و منابع بیشتری است. به عنوان مثال می‌توان برای افرادی که تنها در سطح شهر رفت و آمد دارند و شهر سطح صاف و همواری دارد، خوردویی با حذف دنده<sup>۱</sup> طراحی کرد.

### انرژی پایدار در بخش تولید

فرصت‌هایی برای ادغام مفهوم انرژی پایدار با کارخانه دیجیتالی در حال پیدایش است. در تمامی این موارد نیاز به وجود رابطه‌ای میان داده‌های کارخانه و سیستم انرژی جهت تشخیص میزان استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و یا قیمت انرژی در بازار می‌باشد تا از تعادل مصرف و تولید انرژی اطمینان حاصل شود.

یکی از این فرصت‌ها به عنوان مجموعه ذخیره ساز انرژی شناخته می‌شود. ظرفیت ذخیره سازهای انرژی یک عامل مهم برای سیستم‌های انرژی با تغییرات مداوم بار است که امنیت شبکه و انعطاف شبکه کمک می‌کند. همچنین ذخیره سازها به استفاده بهینه از زیرساخت‌های موجود کمک می‌کنند. برخی از صنایع که دارای ظرفیت‌های گرمایی بالایی هستند یا در فرآیندهای موجود در آن‌ها بخار تولید و انباشته می‌شود، می‌توانند از مفهوم توان به گرما<sup>۲</sup> جهت ذخیره انرژی بهره ببرند. برق به گرما به معنی ذخیره انرژی تولید شده مفید به گرما جهت حفظ ارزش آن و ذخیره سازی یا استفاده مستقیم از این گرما می‌باشد. از این روش می‌توان در مقیاس‌های کوچک تر مانند ذخیره انرژی در منازل نیز بهره برد.

همچنین فرصت ایجاد شده دیگر در این زمینه که به سرعت در حال فراگیر شدن در کشورهای اروپایی می‌باشد، مفهوم توان به گاز<sup>۳</sup> است که انرژی الکتریکی مازاد را به صورت گاز (عمدتاً هیدروژن یا متان) تبدیل کرده و ذخیره می‌کنند. به صورت کلی بازده روش توان به گرما بیشتر از روش توان به گاز می‌باشد اما روش توان به گاز دو ویژگی اصلی دارد. اول اینکه در مقادیر بیشتری قابل ذخیره است و دیگر اینکه گاز را می‌توان

---

<sup>۱</sup>Gearshift

<sup>۲</sup>Power-to-Heat

<sup>۳</sup>Power-to-Gas

مدت زمان بیشتری نسبت به گرما ذخیره کرد. توان به گاز در کارخانه‌هایی که مجهز به زیرساخت تولید هیدروژن هستند به راحتی قابل استفاده است.

پاسخگویی بار نیز یکی دیگر از فرصت‌های پیش رو است که مشکل انعطاف زمان مصرف انرژی را حل می‌کند و در همین راستا، از توان به گرما نیز به عنوان یک روش پاسخگویی به بار استفاده می‌شود. پاسخگویی بار شامل قطع بار، افزایش بار یا جابجایی بار شناخته می‌شود. در فرآیندهای انرژی بر صنایع که انعطاف زمانی دارند (مانند فرآیند الکترولیز) ترجیح داده می‌شود که برق در زمانی که ارزان تر است استفاده شود.

تمامی روش‌های ذکر شده در بالا می‌توانند به داشتن انرژی پایدار در بخش تولید منجر شوند. کشورهای پیشرفته مانند آلمان برای بهره یافتن از این فرصت‌ها برنامه‌های تحقیقاتی و آموزشی جهت حرکت به سوی انرژی پایدار را اجرا کرده. به طور خاص آلمان این برنامه را Kopernikus نامگذاری کرده است و در زمینه‌های سینرژی<sup>۱</sup> و توان به X<sup>۲</sup> در حال انجام تحقیقات است. سینرژی به معنی همگام سازی فرآیندهای صنعتی با تولید انرژی تجدید پذیر است و توان به X پروژه‌ای جهت امکان سنجی ذخیره توان به شکل‌های مختلف است.

### اینترنت اشیاء

این اصطلاح اولین بار در سال ۱۹۹۹ توسط Kevin Ashton استفاده شد. اینترنت اشیاء مفهومی است که نسل کنونی اینترنت را توصیف می‌کند. مطابق این تعریف، اطلاعات و داده‌های موجود در اینترنت دیگر تنها توسط انسان‌ها تولید و منتشر نمی‌شوند بلکه شبکه‌هایی متصل به هم از وسایل هوشمند که قادر به احساس محیط اطراف خود هستند، می‌توانند داده‌ها را پردازش کنند و ارتباط ماشین به ماشین دارند نیز در ورود داده به شبکه اینترنت نقش دارند (۴۱).

امروزه در زندگی روزمره شاهد این موضوع هستیم که اشیاء قادر به نظارت لحظه به لحظه بر داده‌های بدست آمده از سنسورها هستند و می‌توانند نیازهای مختلف را مانند نیاز به تعمیر قبل از رویداد هر اتفاقی را پیش بینی کنند و اطلاع رسانی کنند تا از هزینه‌های تحمیلی جلوگیری شود و کیفیت و امنیت افزایش پیدا کند.

### داده‌های بزرگ

داده‌های بزرگ بیانگر دسته‌ای از داده‌ها می‌باشد که حجم زیادی، انواع مختلف و سرعت تولید بالایی دارند (۴۲). با تحلیل پیشرفته آن‌ها می‌توان به اطلاعاتی کاربردی نظیر الگوها، روندها و روابط دست یافت (۴۳).

---

<sup>۱</sup>SynErgie

<sup>۲</sup>Power-to-X

داده‌های بزرگ نتیجه بکارگیری مداوم و روز افزون تکنولوژی و پلتفرم‌های دیجیتال جهت جمع آوری داده‌های مورد نظر است. تخمین زده می‌شود که در حال حاضر کمتر از ۱٪ از داده‌های جمع آوری شده، آنالیز می‌شوند (۴۴). داده‌های بزرگ می‌توانند روابط آماری مناسبی جهت تصمیم‌گیری بهتر در حوزه‌های اقتصادی، زیست محیطی یا اجتماعی را گردآوری کنند (۴۵).

### واقعیت افزوده

کاربرد این تکنولوژی را می‌توان در تعمیرات و بهره‌برداری دانست. فرض کنید که یک کارکن کم تجربه در محل وقوع خرابی یکی از ماشین آلات تولید حضور داشته باشد اما به سبب تجربه ناکافی توانایی عیب‌یابی ماشین مذکور را ندارد. در این موقع یک متخصص حرفه‌ای باید در محل حضور پیدا کند و ایراد را شناسایی کند. اما با تکنولوژی واقعیت افزوده نیازی به حضور فیزیکی متخصص و صرف هزینه‌های سفر و اقامت نیست. متخصص مذکور می‌تواند به صورت مجازی در محل حضور پیدا کند و به عیب‌یابی ماشین بپردازد و به کارکن به شکل دقیقی در تعمیرات کمک کند. این تکنولوژی می‌تواند به شرکت‌ها بخصوص شرکت‌های کوچک و استارت‌آپ‌ها جهت فروختن خدمات همراه کالا به صورت بین‌المللی، کمک کند.

### ریز شبکه‌ها

در حال حاضر بیشتر نیاز انرژی الکتریکی کشورهای در حال توسعه از طریق سوزاندن سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. در سال ۲۰۱۰ گرد هم آیی به اسم SE4ALL به میزبانی دبیر کل سابق سازمان ملل متحد تشکیل شد که هدف آن اطمینان از دسترسی جهانی به انرژی پاک و دو برابر کردن سهم انرژی پاک در عرضه با ادغام گذار انرژی و امنیت انرژی بود.

یکی از ارکان اصلی مطرح شده در این نشست، موضوع ریز شبکه‌ها بود. بنا به تعریف آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدید پذیر، ریز شبکه‌ها یا میکرو شبکه‌ها عبارت از منابع انرژی پراکنده (تولید کننده‌ها و ذخیره کننده‌ها) و بارهای متصل به یکدیگر هستند که یک زیرساخت انرژی را تشکیل می‌دهند و می‌توانند به صورت موازی با شبکه اصلی یا جدا از آن در حالت جزیره‌ای فعالیت کنند (۴۶). از ریز شبکه‌ها می‌توان در مکان‌های با تراکم جمعیت پایین، صعب‌العبور و دور از دسترس شبکه اصلی انتقال قدرت استفاده کرد. اما ریز شبکه‌ها با موانعی مانند عدم توجیه اقتصادی، قوانین و تعرفه‌های نامناسب، هزینه‌های بالا و عدم قطعیت در پایداری مواجه هستند که انتظار می‌رود به کمک تکنولوژی‌های دیجیتال این موانع رفع گردند (۴۷).

### بلاکچین

بلاکچین‌ها پایگاه‌های اطلاعاتی غیر متمرکز هستند که بر روی دستگاه‌های متعددی ذخیره شده‌اند به این ترتیب اعمال هرگونه تغییر در این پایگاه داده به صورت دائمی ذخیره می‌شود و به صورت عمومی در



اختیار همه قرار می‌گیرد (۴۸). انتظار می‌رود که بلاک چین ها تغییرات شگرفی در مقاوم بودن داده ها و شفاف سازی اطلاعات، ایجاد کنند. این تکنولوژی می‌تواند الزام وجود یک واسطه را در بسیاری از اعمال حذف کند. به عنوان مثال می‌توان این تکنولوژی را در بازارهای مالی جهت انجام تراکنش بدون نیاز به وجود بانک اشاره کرد. همچنین کاربرد های دیگر این تکنولوژی در بنیان گذاری پتنت‌ها، تأمین انرژی توسط انرژی تجدیدپذیر غیر متمرکز تأیید شده و تأیید مالکیت قانونی می‌باشد.

در مطالعه‌ای مسئولان اجرایی آلمان اعلام کرده اند که پتانسیل های زیادی برای استفاده از بلاکچین در انرژی وجود دارد (۴۹). این در حالی است که این تکنولوژی نوپا با مشکلات زیادی مانند مشکلات حریم شخصی و امنیت اطلاعات و مشکلات فنی مواجه است. اما در عین حال استارت آپ هایی مشغول کار بر روی این زمینه و بهبود آن هستند (۵۰).

### نمونه سازی سریع

نمونه سازی سریع، گروهی از تکنولوژی‌های مکمل یکدیگر مانند طراحی کامپیوتری<sup>۱</sup>، تولید لایه به لایه<sup>۲</sup> (لایه افزودنی) مانند چاپگر سه بعدی<sup>۳</sup> است که می‌توانند به سرعت نمونه یا بخشی از قطعات مورد نیاز را تولید کنند در حالی که به روش‌های قدیمی تولید نیاز به حذف یا افزودن زیربخش‌ها می‌باشد. با استفاده از این تکنولوژی، هزینه و زمان مورد نیاز تولید کاهش می‌یابد و علاوه بر این، می‌توان به راحتی تولید سفارشی انبوه داشت. همچنین باعث راحتی و سرعت بخشیدن به تست کردن طراحی‌های ابتکاری و نوآورانه می‌شود.

به عنوان مثال تکنولوژی چاپ سه بعدی به شرکت ژنرال الکتریک اجازه داده است که به جای استفاده از ۱۸ قسمت برای تولید قطعه نازل سوخت موتور LEAP تنها از یک قسمت استفاده کند که نه تنها عمر این قطعه را ۵ سال افزایش داده است و وزن آن ۲۵٪ کاهش پیدا کرده است، بلکه باعث افزایش توانایی احتراق موتور نیز شده است که باعث کاهش مصرف سوخت و تولید آلاینده CO<sub>2</sub> در طول عمر موتور شده است (۵۱).

---

<sup>۱</sup>Computer-Aided Design

<sup>۲</sup>Additive-layer manufacturing

<sup>۳</sup>3-D Printing



## فصل دوم

# پایداری انرژی

پایداری جنبه‌های متفاوتی دارد و پایداری انرژی مهم‌ترین نگرانی اجتماعی و محیطی عصر حاضر است (۱). سوخت‌های فسیلی منبع اصلی تولید انرژی در جهان می‌باشد و ۸۰ درصد از تولید انرژی به آن وابسته است که البته آثار زیست محیطی بسیار زیادی بر جای می‌گذارد (۲). افزایش روزافزون تقاضای انرژی در سراسر جهان به طور کلی باعث افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه آن منجر به ایجاد شرایط نامطلوبی مانند گرم شدن کره زمین، آلودگی هوا و تخریب زمین می‌شود (۳). از طرف دیگر و از منظر رفاه و پایداری اجتماعی و اقتصادی، ظرفیت و کارایی سیستم‌های انرژی و دسترسی گسترده به انرژی مقرون به صرفه، به ویژه برق، از مؤلفه‌های ضروری رفاه اجتماعی و اقتصادی است. کشورهایی که امنیت تامین انرژی بالاتر و شبکه‌های تحویل انرژی کارآمدتر و گسترده‌تری دارند در بخش توسعه ملی، بهبود رفاه انسانی و کاهش فقر موفق‌تر بوده‌اند (۱). در مجموع این نگرانی‌ها، به اهمیت مفهوم پایداری انرژی و نیاز به تامین منابع انرژی در دسترس‌تر، مقرون به صرفه‌تر، سازگار با محیط زیست و در عین حال افزایش بهره‌وری انرژی و حذف اتلاف انرژی کمک می‌کنند.

با توجه انقلاب صنعتی چهارم (Industry 4.0) همچنین تحول دیجیتال دنیای تجارت انتظار بر این است که فرصت‌های بسیار زیادی برای پایداری انرژی ارائه شود (۴).

انقلاب صنعتی چهارم به دیجیتالی کردن و ادغام زنجیره‌های ارزش صنعتی در کل آنها مربوط می‌شود. ظهور فناوری‌های دیجیتال مدرن مانند اینترنت صنعتی اشیاء (IIoT)، اینترنت افراد (IIoP)، اینترنت خدمات (IoS) و سیستم‌های تولید فیزیکی-سایبری (CPPS) و ادغام عمودی سیستم‌های تولید هوشمند و همچنین ادغام افقی اعضای زنجیره ارزش باعث ایجاد نسل جدیدی از مدل‌های کسب و کار و شبکه‌های جهانی ارزش آفرینی می‌شود (۵).

امروزه بسیاری از محققان و جوامع صنعتی به تفسیر ارتباط انقلاب صنعتی چهارم و پایداری انرژی مشغول هستند. تحول دیجیتالی مورد نیاز انقلاب صنعتی چهارم و کاربردهای دیگری مانند فناوری‌های دیجیتال مانند واقعیت افزوده (AR)، واقعیت مجازی (VR)، ساخت افزودنی‌ها، ربات‌ها، حسگرها و پوشیدنی‌های هوشمند،

---

۱ Industrial Internet of Things

۲ Internet of People

۳ Internet of Services

۴ Cyber-Physical Production Systems

۵ Augmented Reality

۶ Virtual Reality

دوقلوهای دیجیتال و رایانش ابری نیاز و تقاضای انرژی را انرژی را افزایش می‌دهند (۶). مهمتر از آن، رشد بازار فناوری اطلاعات و ارتباطات و ارائه بازارهای مصرفی با کالاهای مقرون به صرفه‌تر و هوشمندتر با چرخه عمر کوتاه‌تر به لطف ظهور انقلاب صنعتی چهارم انتظار می‌رود اثرات ایجاد کند که مصرف کلی منابع و انرژی را افزایش دهد (۷). از طرف دیگر محققان پیشنهاد می‌کنند که انقلاب صنعتی چهارم و تحول دیجیتال اساسی ممکن است به طور مثبت به پایداری انرژی کمک کند. معرفی و استفاده از فناوری‌های دیجیتالی انقلاب صنعتی چهارم می‌تواند دید بهتر و بازتری را در عملیات تولیدی ارائه دهد و استفاده بهتر از منابع و انرژی در سراسر شبکه‌های تولید و عرضه فراهم کند.

همچنین انقلاب صنعتی چهارم و تحول دیجیتال اساسی ممکن است به طور مثبت به پایداری انرژی کمک کند. (۵). برخی از محققان بر این باورند که انقلاب صنعتی دیجیتال علاوه بر حمایت از بهره‌وری انرژی، فرصت‌های بیشتر و گسترده‌ای را برای ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در کارخانه‌های هوشمند آینده ارائه می‌دهد. حتی مشارکت فناوری‌های دیجیتال مدرن مانند بلاک چین، هوش مصنوعی (AI)، تجزیه و تحلیل داده‌ها در صنعت انرژی و توسعه شبکه‌های انرژی ممکن است روش‌های کارآمدتر و نوآورانه‌تری ارائه دهند. رویکردهای استفاده از انرژی (۸).

به طور کلی، تحقیقات علمی در مورد پیامدهای پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم در مراحل ابتدایی خود قرار دارد و هنوز نیازمند تحقیقات گسترده می‌باشد. در گذشته توضیح سازکاری که از طریق آن بتوان مشخص کرد که چگونه فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم و دیجیتالی شدن صنایع می‌تواند پایداری انرژی را ممکن سازد و از کاربرد انرژی تجدیدپذیر نیز پشتیبانی کند به گزارش‌های تبلیغاتی صنعتی و گمانه زنی و فرضیات دانشگاهی محدود می‌شد اما با گسترش تحقیقات این شکاف تحقیقاتی به کمک مدل‌سازی ساختاری ارتباط عملکردهای انقلاب صنعتی چهارم و پایداری انرژی به شیوه‌ای قابل قبول علمی برطرف شده است. به این منظور، در مرحله اول شرح مختصری از انقلاب صنعتی چهارم، انقلاب صنعتی دیجیتال، و اصول طراحی و روندهای فناوری تحول دیجیتال صنایع ارائه می‌شود و سپس علاوه با کمک مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) برای ارائه یک روش جامع و سیستماتیک برای یکپارچه‌سازی قضاوت‌های کارشناسان و توسعه یک مدل ساختاری استفاده می‌شود و همچنین یک تجزیه و تحلیل نظری نموداری از عملکرد پایداری انرژی

---

! Artificial Intelligence

Industry4.0 ارائه خواهد شد. کاربرد روش ISM در این پروژه، به ترتیب، شامل ۳ بخش زیر می‌باشد که به ترتیب:

- I. یک بررسی محتوای محور پیشرفته از ادبیات مربوط به انجمن فن‌آوری‌ها/اصول انقلاب صنعتی چهارم و پایداری انرژی
  - II. به دست آوردن نظرات کارشناسان انقلاب صنعتی چهارم و پایداری انرژی
  - III. مدل‌سازی گراف-نظری توابع پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم
- و در نهایت، نتایج و یافته‌های روش ISM را توضیح داده می‌شود و پیامدها و نتایج پایداری انرژی در انتقال به صنعت دیجیتالی و همچنین بازار تقاضا و مصرف را مورد بحث قرار می‌دهد.

### پس زمینه انقلاب صنعتی چهارم

اصطلاح «انقلاب صنعتی چهارم»<sup>۱۰</sup> برای اولین بار در سال ۲۰۱۱ در نمایشگاه تجاری هانوفر مسه بیان شد و بلافاصله در کانون توجه دولت‌ها، دانشگاه‌ها و صنعتگران قرار گرفت. جوامع علمی و صنعتی، تا حدودی با ارائه مفهومی یکسان از انقلاب صنعتی چهارم با مشکل مواجه شده‌اند. این مسئله عمدتاً به ماهیت فرار انقلاب صنعتی چهارم و دامنه برمی‌گردد. در ابتدا این پدیده به عنوان اجرا و عملیاتی کردن نوآوری‌های جدید فناوری دیجیتال در صنعت تولید در نظر گرفته می‌شد (۹). با این وجود، انقلاب صنعتی چهارم بیشتر توسط صنعتگران به عنوان یک تغییر الگو در زنجیره ارزش صنعتی روایت می‌شد (۱۰). به طور خلاصه، انقلاب صنعتی چهارم را می‌توان به عنوان دگرگونی دیجیتالی زنجیره‌های ارزش صنعتی، از دیجیتالی شدن فرآیندهای تولید و ارزش آفرینی تا هوشمندسازی کارخانه‌ها، تامین کنندگان، مشتریان و کانال‌های توزیع تفسیر کرد (۱۱).

در مرور ادبیات انقلاب صنعتی چهارم بیشتر به این مورد اشاره دارد که این پدیده را بر اساس دو ویژگی اصلی آن، یعنی روندهای فناوری و اصول طراحی، تعریف کند (۱۲). مراحل فناوری انقلاب صنعتی چهارم بیشتر به اطلاعات و فناوری‌های دیجیتال (IDTs) اشاره دارد که به وسیله آن تحول صنعتی دیجیتال را امکان پذیر می‌شود، نمونه‌هایی از آن شامل حسگرهای صنعتی، رباتیک هوشمند، وسایل نقلیه هدایت خودکار، AR، VR، تجزیه و تحلیل داده‌ها، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا (IoT)، تولید افزودنی، و رایانش ابری و .... اکثر

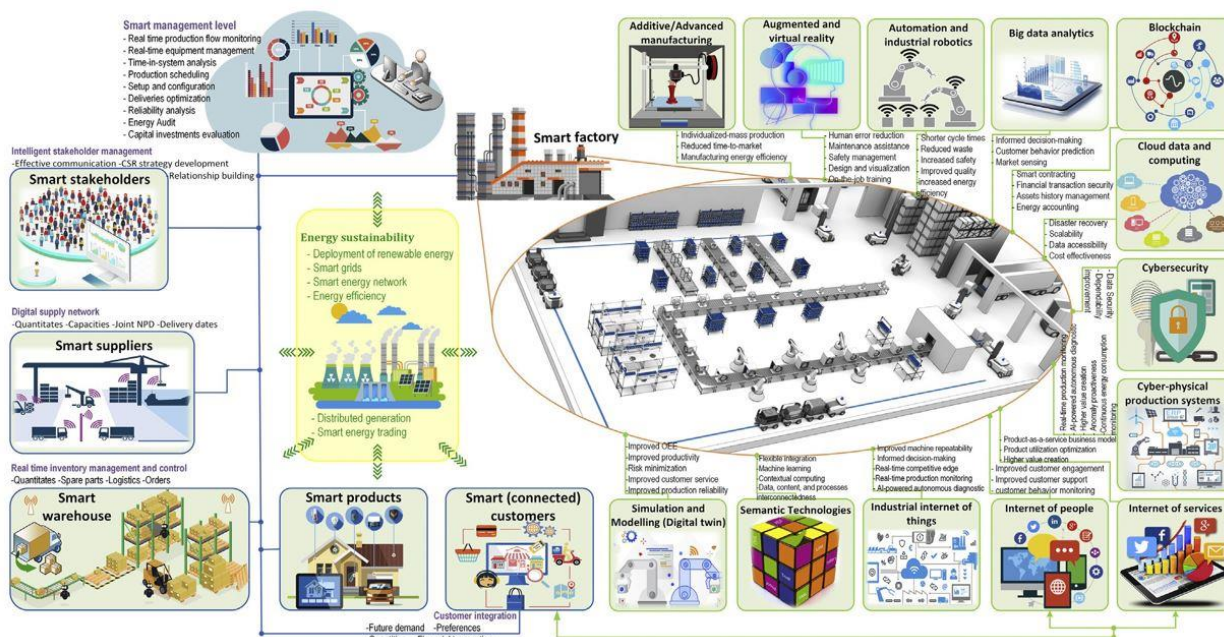
---

<sup>۱</sup> Hannover Messe

اطلاعات و فناوری‌های دیجیتال در چند دهه اخیر در دسترس بوده‌اند. با این حال، به تازگی به سطوح مطلوب بلوغ و یکپارچگی لازم برای کاربردهای صنعتی و تجاری کارآمد رسیده‌اند. ادغام انواع مختلف IDT، ماشین‌آلات، فرآیندهای شبکه، فناوری‌های عملیاتی و حتی اجزای انسانی، در مجموع منجر به ایجاد روندهای پیشرفته‌تر فناوری انقلاب صنعتی چهارم، از جمله IIoT، CPPS، و دوقلوهای دیجیتال می‌شود. در روش دیگر در بیان انقلاب صنعتی چهارم، اصول طراحی انقلاب صنعتی چهارم مجموعه‌ای از شرایط ضروری است که به واحدهای صنعتی اجازه می‌دهد از موفقیت تحول دیجیتال اطمینان حاصل کنند و به رقابتی که انقلاب صنعتی چهارم وعده داده است، دست یابند (۶). محققان علاوه بر شناسایی اصول طراحی صنعت ۴،۰ بینش‌های مختلفی را نیز ارائه می‌دهند. با این حال، اکثر تحقیقات قبلی ادغام عمودی، ادغام افقی، قابلیت همکاری، قابلیت بلادرنگ و تمرکززدایی را به عنوان اصول اساسی طراحی معرفی می‌کنند (۱۳).

شکل (۱) طراحی معماری انقلاب صنعتی چهارم را نشان می‌دهد که در آن ادغام عمودی به یکپارچه‌سازی و شبکه‌سازی اجزای مختلف یک سیستم تولید هوشمند مانند ماشین‌آلات تولید هوشمند، ابزارهای هوشمند، مواد هوشمند و محصولات هوشمند اشاره دارد (۸). ادغام افقی به ادغام سلسله‌مراتبی و شبکه‌سازی اعضای شبکه‌های ارزش آفرینی، از جمله تامین کنندگان، شرکای تجاری، کانال‌های تحویل و حتی مشتریان مربوط می‌شود. اصول ادغام عمودی و افقی حول اصل قابلیت همکاری انقلاب صنعتی چهارم متمرکز است (۱۴). منظور از قابلیت همکاری توانایی اجزای مختلف شبکه‌های ارزش مانند حسگرهای صنعتی، سیستم‌های کنترل، ماشین‌های هوشمند، تجهیزات هوشمند، محصولات هوشمند، سیستم‌های تصمیم‌گیری مدیریت و اجزای انسانی برای برقراری ارتباط با یکدیگر از طریق زیرساخت شبکه موجود می‌باشد. قابلیت همکاری، به نوبه خود، از اصل قابلیت بدون وقفه انقلاب صنعتی چهارم پشتیبانی می‌کند، که جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها و تشخیص الگو را در پشتیبانی از قابلیت تمرکززدایی در زمان واقعی امکان‌پذیر می‌سازد (۱۵). فعال کردن تصمیمات آگاهانه و در عین حال خودمختار یکی از اساسی‌ترین اهداف انقلاب صنعتی چهارم است زیرا فرصت‌های عظیمی برای چابکی و انعطاف‌پذیری عملیات مختلف ارائه می‌دهد. اصل طراحی تمرکززدایی تضمین می‌کند که اجزای مختلف هوشمند شبکه‌های ارزش، مانند کارخانه‌های هوشمند، تصمیمی آگاهانه اتخاذ می‌کنند و به طور مستقل و مستقل عمل می‌کنند در حالی که با اهداف استراتژیک کلی شبکه ارزش همسو می‌مانند (۱۴).

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی



شکل (۱): شماتیکی از معماری انقلاب صنعتی چهارم

ادبیات انقلاب صنعتی چهارم هنوز نوپا است، اما از نظر محتوا بسیار گسترده، ناهمگن و غنی است. یک جریان دیگر از تحقیقات سعی در شناسایی عواملی داشت که ممکن است اجرای فناوری‌های دیجیتال انقلاب صنعتی چهارم و فرآیندهای دیجیتالی‌سازی کلی را تسهیل سازد یا مانع از آن شود (۱۶). توسعه نظری به دست آمده در مراحل اولیه تحقیق در مورد پدیده انقلاب صنعتی چهارم به تحقیقات تجربی این اجازه را داد تا به ابعاد مختلف فرآیند انتقال انقلاب صنعتی چهارم در زمینه‌های مختلف دنیای واقعی بپردازد، نمونه‌هایی از آن شامل تولید سریع و ایجاد ارزش تجاری تحت تنظیمات و اصول انقلاب صنعتی چهارم می‌باشد. تعامل بین انقلاب دیجیتال و پایداری قطعاً از هیجان‌انگیزترین و پیشرفته‌ترین موضوع تحقیقاتی در رشته انقلاب صنعتی چهارم است که به فرصت‌ها یا چالش‌هایی می‌پردازد که انقلاب صنعتی چهارم ممکن است برای پایداری محیطی ارائه دهد (۱۷). علی‌رغم این مشارکت‌ها، درک فعلی از فرآیندی که از طریق آن انقلاب صنعتی چهارم و انقلاب صنعتی دیجیتال، پایداری انرژی را تسهیل می‌کنند، به‌طور قابل توجهی محدود است.

### ۳. پایداری انرژی

پایداری انرژی یک زمینه تحقیقاتی بسیار گسترده و پائیدار است. پایداری انرژی در این‌بخش به شرایط (سیستمی) مطلوبی اشاره دارد که در آن زیرسیستم‌های تولید و مصرف انرژی یک شبکه تحویل ارزش مؤثرترین و متعادل‌ترین ترکیبی از اثرات پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را ارائه می‌کنند (۱).



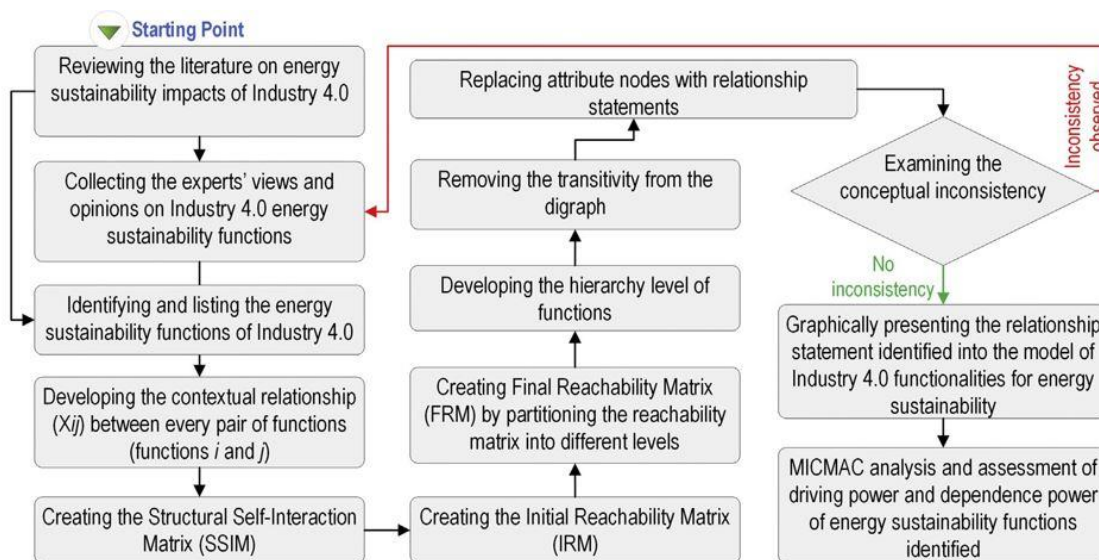
حوزه پایداری اقتصادی با حفظ سرمایه طبیعی و اجتماعی به رشد اقتصادی می‌پردازد. در این حوزه، تعادل در رشد اقتصادی، توزیع ثروت و حفاظت از منابع طبیعی را می‌توان با استفاده کارآمد، بازیافت و بازیابی منابع دنبال کرد (۱۴). در رابطه با حوزه اقتصادی پایداری انرژی، برخی از محققین معتقدند که مدیریت انرژی و بهره‌وری احتمالاً عملی‌ترین و از نظر فناوری قابل دوام‌ترین استراتژی است (۱۸). پایداری اجتماعی به توسعه ساختارها و فرآیندهایی برای شناسایی و تنظیم تأثیرات محرک‌های سازمانی، محیطی، فناوری و فرهنگی بر جوامع اجتماعی مربوط می‌شود، به گونه‌ای که مردم با امکانات اولیه دست و پنجه نرم نکنند، حقوق بشر جهانی داشته باشند، و از تبعیض محافظت می‌شوند. افزایش دسترسی به منابع انرژی قابل اعتماد و در عین حال پاک‌تر ویژگی اساسی جنبه توسعه اجتماعی پایداری انرژی است (۱۹). از سه جنبه پایداری انرژی، تأثیر پایداری زیست‌محیطی مسلماً برجسته‌ترین منبع الهام برای توسعه پایدار است (۲۰). پایداری زیست‌محیطی عمدتاً به یکپارچگی اکولوژیکی و تعادل در مصرف و تکمیل منابع طبیعی زمین اهمیت می‌دهد زیرا علیرغم پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌های مختلف پایداری زیست‌محیطی، اکثریت انرژی خام در جهان با مصرف غیر قابل تجدید و آلاینده تولید می‌شود (۱۷). امروزه اولویت دادن به بهره‌وری انرژی، نوآوری در فناوری انرژی و گسترش ترکیب انرژی پاک از جمله سیاست‌های اصلی برای توسعه حوزه زیست محیطی پایداری انرژی است (۲۱).

#### ۴. مدل‌سازی ساختاری توابع پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم

در این بخش مدل‌سازی ساختاری (ISM) با هدف دستیابی به هدف اصلی خود یعنی شناسایی توابع پایداری انرژی در انقلاب صنعتی چهارم و توضیح نحوه تعامل این توابع با یکدیگر پیاده‌سازی می‌شود. ISM یک روش تصمیم‌گیری مبتنی بر مقایسه زوجی است که ارزیابی نظری گراف موضوعات پیچیده و سیستم‌های زیست محیطی چندوجهی را ارائه می‌دهد (۲۲). روش ISM مزیت‌ها و کاربردهای مختلفی را شامل می‌شود که عبارتند از (۲۳):

- ISM استخراج روابط متقابل مفهومی بین متغیرهای مختلف یک پدیده خاص را بر اساس اطلاعات نظری، ذهنی، محاسباتی و حتی حکایتی موجود امکان‌پذیر می‌سازد.

- ISM روشی پویا و در عین حال سیستماتیک برای به دست آوردن قضاوت‌ها، ایده‌ها و نظرات کارشناسان در مورد یک پدیده مورد علاقه ارائه می‌دهد، در حالی که کارشناسان را قادر می‌سازد در صورت لزوم، ورودی‌های خود را تجدید نظر کنند.
  - قابلیت ارزیابی تئوری گراف ISM امکان توسعه مدل‌های بصری معنادار و قابل درک بر اساس روابط پیچیده شناسایی شده بین متغیرهای یک پدیده خاص را فراهم می‌کند.
- مرور ادبیات همچنین این قضیه را نشان می‌دهد که ISM یک روش محبوب برای مدل‌سازی روابط علی و ایجاد نظریه در رشته‌های مدیریت عملیات و پایداری بوده است. به عنوان مثال، محققان، ISM را برای مدل‌سازی پایداری مرتبط با زیست توده، توسعه زنجیره تامین پایدار و تولید پایدار (۲۳) اجرا کردند. اجرای ISM در این پروژه، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مراحل را دنبال می‌کند که به طور گسترده در ادبیات ISM پذیرفته شده است (۲۴).



شکل (۲): مراحل اجرای روش ISM

#### ۴-۲. اثرات پایداری انرژی صنعت ۴،۰

کاربرد روش‌شناسی ISM در درجه اول بر شناسایی عوامل حیاتی یک پدیده خاص از طریق مرور با ادبیات موجود است. در این‌بخش مراحل ارائه شده در شکل ۳ با هدف شناسایی نحوه عملکرد پایداری انرژی در انقلاب صنعتی چهارم از طریق یک بررسی دقیق و جامع محتوا محور ادبیات انقلاب صنعتی چهارم اجرا کرد.

در انجام مرور ادبیات، شباهت‌ها و تفاوت‌ها را در عملکردهای پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم شناسایی شده‌اند. با ارزیابی آن در ابتدا فهرستی از ۹ عملکرد پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم را شناسایی شده است.

در نهایت مرور ادبیات منجر به شناسایی ده عملکرد مختلف انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی می‌شود که شامل دیجیتالی‌سازی بخش تقاضای انرژی (EDSD)، تحول دیجیتالی بخش انرژی (EST)، روش‌های بهبود یافته تولید (IMP)، بهبود مدیریت تولید (IPM) شد. برنامه‌ریزی و کنترل تولید بهبود یافته (IPPC)، تصمیم‌گیری آگاهانه (IDM)، نوآوری مدل کسب و کار جدید (NBMI)، سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند (SEMS)، توسعه پایدار محصول جدید (SNPD)، و دیجیتالی شدن زنجیره ارزش (VCD). جدول (۱) اهمیت این توابع پایداری انرژی را توضیح می‌دهد. همچنین در ادامه توضیح مختصری از هر یک از ده عملکرد پایداری انرژی شناسایی شده ارائه می‌شود.

دیجیتالی‌سازی بخش تقاضای انرژی (EDSD): فناوری‌های دیجیتالی متحول کننده در بخش‌های مصرف نهایی انرژی که دیجیتالی شدن صنعت حمل‌ونقل و ظهور وسایل نقلیه خودران، خانه‌های هوشمند، فناوری بهداشت از راه دور، و دیگر روندهای تحول دیجیتالی در صنعت خدمات، انقلابی را شامل می‌شود. به عنوان مثال، در هوانوردی، جت‌لاین‌های مدرن به تعداد زیادی سنسور هوشمند مجهز هستند تا صدها گیگابایت داده در هر پرواز تولید می‌کنند تا عملیات روزانه و فعالیت‌های تعمیر و نگهداری را بهینه کنند. به طور مشابه، امروزه هواپیماهای تجاری معمولاً از تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ و خدمات ابری برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مسیر پرواز و ترویج تصمیم‌های آگاهانه در داخل پرواز برای به حداقل رساندن مصرف سوخت بهره می‌برند (۲۶). روش دیگر، استفاده تجاری از اینترنت اشیا در ساختمان‌ها و روندهای دیجیتالی‌سازی، مانند روشنایی هوشمند یا ترموستات‌های هوشمند می‌باشد که می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف انرژی ساختمان‌ها را

---

۱. namely energy demand sector digitization

۲. energy sector digital transformation

۳. improved methods of production

۴. improved production management

۵. improved production planning and control

۶. informed decision making

۷. new business model innovation

۸. smart energy management systems

۹. sustainable new product development

۱۰. value chain digitization

بهینه کند (۲۷). اگرچه دیجیتالی شدن بخش های مختلف، ممکن است باعث ایجاد اثرات بازگشتی شود که مصرف کلی انرژی را افزایش می دهد. همچنین فرآیند دیجیتالی کردن کارایی انرژی در ارائه کالاها و خدمات دیجیتالی را افزایش می دهد (۲۸).

تحول دیجیتالی بخش انرژی (EST): بخش انرژی از دوران کامپیوتری شدن همواره جزو اولین پذیرندگان فناوری های دیجیتال بوده است. استقرار دیجیتالی سیستم های انرژی پایدارتر به طور قابل ملاحظه ای نحوه تولید، تحویل و مصرف انرژی را تغییر می دهد (۲۹). به عنوان بخشی از دیجیتالی شدن صنعتی در عصر انقلاب صنعتی چهارم، ادغام روزافزون زیرساخت های فیزیکی با زیرساخت های دیجیتال در صنعت انرژی منجر به دیجیتالی شدن نیروگاه ها نیز خواهد شد. مهم تر از آن، فناوری های دیجیتال جدید مانند تجارت برق مبتنی بر بلاک چین، فناوری های شارژ هوشمند و سیستم های پاسخگویی به تقاضای ابری می توانند توسعه و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پانل های فتوولتائیک خورشیدی مسکونی و تجهیزات ذخیره سازی انرژی را تسهیل کنند (۳۰).

روش های تولید بهبود یافته (IMP): فناوری های دیجیتال زیربنایی انقلاب صنعتی چهارم، مانند اتوماسیون هوشمند، IIoT، CPPS، تولید افزودنی و داده های ابری، پایداری انرژی را تسهیل می کنند و به کارگیری انرژی های تجدیدپذیر در محیط تولید را تسریع می کنند. محققان پیش بینی می کنند که کاربرد گسترده تولید افزودنی منجر به صرفه جویی بیش از ۲۰ درصدی در مصرف انرژی جهانی تا سال ۲۰۵۰ می شود (۳۱). کاهش وزن محصول و راندمان حمل و نقل، حداقل هدر رفت مواد و بهبود انعطاف پذیری تولید از جمله ویژگی های حیاتی تولید افزودنی است که مستقیماً بر پایداری انرژی تأثیر می گذارد. روباتیک صنعتی، تولیدکنندگان را قادر می سازد تا شیوه های پایدار انرژی را برای تولید توسعه دهند. ربات های صنعتی می توانند در محیط تاریک و سرد به طور قابل اعتماد عمل کنند و به دنبال آن نور و گرمایش غیر ضروری را کاهش می دهند. اتوماسیون و رباتیک نیز انقلابی در بخش انرژی های تجدیدپذیر ایجاد کرده اند، با توجه به کارهای تولیدی مانند ساخت اکثر قطعات توربین های برق آبی مانند جوشکاری درپچه ها به دقت ماشین یا ظرفیت های جابجایی مواد بسیار نیاز دارد، ربات های هوشمند برای تولید کارآمد محصولات مهارکننده انرژی های تجدیدپذیر بسیار مهم هستند (۳۲).

بهبود مدیریت تولید (IPM): مصرف بهینه انرژی یکی از اصول اصلی تفکر انقلاب صنعتی چهارم و قابلیت های نظارت بر تولید انقلاب صنعتی چهارم مانند نظارت بر تولید، ارزیابی در دسترس بودن تجهیزات و

کنترل کیفیت هوشمند می‌باشد و این امر می‌تواند مدیریت انرژی را در محیط‌های صنعتی به طور قابل توجهی ارتقا دهد. دیجیتالی‌سازی صنعتی فرصت‌های بهره‌وری تولید، کاهش ضایعات، قابلیت اطمینان تولید و افزایش کیفیت را ارائه می‌دهد که منجر به کارایی بهتر انرژی و پایداری آن می‌شود. قطعات ماشین آلات مجهز به حسگر می‌توانند به طور مداوم مصرف انرژی را در زمان واقعی در تنظیمات کارخانه هوشمند تشخیص دهند. همچنین، ابزارهای مدیریت داده مبتنی بر فضای ابری و سیستم‌های بازخورد یکپارچه، ردیابی سیستماتیک مصرف انرژی در کل کارخانه را امکان‌پذیر می‌سازد. به لطف مدیریت تولید و قابلیت نظارت بر فرآیند در تنظیمات کارخانه هوشمند، خرابی‌های قریب الوقوع ماشین و نوسانات فرآیند توسط سیستم‌های تشخیص زودهنگام اندازه‌گیری، پیش‌بینی و اجتناب می‌شود. این قابلیت در محیط تولید، فرصت‌های صرفه جویی قابل توجهی در منابع ارائه می‌دهد (۲۱).

برنامه‌ریزی و کنترل تولید بهبود یافته (IPPC): تولیدکنندگان با توجه برنامه‌ریزی و کنترل تولید، استراتژی‌های منسجمی را به کار می‌گیرند تا عملیات و فرآیندهای خود را تا حد امکان کارآمد، مؤثر و اقتصادی کنند. روشی که تولیدکنندگان برنامه‌ریزی و استراتژی‌های کنترل تولید خود را اجرا می‌کنند نیز می‌تواند بر بهره‌وری انرژی تأثیر بگذارد (۲۱). طرح‌های سنتی برنامه‌ریزی و کنترل تولید به‌طور غیرمستقیم به بهینه‌سازی مصرف انرژی با پیگیری بهینه‌سازی زمان‌های پردازش، کاهش تنگناها، به بهینه‌سازی موجودی و بهره‌وری نیروی کار پرداختند. در انقلاب صنعتی چهارم و محیط تولید دیجیتالی، موضوع پایداری انرژی نه تنها در سطح اجزاء (ماشین‌ها، زیرساخت‌ها و تجهیزات)، بلکه به عنوان یک هدف استراتژیک در سطح کارخانه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. داده کاوی و هوش مصنوعی، تولیدکنندگان مدرن را قادر می‌سازد تا استراتژی‌های برنامه‌ریزی نوآورانه‌ای مانند برنامه‌ریزی انرژی محور را اجرا کنند و کارایی انرژی را به طور قابل توجهی بهبود بخشند. به همین ترتیب، امروزه شبیه‌سازی دوگانه و شبیه‌سازی صنعتی تولید، تولیدکنندگان را قادر می‌سازد تا جریان‌های مواد را تجسم کنند، اتوماسیون را شبیه‌سازی کنند، گلوگاه‌های بالقوه را شناسایی کنند، و حتی با اولویت‌بندی بهینه‌سازی مصرف انرژی، کل فرآیند تولید را به صورت مجازی برنامه‌ریزی کنند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). راه اندازی مجازی حاصل به عیب‌یابی و بهینه‌سازی خطوط تولید یا سلول‌ها و دستیابی به پایداری انرژی کمک می‌کند (۱۱).

تصمیم‌گیری آگاهانه (IDM): برای اینکه فرآیندهای تولید پیچیده تا حد امکان کارآمد شوند، تولیدکنندگان باید به طور مستقل حجم عظیمی از مواد، تجهیزات و داده‌های پردازش را جمع‌آوری و تجزیه

و تحلیل کنند و تصمیمات آگاهانه بگیرند. قابلیت‌های پردازش اطلاعات فناوری‌هایی مانند داده‌های ابری، هوش مصنوعی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، پردازش حجم عظیمی از داده‌های تولید شده در طول چرخه عمر محصولات و خدمات را در سراسر شبکه ارزش ممکن می‌سازد. سرویس‌های IIoT، داده کاوی و ابر ERP می‌توانند داده‌ها را در همه‌بخش‌های عرضه جمع‌آوری کنند، اطلاعات شفاف استخراج کنند، گزینه‌های تجزیه و تحلیل متعددی را ارائه دهند. قابلیت پردازش اطلاعات انقلاب صنعتی چهارم و بهبود ارتباطات حاصل شده تصمیم‌گیری آگاهانه را ساده می‌کند و باعث پایداری بهتر انرژی پشتیبانی می‌کند (۳۳).

نوآوری مدل کسب‌وکار جدید (NBMI): انقلاب صنعتی چهارم از توسعه مدل‌های کسب‌وکار سرویس‌محور جدید مانند تولید به‌عنوان سرویس (MaaS)، محصول به‌عنوان سرویس (PaaS)، تولید فردی یا دیجیتالی‌سازی ناب پشتیبانی می‌کند. تولید، منجر به بهره‌وری انرژی قابل توجهی می‌شود. مدل تولید به‌عنوان یک سرویس، که معمولاً به‌عنوان تولید ابری برچسب گذاری می‌شود، به پایداری انرژی و منابع از طریق

(۱) تسهیل مدیریت دانش مشترک،

(۲) افزایش دفع زباله و بازیابی،

(۳) فرآیند بهبود یافته کمک می‌کند. انعطاف‌پذیری

(۴) فرآیند مشارکتی و طراحی محصول، و

(۵) ارتقاء اتوماسیون کمک می‌کند.

بنابراین، تولیدکنندگان نه تنها می‌توانند محصولات خود را شخصی‌سازی کنند، بلکه می‌توانند زنجیره‌های تامین را به‌طور اساسی ساده‌سازی کنند، سطح موجودی را کاهش دهند، کانال‌های تحویل را ساده کنند، پردازش سفارش را آسان کنند، طراحی محصول مشترک را بهبود بخشند، و در نهایت کارایی کارخانه را بهبود بخشند، شرایطی که منجر به مصرف بهینه‌تر انرژی می‌شود. و پایداری انرژی (۱۱). از طرف دیگر، فناوری‌های توانمند انقلاب صنعتی چهارم و کاربرد صنعتی آن‌ها مفهوم Lean 4.0 را به وجود آورده است. (۲۱).

سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند (SEMS): فناوری‌های دیجیتالی زیربنایی انقلاب صنعتی چهارم، به‌ویژه فناوری‌های داده‌های ارتباطی هوشمند، اپراتورهای شبکه و مصرف‌کنندگان انرژی را قادر می‌سازد تا نیازهای انرژی، مصرف‌ها و هزینه‌های خود را در زمان واقعی کنترل کنند و از به سمت انرژی قابل اطمینان‌تر مقرون به صرفه‌تر و پاک‌تر حرکت کند (ماریناکیس و همکاران، ۲۰۱۸؛ سیت روی کانداندو و دیگران، ۲۰۱۹).

در محیط تولید، IIoT، CPPS، ماشین‌های مجهز به حسگر و سایر اجزای هوشمند یک سیستم تولید هوشمند به کارخانه‌ها اجازه می‌دهد تا سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند را برای نظارت بر انرژی در زمان واقعی در سیستم‌های مدیریت تولید خود توسعه و ادغام کنند (۳۴). همچنین از هوش مصنوعی برای پیوند داده‌های انرژی دانه‌ای با واحدهای تولیدی و فرآیندهای صنعتی مربوطه استفاده کند و به دنبال آن تولید انعطاف‌پذیر و کارآمد از نظر انرژی را اجرا کند (۳۵).

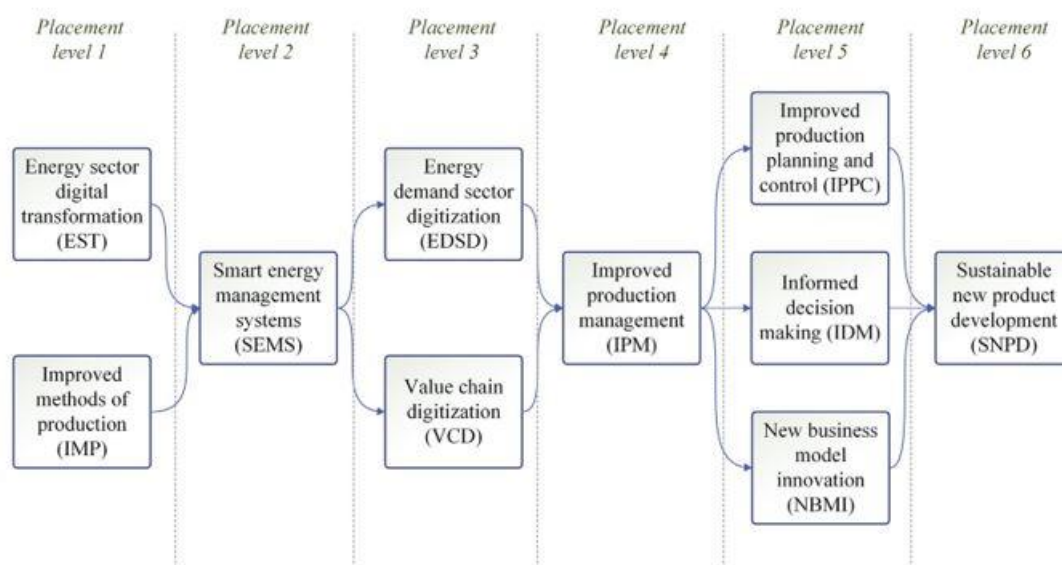
توسعه محصول جدید پایدار (SNPD): کسب و کارها رویکردهای مختلفی را برای طراحی محصول پایدار از نظر انرژی اتخاذ می‌کنند. در محیط انقلاب صنعتی چهارم، طراحی محصول پایدار از نظر انرژی به کل چرخه عمر محصول، از طراحی، نمونه‌سازی ساخت و استفاده تا دفع مربوط می‌شود. پیامدهای انقلاب صنعتی چهارم برای توسعه پایدار محصول جدید سه مورد می‌باشد. اولاً، تولیدکنندگان از فناوری‌های دیجیتالی پیشرفته مانند واقعیت افزوده و مجازی، محاسبات با کارایی بالا (HPC) برای طراحی و مهندسی، رباتیک هوشمند و دوقلوهای دیجیتال برای پیشرفت تلاش‌های تحقیق و توسعه و توسعه محصولات مرتبط با انرژی با کارآمدتر انرژی استفاده می‌کنند. دوم، استفاده از فناوری‌های دیجیتال مشترک، واقعیت افزوده و مجازی، پرینترهای سه بعدی، و سیستم‌های دیجیتال مدیریت پروژه و منابع در تیم توسعه محصول، به طور قابل توجهی اثربخشی تلاش‌های NPD (از نظر زمان عرضه به بازار، کیفیت، شدت منابع، قابلیت ساخت) را افزایش می‌دهد. سوم، تیم‌های توسعه محصول در سراسر شبکه‌های ارزش می‌توانند یک سیستم مدیریت چرخه حیات فعال ایجاد کنند و از داده‌کاوی، IoS، تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده و دوقلوهای دیجیتال برای ادغام یکپارچه داده‌های محصول مجازی و دنیای واقعی استفاده کنند، بنابراین، انرژی را پیش‌بینی و بیشتر بهینه کنند. پایداری محصولات جدید طراحی شده در طول چرخه عمر ایده‌پردازی، تحقق، و استفاده در شبکه‌های ارزشی به کار گیرد (۳۶).

دیجیتالی شدن زنجیره ارزش (VCD): انقلاب صنعتی چهارم زنجیره‌های ارزش سنتی را مختل می‌کند و شرکت‌ها را مجبور می‌کند تا از مدل‌های تجاری لجستیک دیجیتال در حال ظهور استفاده کنند. ظهور شبکه‌های عرضه دیجیتال، دیجیتالی شدن کل شبکه ارزش آفرینی، و راه‌های جدید برای ادغام با تامین کنندگان و مشتریان، فرصت‌های ارزشمند انرژی پسند مانند قابلیت شخصی‌سازی محصول یا فرآیندهای توسعه محصول و خدمات کارآمد را ارائه می‌دهد (۳۳). این فرصت‌ها برای حذف عملکردهای غیر ضروری، پیامدهای بسیار زیادی در پایداری انرژی دارند. دیجیتالی شدن زنجیره تامین، شرکای تامین را قادر می‌سازد

تا ارزیابی قابلیت فرآیند و محک زدن را به صورت مشترک انجام دهند و استراتژی‌های پایداری انرژی را بهتر شناسایی و توسعه دهند. مدیریت دانش مشارکتی، به اشتراک‌گذاری اطلاعات، استانداردسازی ممیزی انرژی و مدل‌سازی بهره‌وری انرژی در سطح نمونه کارها از جمله فرصت‌هایی هستند که دیجیتالی‌سازی زنجیره ارزش و مشارکت‌های دیجیتال برای پایداری انرژی ارائه می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از AI، IIoT، و تجزیه و تحلیل داده‌ها و تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده تقاضای مشتری و داده‌های بازار، شرکای عرضه را قادر می‌سازد تا پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضای مشتری را انجام دهند و به سطح چابکی زنجیره تامین بالاتری دست یابند. روش دیگر، دیجیتالی شدن زنجیره‌های تامین و ظهور مدل‌های تجاری جدید مانند زنجیره تامین به‌عنوان یک سرویس و برنامه‌ریزی کلی‌نگر در زمان واقعی عملیات زنجیره تامین، انعطاف‌پذیری کلی زنجیره‌های تامین را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و منجر به سطوح بالاتری از کارایی انرژی در شبکه‌های ارزش می‌شود (۳۷).

#### ۳-۴. مدل توابع پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم

برای توسعه مدل ساختاری توابع انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی، ده تابع پایداری انرژی بیان شده در این پروژهاست. در انجام این کار، رابطه متنی بین هر جفت توابع پایداری انرژی نشان داده شد. به عنوان یک فلش‌برداری که با جهت علیت سازگار است. این روش مدل‌سازی ساختاری با حذف گذر از توابع پایداری انرژی دنبال شد، که منجر به توسعه مدل توابع انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی در شکل ۳ که شامل شش سطح قرارگیری است.



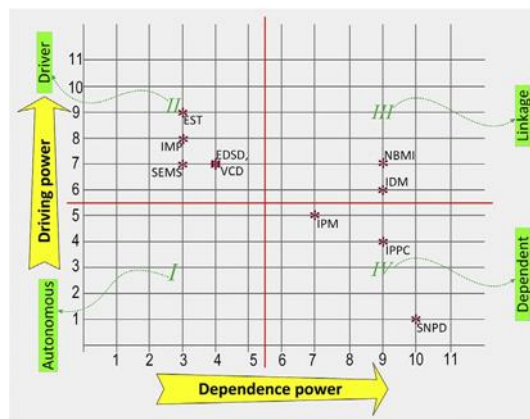
شکل ۳: مدل ساختاری انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی



#### ۴-۴. تجزیه و تحلیل قدرت اجرا و وابستگی

MICMAC آخرین مرحله تکمیلی در روش ISM است که شامل ارزیابی قدرت محرک و قدرت وابستگی برای متغیرهای مورد علاقه است. به عنوان یک تکنیک طبقه‌بندی غیرمستقیم، MICMAC یک ارزیابی مقایسه‌ای از دامنه رابطه هر متغیر ارائه می‌دهد. در تجزیه و تحلیل MICMAC، متغیرها بر اساس ویژگی‌های قدرت محرک و وابستگی به چهار زیربخش طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول، دسته مستقل، شامل متغیرهایی با قدرت اجرا ضعیف و قدرت وابستگی ضعیف است. دسته دوم، دسته اجراکننده، متشکل از متغیرهایی با قدرت محرک قوی و در عین حال قدرت وابستگی ضعیف است. دسته سوم، دسته پیوند، متشکل از متغیرهایی با قدرت محرک قوی و قدرت وابستگی قوی است. دسته چهارم، دسته وابستگی، متشکل از متغیرهایی است که قدرت محرک ضعیف و در عین حال قدرت وابستگی قوی دارند. ده تابع پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم در دسته مربوطه خود به شکل ۵ طبقه‌بندی شده است. این شکل توضیح می‌دهد که تغییربخش انرژی، روش‌های بهبود یافته تولید، سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی، دیجیتالی کردن بخش تقاضای انرژی و دیجیتالی کردن زنجیره ارزش به عنوان عملکردهای پایداری انرژی محرک طبقه‌بندی می‌شوند، به این معنی که این کارکردها فرصت‌های فوری و دست یافتنی‌تر هستند که انقلاب صنعتی دیجیتال برای پایداری انرژی ارائه می‌دهد. دو کارکرد نوآوری مدل کسب‌وکار جدید و تصمیم‌گیری آگاهانه، که در ربع سمت راست بالای شکل ۵ قرار دارند، در دسته پیوند طبقه‌بندی می‌شوند، با توجه به اینکه این کارکردها فرصت‌های پایداری انرژی میانی هستند که توسط انقلاب صنعتی چهارم ارائه می‌شوند. بهبود مدیریت تولید، برنامه‌ریزی و کنترل تولید بهبودیافته، و توسعه پایدار محصول جدید در دسته وابسته قرار می‌گیرد، به این معنی که آنها کمترین تأثیرگذاری و دورترین فرصت‌های پایداری انرژی هستند که انقلاب صنعتی چهارم ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل MICMAC شواهدی از روابط تقدم پیچیده بین توابع پایداری انرژی شناسایی شده در این مطالعه، عمدتاً به دلیل عدم وجود عملکردهای مستقل، ارائه می‌دهد. 31

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی



شکل ۴: تجزیه و تحلیل قدرت اجرا و وابستگی

### بحث و تحلیل

مدل ساختاری توابع پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم که در این پروژه اشاره شده است، نمای کلی از چگونگی دیجیتالی شدن دنیای صنعتی را ارائه می‌کند. شکل ۳ نشان می‌دهد که سهم دیجیتالی شدن صنعتی در پایداری انرژی یک فرآیند پیچیده و تدریجی است. انقلاب صنعتی چهارم از طریق ده تابع پایداری به پایداری انرژی کمک می‌کند و روابط تقدم پیچیده‌ای بین آنها وجود دارد. جالب توجه است، شکل ۳ نشان می‌دهد که تبدیل دیجیتالی اکتور انرژی (EST) و روش‌های بهبود یافته تولید (IMP) اولیه‌ترین و اساسی‌ترین توابع پایداری انرژی هستند که توسعه تابع‌های پایداری انرژی وابسته‌تر انقلاب صنعتی چهارم را تسهیل می‌کنند. انقلاب صنعتی چهارم در ابتدا به عنوان دیجیتالی کردن کارخانه‌ها از طریق پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته تولید دیجیتال مانند ساخت افزودنی و CPPS در نظر گرفته شد. که انقلاب صنعتی چهارم یک تغییر الگو در بین صنایع مختلف است که شامل تحول دیجیتال شبکه‌های تحویل ارزش صنعتی است. دیجیتالی شدن به بخشی ضروری از عملیات‌بخش انرژی تبدیل شده است و با معرفی EST به عنوان اساسی‌ترین و اساسی‌ترین سهم انقلاب صنعتی چهارم در پایداری انرژی، از این واقعیت پشتیبانی می‌کند. انقلاب صنعتی چهارم با فعال کردن صنعت انرژی برای ترکیب فزاینده IoT، تجزیه و تحلیل داده‌ها، خدمات ابری و هوش مصنوعی برای بهبود تصمیم‌گیری‌های ارسال، بهینه‌سازی مدل‌های عملیات، به حداقل رساندن آسیب‌پذیری‌ها و افزایش کارایی عملیاتی، پایداری انرژی را تسهیل می‌کند. به همین ترتیب، مفاهیم پایداری انرژی IMP دوگانه است. اول، فن‌آوری‌های ساخت پیشرفته انقلاب صنعتی چهارم، مانند ربات‌های هوشمند، چاپگرهای سه‌بعدی، و تجهیزات تولیدی یکپارچه HPC، امکان تولید تجهیزات تولید انرژی خلاقانه‌تر، پیشرفته‌تر و

کارآمدتر را فراهم می‌کنند. ثانیاً، استفاده از فناوری‌های دیجیتال در بخش تولید کالاهای مصرفی، اجرای فرآیندهای تولید با انرژی کارآمدتر را امکان‌پذیر می‌سازد که استقرار انرژی تجدیدپذیر را در سطح تولید تسریع می‌کند.

تحول صنعتی دیجیتال و توسعه عملکردهای EST و IMP در سراسر صنایع، عملکرد سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند (SEMS) را ممکن می‌سازد. SEMS بر هوش تجهیزات و ماشین آلات متکی است تا نیازهای انرژی و مصرف آنها را ارزیابی و کنترل کند. توابع پایداری انرژی EST و IMP و ظهور SEMS در سراسر شبکه‌های تحویل ارزش، عملکردهای دیجیتالی شدن بخش تقاضای انرژی (EDSD) و دیجیتالی کردن زنجیره ارزش (VCD) را تسهیل می‌کند. توابع EDSD و VCD به همه اعضای شبکه‌های تحویل ارزش، از جمله بخش‌های مصرف‌کننده و انرژی، نیاز دارند تا به اعضای دیجیتال یک سیستم نهایی بهم پیوسته و باز اشتراک‌گذاری اطلاعات تبدیل شوند، در حالی که توابع پایداری انرژی که در سطوح قرارگیری ۱ و ۲ قرار دارند، توسعه را تسهیل می‌کنند. از چنین شبکه‌های دیجیتالی این یافته‌ها در مجموع نشان می‌دهند که دیجیتالی‌سازی تحت انقلاب صنعتی چهارم توسعه سیستم‌های انرژی هوشمند و متصل به هم را تسهیل می‌کند که در سراسر شبکه‌های تحویل گسترده است و مرزهای سنتی بین بخش‌های تامین انرژی و مصرف نهایی را از بین می‌برد. دیجیتالی کردن اجزای شبکه تولید و تامین و جریان یکپارچه اطلاعات بلادرنگ، به نوبه خود، کارایی شیوه‌های مدیریت تولید (عملکرد IPM) را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین تحت عملکرد IPM، نه تنها تولیدکنندگان می‌توانند مصرف انرژی تجهیزات، فرآیندها و مناطق تولید را در زمان واقعی ردیابی کنند، بلکه می‌توانند از فناوری‌های دیجیتال برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی استفاده کنند. داده‌های زمان واقعی و پیش‌بینی مصرف انرژی در آینده، عملکرد IMP و قابلیت نظارت در زمان واقعی عملیات صنعتی توسعه سه تابع پایداری انرژی شامل برنامه‌ریزی و کنترل تولید بهبود یافته (IPPC)، تصمیم‌گیری آگاهانه (IDM) و نوآوری مدل کسب و کار جدید (NBMI) را تسهیل می‌کند. توسعه پایدار محصول جدید (SNPD) وابسته‌ترین و سخت‌ترین عملکرد پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم است، زیرا توسعه آن مستقیماً به سه عملکرد IPPC، IDM و NBMI متکی است. با توجه به اینکه عملکرد SNPD به شدت اطلاعات فشرده است، به پیشرفته‌ترین فناوری‌های دیجیتال و تولید نیاز دارد، و برای تعامل یکپارچه با تامین‌کنندگان و مشتری، بر نوآوری مدل کسب و کار متکی است، انتظار می‌رود این سطح قرار گیری باشد.

انقلاب صنعتی چهارم اکنون فراتر از تبلیغات است. بازار انقلاب صنعتی چهارم و فناوری‌های دیجیتال مرتبط بسیار گسترده است و به طور تصاعدی در حال رشد است. اکثر صنایع، تحول دیجیتال مورد نیاز انقلاب صنعتی چهارم را انقلابی می‌دانند و تلاش می‌کنند از پذیرندگان اولیه عقب نمانند. معمولاً اعتقاد بر این است که انقلاب صنعتی چهارم ممکن است رویکردهای جدیدی را برای مقابله با چالش‌های مهم جهانی در حال انجام و پیش رو مانند تخریب محیط زیست یا رکود اقتصادی ارائه دهد. انجمن پایداری انقلاب صنعتی چهارم تمرکز تحقیقات معاصر بوده است، و مطالعه حاضر سعی دارد راه‌هایی را که انقلاب صنعتی چهارم و انقلاب صنعتی دیجیتال می‌توانند پایداری انرژی را تسهیل و ارتقا دهند، روشن کند. مطالعه حاضر با شناسایی ده عملکرد اصلی پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم و ترسیم ساختاری روابط متقابل بین این توابع، مفاهیم جدیدی را معرفی کرد که انقلاب صنعتی چهارم برای پایداری انرژی ارائه می‌کند.

**فصل سوم**

**پایداری در تولید**

## پایداری در تولید و کارخانه‌های آینده

این مقاله مروری کوتاه بر تغییر پارادایم در تولید از جمله روندهای معاصر که الزامات کارخانجات آینده می‌باشد را دربردارد، سپس منتخبی از دیدگاه‌های کارخانه، بازنگری شده که نشان دهنده تقاضا برای چشم انداز جدید با توجه به روندهای جدید برای ایجاد کارخانه‌های آینده می‌باشد.

تولید، پایه و اساس قدرت‌های بزرگ جهانی در دویست سال گذشته است. در قرن نوزدهم انگلستان با توجه به بخش تولید قوی خود به یک قدرت جهانی تبدیل شد و پس از آن ایالات متحده، آلمان، ژاپن و اتحاد جماهیر شوروی در قرن بیستم به کمک بخش تولید خود، به قدرت رسیدند.

رشد اقتصادی بلند مدت بدون صنعت ماشین آلات نمی‌تواند وجود داشته باشد. تولید کالا به ماشین آلات تولیدی کافی نیاز دارد که اجزای آن به نوبه خود باید توسط ماشین ابزار خاصی ساخته شوند. قطعات تولید شده نه تنها به کالاها بلکه به ماشین‌ابزارهای جدید نیز راه پیدا می‌کنند تا از فناوری‌ها برای بازتولید ماشین‌های جدید استفاده شود. بخش تولید برای تجارت جهانی اهمیت زیادی دارد. خدمات اغلب نمی‌توانند بدون کالاهای ساخته شده وجود داشته باشند. به موازات آن، روند مداوم به سمت برون سپاری و ظهور زنجیره های تامین پیچیده به شرکتها این امکان را می دهد که از چین، هند و سایر کشورهای کم دستمزد به عنوان میز کار طولانی خود استفاده کنند. .

برای بیش از ۱۰۰ سال آمریکا تولید کننده پیشرو در جهان بود، در حالی که اکنون با چین همکار است. به دلیل بحران مالی، برخی از سیاستمداران غربی شروع به محاسبه کردند که زمان آن فرا رسیده است که کشورهايشان برای ایجاد شغل و جلوگیری از از بین رفتن مهارت های تولیدی بیشتر، به تولید کالا برگردند. تولید به عنوان منبعی از نوآوری، رقابت پذیری کشورها را تضمین می کند و برای کشورهای دارای بخش هایی با تکنولوژی بالا هستند، اهمیت ویژه ای دارد.

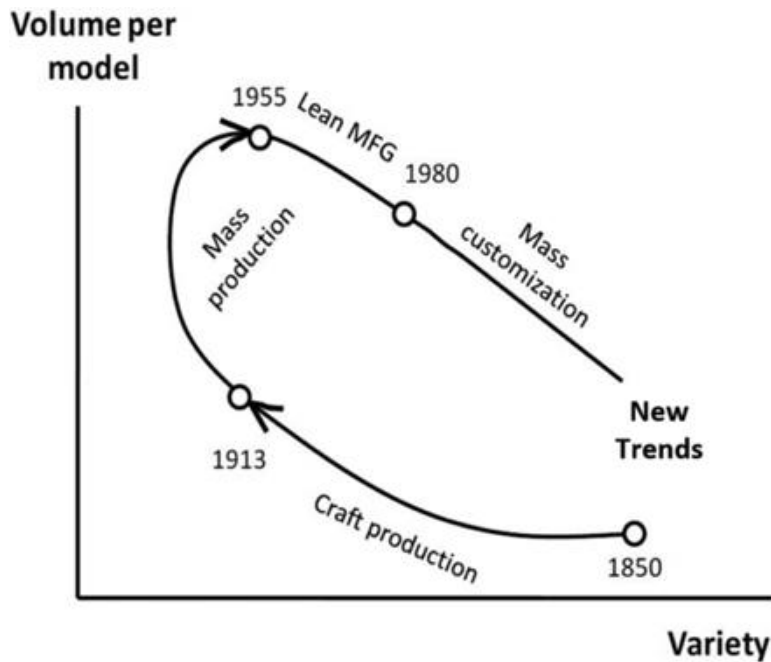
برای حفظ یا ایجاد مجدد یک صنعت تولیدی قوی در یک کشور، کارخانه‌ها باید خود را با چالش‌ها، روندها و پارادایم‌های جدید در تولید وفق دهند تا رقابتی باقی بمانند. این مقاله مروری بر توسعه پارادایم‌ها در تولید ارائه می‌کند و میزانی را ارزیابی می‌کند که دیدگاه‌های کارخانه‌ای مستقر می‌توانند روندهای جدید را به تصویر بکشند. بر اساس یک مدل کارخانه جدید، ایده هایی برای انطباق کارخانه ها با روندهای جدید ارائه شده است.

### بررسی توسعه پارادایم ها و روند جدید در تولید

در طول دو قرن گذشته، صنعت تولید از طریق الگوهای متعددی از تولید صنایع دستی بر تولید انبوه تا تولید ناب و سفارشی سازی انبوه تکامل یافته است. تولید صنایع دستی به عنوان اولین پارادایم به سفارش مشتری خاص پاسخ می دهد. بنابراین، محصولات منحصر به فرد بودند و تنوع محصول و انعطاف پذیری بالایی را بدست آورد. با این حال، محصولات با هزینه نسبتاً بالا ایجاد شدند زیرا هیچ سیستم تولیدی با این پارادایم مرتبط نبود. تولید انبوه امکان ساخت محصولات را با هزینه کمتر از طریق تولید در مقیاس بزرگ فراهم کرد. پس از پایان جنگ جهانی دوم، تقاضا برای محصولات بسیار بالا بود که به تولید انبوه اجازه داد تا به طور کامل از نقاط قوت خود استفاده کند به طوری که در آن زمان به اوج خود رسید.

#### تولید انبوه بر سه اصل متکی است:

- **قابلیت تعویض:** امکان انتخاب تصادفی قطعات را برای مونتاژ فراهم می کند.
  - **خط مونتاژ متحرک:** همانند کارگری که بارها و بارها کاری را انجام میدهد که منجر به بهبود قابل توجه سرعت و کاهش هزینه های مونتاژ شد.
  - **تقسیم کار:** همانند کارگری که می توانست بر روی برخی از کارهای تکراری تخصصی تمرکز کند.
- پارادایم تولید ناب پس از جنگ جهانی دوم به دلیل محدودیت منابع در ژاپن به عنوان یک ضرورت پدیدار شد (سیستم تولید تویوتا). فلسفه مدیریت ناب هنوز بخش مهمی از تمام سیستم های تولید مدرن است.
- پارادایم چهارم سفارشی سازی انبوه در اواخر دهه ۱۹۸۰ مطرح شد زمانی که تقاضای مشتری برای تنوع محصول افزایش یافت. فراتر از سفارشی سازی انبوه، گرایشی به سوی محصولات شخصی وجود دارد. محصولات بسیار خاص مشتری ممکن است مراحل کاری و زمان چرخه متفاوتی داشته باشند.
- رابطه بین تنوع و حجم در هر مدل در شکل ۶ برای پارادایم های مختلف نمایش داده شده است. بدیهی است توسعه به سمت حجم های کوچکتر در هر مدل و افزایش تنوع در آینده است. این روندهای جدید در ادامه توضیح داده شده است.



شکل ۵: رابطه بین تنوع و حجم

افزایش جمعیت جهان و میل به افزایش استانداردهای زندگی از یک سو و اهمیت منابع فسیلی برای تولید انرژی از سوی دیگر منجر به افزایش قیمت انرژی و منابع می شود. دولت ها مقررات و مالیات های نظارتی را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و تقویت تولید بی خطر برای محیط زیست وضع می کنند. اما همچنین تقاضای رو به رشد مصرف کنندگان برای محصولاتی با حداقل تاثیر زیست محیطی را می توان مشاهده کرد. بنابراین، تولید پایدار به سنگ بنای بسیاری از شرکت های تولیدی تبدیل می شود. چندین جنبه اجتماعی نیز بر تولید تاثیر می گذارد. پیشرفت شهرنشینی با تمایل همزمان برای کاهش رفت و آمد مستلزم آن است که بعضی کارخانه ها، هم به کارگران و هم به مشتریان نزدیک باشند. با در نظر گرفتن سایر روندها، متخصصان بسیار ماهر در زمینه تولید به عنوان عوامل انسانی اهمیت بیشتری پیدا می کنند، بنابراین کارخانه ها باید یادگیری مرتبط با تولید را فعال کنند و همزمان شرایط زندگی را در نظر بگیرند.

گسترش روزافزون فناوری اطلاعات و ارتباطات ( ) بیشتر بخش تولید را فرا خواهد گرفت و همانطور که مولفه های آن ارزانتر، همه کاره تر و قدرتمندتر می شوند راه خود را به حوزه های جدید تولید پیدا می کنند همانطور که روند تحقیقاتی فعلی به سمت سیستم های فیزیکی سایبری پیش می رود.

کارخانه ها می توانند نقش مهمی در شبکه هوشمند یا در فرآیند جمع سازی جریان زباله از مناطق اطراف (مسکونی) ایفا کنند. از سوی دیگر، کارخانه ها - و احتمالاً مجموعه محصولات آنها - می توانند بیشتر با

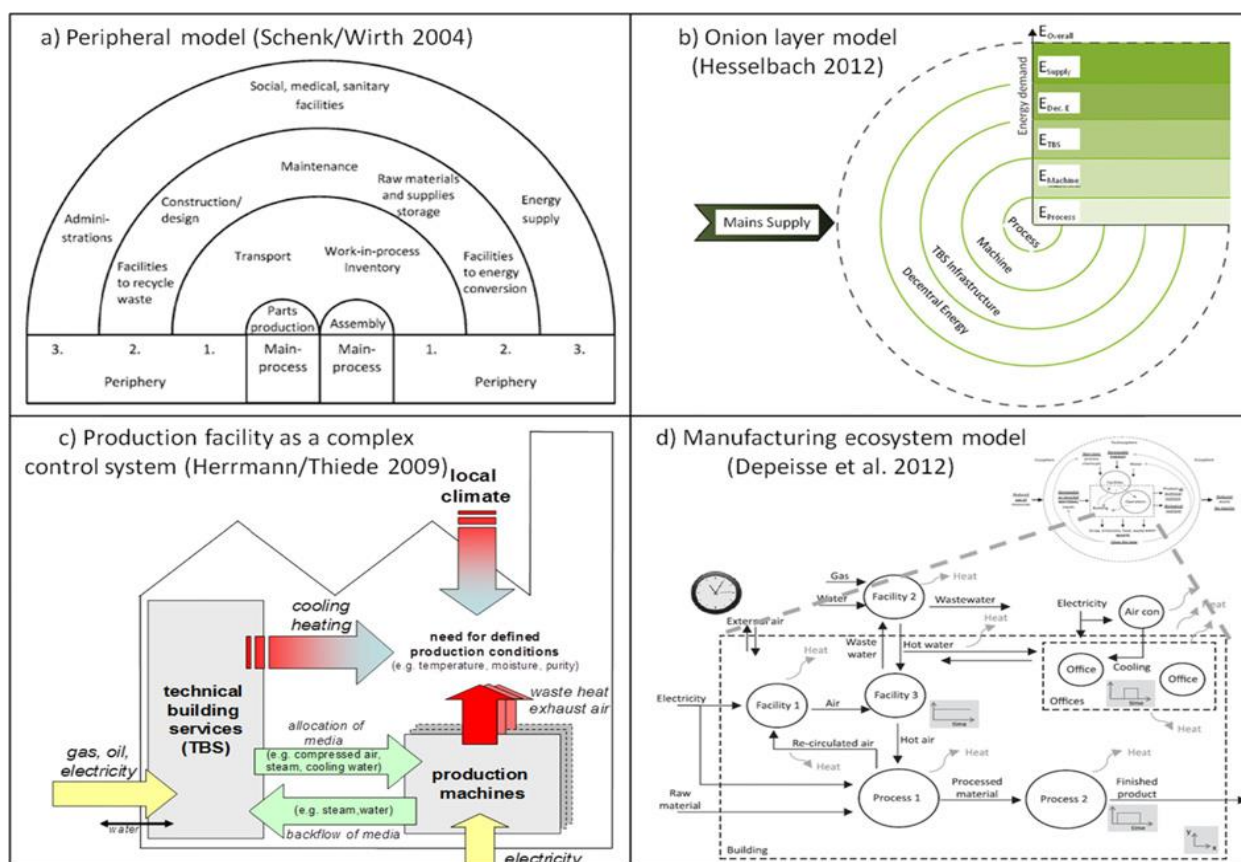


محدودیت های محلی سازگار شوند. بنابراین، موضوع فناوری های تولید سبز نیز در بسیاری از زمینه های تحقیقاتی جایگاه برجسته ای پیدا کرده است.

### ۳. درک جامع کارخانه و دیدگاه های فعلی کارخانه

بهبود در عملیات تولید مستلزم درک کامل یک سیستم تولیدی با عناصر و جریان های به هم پیوسته است. بنابراین، یک درک کلی از یک سیستم تولید به عنوان ترکیبی از عوامل تولید شامل : عوامل ورودی معمولی مانند مواد خام و کمکی، محصولات نیمه تمام، اطلاعات، انرژی و فضا و همچنین خروجی معمولی می باشد.

با پذیرش این درک، اظهارات زیر در درجه اول بر سطح کارخانه (تاسیسات) تولید متمرکز خواهد بود. با توجه به این سطح، دیدگاه های متفاوتی در مورد چگونگی درک بیشتر یک کارخانه تولیدی پیشنهاد شده است، به شکل ۶ مراجعه کنید. یک کارخانه تولیدی سه سیستم قسمت اصلی را تشکیل می دهد : خدمات فنی ساختمان ، پوسته ساختمان و خود سیستم تولید (با ماشین آلات به هم پیوسته و پرسنل کنترل شده از طریق مدیریت تولید).



شکل ۶: کارخانه تولیدی

اولین دیدگاه در شکل ۲(a) یک کارخانه تولیدی و فرآیندهای آن را به سه سفارش جانبی با محوریت فرآیندهای تولید ارزش افزوده تقسیم می‌کند. سه سفارش جانبی اطراف با توجه به سهم آنها در فرآیند خلق ارزش که دارای زیرسیستم‌های مستقیم قابل اعتمادی هستند که روی سیستم اول قرار می‌گیرند (مثلاً تامین انرژی و رسانه مستقیم برای ماشین‌های تولید)، زیرسیستم‌های نیمه قابل اعتماد واقع در سیستم دوم (مثلاً تولید هوای فشرده) و زیرسیستم‌های عملیاتی که هیچ تأثیری بر فرآیند ایجاد ارزش ترتیب‌دهی شده در حاشیه سوم ندارند (به عنوان مثال روشنایی).

در شکل ۲(b) فرآیندهای تولید عناصر مرکزی یک کارخانه تولید با فناوری‌های هسته‌ای و مقطعی خاص هستند. در خارج از ماشین‌های تولیدی، فناوری‌های مقطعی بیشتری وجود دارد که از فرآیند ارزش آفرینی حمایت می‌کند. طبق این دیدگاه کارخانه لایه‌ای، تلاش‌های بهینه‌سازی همیشه باید ابتدا از لایه ماشین شروع شود و سپس به طور مداوم به لایه‌های بیرونی گسترش یابد.

در شکل ۲(c) هماهنگی این سه سیستم جزئی شامل جریان‌های ورودی و خروجی مربوطه و همچنین وابستگی‌های متقابل دینامیکی ذاتی بین آنها را به عنوان یک سیستم کنترل پیچیده با متغیرهای تأثیرگذار داخلی و خارجی درک می‌کند.

در شکل ۲(d) رویکرد چهارم چالش‌های در حال ظهور را بررسی می‌کند. تلاش برای طراحی یک تاسیسات تولیدی بدون تأثیر یا حداقل تأثیر زیست محیطی. این رویکرد تأکید می‌کند که تولید کربن صفر تنها با گسترش چشم‌انداز ورودی-خروجی فعلی و نسبتاً خطی جریان انرژی و جریان‌های رسانه‌ای به سمت چشم‌اندازی چرخه‌ای و تعاملی تر بدست می‌آید.

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، هنوز شکافی در مورد روندهای معاصر در تولید و نمایش آنها توسط دیدگاه‌های کارخانه‌ای وجود دارد. در حالی که ساختار کلی تولید و عوامل محیطی در قالب جریان انرژی و منابع به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است، به نظر می‌رسد که جنبه‌های انسانی، یادگیری و اجتماعی، همزیستی و فضایی و همچنین ای سی تی و سی پی اس تا حدودی کمتر در مقایسه با تولید و جریان انرژی و منابع در یک کارخانه مورد توجه قرار گرفته است.

جدول 1

Table 1 Comparison of factory perspectives

Focus of study:	Proposed concepts: Schenk/ Wirth 2004	Westkämper 2006	Ball et al. 2009	Herrmann/Thiede 2009	Hesselbach 2012	Depeisse et al. 2012
Production structure	●	●	●	●	●	●
Energy flows	●	○	●	●	●	●
Resource flows	●	○	●	●	○	●
Human factor, learning and social aspects	●	○	○	○	○	○
Symbiosis and spatial context	○	○	●	○	○	●
ICT and CPS	○	○	○	○	○	○

### تغییر پارادایم به سمت کارخانه جامع (کلی نگر) آینده

کارخانه‌های آینده باید به سرعت خود را با نیازهای متغیر خارجی وفق دهد و در عین حال درجه بالاتری از پایداری را هدف قرار دهند. تولیدات آینده باید به هر سه بعد اقتصاد پایدار، اکولوژی و جامعه بپردازد. چشم انداز اقتصادی در درجه اول مستلزم سودآوری بالاتر تولید است. از نظر زیست محیطی، اثرات زیست محیطی تولید باید کاهش یابد، به سمت صفر شدن انتشار گازهای گلخانه‌ای یا حتی تأثیر مثبت کارخانه بر محیط محلی خود شود این به معنی، بهبود کیفیت هوا و آب، بهره برداری از جریان های زباله محلی، ارائه انرژی های تجدیدپذیر و شراکت در نقش یک ذخیره کننده انرژی در زمان تولید مازاد بر تقاضا می‌باشد.

### یک کارخانه جامع شامل ۴ جنبه اصلی می باشد:

۱. جریان های همزیستی و ادغام شهری کارخانه: تولید پایدار بر به حداقل رساندن جریان ورودی منابع و انرژی متمرکز است. رویکرد اثربخشی زیست محیطی شامل جریان های حلقه بسته مواد و انرژی در داخل کارخانه و یک پیوند قوی با محیط بیرونی کارخانه است. یک تولید سازگار با محیط زیست مشابه یک سیستم بیولوژیکی عمل می کند، جایی که جریان مواد به عنوان مواد مغذی بیولوژیکی برای سیستم های زنده عمل می کند و "ضایعات" وجود ندارد. این ایده از جریان‌های چرخه‌ای را می‌توان حتی بیشتر به سمت مفهوم جریان معکوس توسعه داد. به دنبال رویکرد جریان معکوس، صنعت از انتشار گازهای گلخانه‌ای از قبل به اکوسیستم به عنوان ورودی برای سیستم‌های صنعتی و بنابراین برای ایجاد ارزش اقتصادی استفاده می‌کند. پسماندهای جامد مورد بهره برداری قرار می گیرند و برای محصولات جدید استفاده می شوند، فاضلاب تصفیه می شود، انرژی های تجدیدپذیر تولید یا ذخیره می شود و در عین حال انتشار گازهای گلخانه‌ای محلی را خنثی می کند. این جنبه ها به کارخانه آینده اجازه می دهد تا به مناطق شهری بازگردد.

## ۲. عناصر کارخانه قابل تطبیق: پوسته ساختمان تطبیقی، مدولار و مقیاس پذیر (TBS)، سیستم تولید

### انعطاف

پیوند قوی جریان های مواد و انرژی با زیرساخت های خارجی نیاز به ساختارهای فیزیکی مناسب و بسیار انعطاف پذیر کارخانه ها دارد که پنج اصل: مدولار بودن، مقیاس پذیری، جهانی بودن، سازگاری و تحرک بعنوان مبنایی برای طراحی عناصر کارخانه عمل می کند.

#### ▪ پوسته ساختمان تطبیقی: پوسته ساختمان در درجه اول بعنوان عایق عمل می کند.

انعطاف پذیری پوسته ساختمان توسط ساختار اولیه تعیین می گردد و ویژگی های مهم ساختمان باید در مرحله برنامه ریزی تعریف شوند. از این رو پوسته یک کارخانه آینده باید بیشتر با نیازهای متغیر سازگار باشد. مساحت سقف یک کارخانه برای نصب نیروگاه های تجدیدپذیر با استفاده از انرژی باد و خورشید از پیش تعیین می شود و پوسته ساختمان تأثیر مثبتی بر محیط کارخانه های محلی دارد.

#### ▪ مدولار و مقیاس پذیری (TBS): در کارخانه آینده TBS بصورت فیزیکی و مجازی

به سیستم تولید مرتبط خواهد شد و بطور خودکار برای شرایط بهینه از نظر دما، روشنایی و رطوبت تلاش میکند و نقش مهمی در اتصال جریان های داخلی و خارجی کارخانه ایفا خواهد کرد. طراحی ماژول های TBS می تواند از ایده تولید افزونه (پلاگین) پیروی کند.

#### ▪ سیستم تولیدی انعطاف پذیر: یک سیستم تولیدی انعطاف پذیر باید تولید را با

هزینه های کم و اثرات زیست محیطی کم برعهده گیرد که سودآوری بالا و حداقل مصرف منابع را با استفاده بهینه از ماشین ها تقویت کند. خطوط تولید سنتی برای پاسخگویی به نیازهای آینده از نظر مونتاژ انعطاف پذیر مناسب نیستند. یک راه حل امیدوارکننده می تواند افزایش تطبیق پذیری ماشین آلات تولیدی باشد که به هر ماشینی اجازه می دهد انواع زیادی از محصولات مختلف را مونتاژ کند. برای راه اندازی سیستم تولید انعطاف پذیر می توان از سیستم های چند عاملی (MAS) استفاده کرد که منجر به عملکرد بهینه کل سیستم تولید می شود. کارکنان انسانی همچنان باید در مرکز سیستم تولید باشند، زیرا در تمام مراحل عملیات کارخانه از

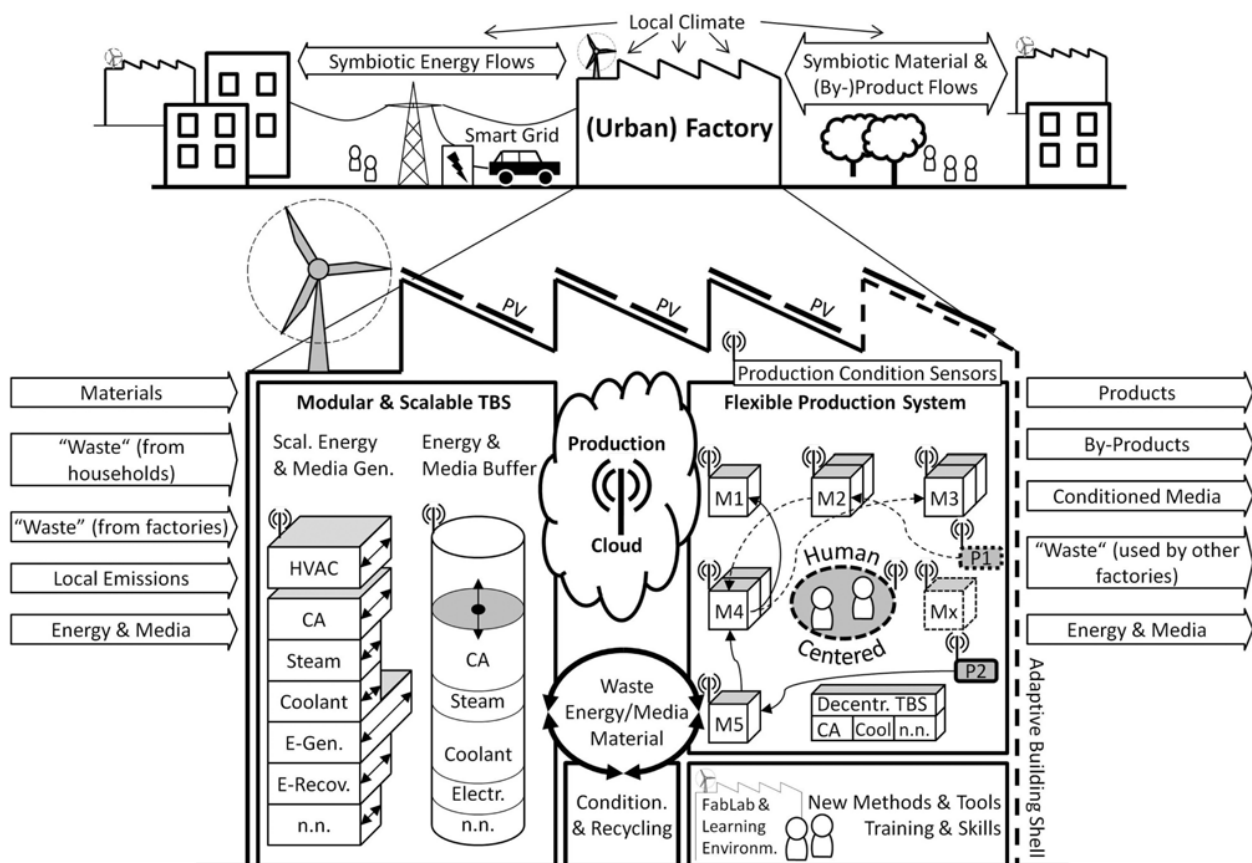
برنامه ریزی تا بهره برداری تا تعمیر و نگهداری مورد نیاز خواهند بود. امکانات فناورانه همچنین به سطح بالاتری از تحرک برای کارکنان انسانی منجر خواهد شد (مانند کار از مکان‌های خارج از کارخانه)، زیرا تمام اطلاعات مربوطه از طریق ICT در هر مکانی در هر زمان در دسترس خواهد بود.

**۳. تولید ابر و سیستم های فیزیکی سایبری:** حجم عظیمی از داده‌های جمع‌آوری شده در کارخانه آینده مستلزم راه‌اندازی یک مخزن داده غیرمتمرکز است که به آن «ابر تولید» گفته می‌شود، که تمام اطلاعات سیستم تولید و TBS را جمع‌آوری و پردازش می‌کند (داده‌های مربوط به بهره‌وری، انرژی و منابع، شرایط تولید). ابر تولید همچنین حاوی عناصر کلیدی یک کارخانه دیجیتال است که می‌تواند به عنوان تصویر مجازی از کارخانه واقعی درک شود که برای پیش‌بینی و بهبود رفتار سیستم آینده از طریق تکنیک‌های شبیه‌سازی مناسب استفاده می‌شود. هدف آن برنامه ریزی یکپارچه، اجرا، کنترل و بهبود مستمر کلیه فرآیندهای مهم کارخانه و منابع مربوط به محصول است. ذخیره‌سازی و پردازش تمام داده‌ها در یک ابر مستلزم چندین مزیت مانند درجه بالایی از شفافیت از طریق عملکردهای نظارت و کنترل تعبیه شده است که مقدمه مهمی برای اقدامات بهبود است. ابر تولید همچنین می‌تواند به عنوان پیوندی به خدمات تولید ابری عمل کند، که به نظر می‌رسد رویکرد مناسبی باشد.

این داده‌ها شامل سازمان را فرایندی می‌بینیم که در آن درون داد، روند و برون دادی وجود دارد که همه افراد بصورت افقی در مراحل از فرایند، قرار می‌گیرد. تقسیم‌بندی عمودی و سلسله‌مراتبی وجود ندارد. اگر فرایند برون دادی دارد همه در آن سهیم هستند.

**۴. محیط های یادگیری و آموزش:** علیرغم همه پیشرفت‌های تکنولوژیکی، توانایی‌های انسانی همچنان یکی از عوامل کلیدی موفقیت کارخانه‌های آینده خواهد بود. یک محیط یادگیری می‌تواند هم فیزیکی و هم دیجیتالی باشد. محیط‌های فیزیکی شامل اجزای واقعی سیستم مانند آچین، مونتاژ، تدارکات، اطلاعات و جریان انرژی است در حالی که محیط‌های دیجیتالی شامل برنامه ریزی، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و ابزارهای شبیه‌سازی است که راه‌حل‌های دیجیتالی را میتوان در محیط‌های فیزیکی آزمایش و ارزیابی کرد. کارخانه آینده ممکن است حاوی آزمایشگاه‌های ساخت یا «FabLabs» باشد که مجموعه‌ای از ابزارها برای طراحی و مدل‌سازی، نمونه‌سازی اولیه و ساخت، ابزار دقیق، آزمایش، اشکال‌زدایی و مستندسازی برای طیف وسیعی از کاربردها را شامل می‌شود. همچنین می‌تواند بستری برای انتقال دانش به صنعت باشد.

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی



شکل ۷

## نتیجه گیری

تولید یک عامل اصلی برای شکوفایی ملت‌ها و منبع اساسی نوآوری و توسعه است. برای رقابت پذیری در صنعت تولید، نیاز به انطباق با چالش‌ها و روندهای جدید می‌باشد که در دو قرن اخیر منجر به تغییرات در پارادایم‌های تولید شده است. درک کامل یک سیستم کارخانه، مقدمه‌ای برای توانایی پاسخگویی به آن چالش‌ها است. چشم انداز کارخانه جامع شامل چهار جنبه اصلی است که با ادغام همزیستی کارخانه با محیط اطرافش به ویژه در مناطق شهری یا خانگی و همچنین جهت گیری به سمت اثربخشی زیست محیطی شروع می‌شود که به سمت اقتصاد و اکولوژی مثبت پیش می‌رود. زیرساخت کارخانه‌ها به درجه بالاتری از انعطاف پذیری نیاز دارد که با ویژگی تطبیقی پوسته ساختمان، تی بی اس و سیستم تولید عناصر اصلی کارخانه بوجود می‌آید که با استفاده از مجموعه غیر متمرکز و استفاده از اطلاعاتی مانند ابر تولید امکان پذیر است.

کاربرد ICT ضرورت دارد، در حالی که CPS نقش مهمی را در ارتباط بین دنیای واقعی و مجازی کارخانه ایفا می‌کند. مهارت‌ها و توانایی‌های انسانی هنوز جنبه مرکزی کارخانه‌های آینده را تشکیل می‌دهند، بنابراین

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

یادگیری و آموزش اهمیت زیادی دارد. بنابراین کارخانه های آینده از تمرکز اقتصادی امروز به سمت استراتژی های اکولوژی و اجتماعی حرکت می کند.

## فصل چهارم

### نمونه‌های مطالعاتی



مشکلات زیست محیطی روش های تولید متکی بر تکنولوژی های قدیمی باعث روی آوردن صنایع به روشهای جایگزین شده است. پایداری محیط زیستی تولید در مرحله کارخانه آغاز می شود. روشهای پیشرفته تولید دیجیتال دریچه های برای کارایی زیست محیطی کارخانه ها بدون تحمیل هزینه یا کاهش کارایی باز می کنند حتی در مواردی می توانند به افزایش کارایی تولید و یا کاهش هزینه نهایی ( استفاده بهتر از سرمایه) کمک کند.

تولید دیجیتال پیشرفته می تواند دو سطح اثرگذاری را بر محیط زیست داشته باشد. سطح اول اثرگذاری بهره وری زیست محیطی می باشد که عملکرد زیست محیطی کارخانجات را در زمینه ارتفاع ورودی ها و بهره وری انرژی می سنجد. تولید پیشرفته دیجیتال با بهینه سازی بهره برداری از دارایی های ثابت و پارامتر های تولید دقت فرآیند تولید را افزایش می دهد و از هدر رفت ورودیهای تولید جلوگیری می کند. همچنین تولید پیشرفته دیجیتالی به جایگزینی فرآیندهای انرژی بر با فرآیندهای کارا کمک می کند برای مثال استفاده از نرم افزارهای بهینه سازی مصرف انرژی.

سطح دوم اثرگذاری تولید دیجیتال پیشرفته بر محیط زیست کالاهای زیست محیطی می باشد کالاهای زیست محیطی کالاهایی هستند که نیاز به مواد اولیه و انرژی را کاهش می دهد درحالیکه رفاه عمومی را افزایش می دهند و از تولید آلاینده و ضایعات در طول عمر کالا می کاهد. برای مثال با تبدیل محصولات فیزیکی به یک بسته محصول-خدمات تولید کنندگان می توانند عملکرد کلی محصولات خود را از جمله مصرف انرژی آنها را کنترل کرده و بهبود دهند.

در ادامه دو مطالعه موردی واقعی را ارائه می کنیم که استفاده از تکنولوژی های دیجیتال در آنها نه تنها باعث افزایش کارایی زیست محیطی و کاهش آلایندهی کربن این شرکت ها شده است؛ بلکه باعث افزایش بازدهی انرژی و کاهش ضایعات کارخانه ها و کاهش خطرات جانی و زیست محیطی نیز شده است.

### **مطالعه موردی اول : پتروشیمی های کوچک مقیاس تولید کلر قلیایی**

در تصفیه خانه های سنتی آب، محل تصفیه آب تا محل تولید کلر قلیایی فاصله زیادی دارد. به همین دلیل حجم زیادی از کلر این که ماده اولیه تصفیه آب است باید به صورت مایع درآمده و سپس از پتروشیمی محل تولید به تصفیه خانه ها انتقال داده شود که در صورت وجود ترک یا امکان وجود نشتی در خودروی حمل این سیال، می تواند به محیط زیست و سلامت انسان ها خسارات شدید و بعضاً جبران ناپذیری وارد شود.

اما امروزه به لطف تکنولوژی اینترنت اشیا و دیگر تکنولوژی‌های تولید دیجیتال پیشرفته، ساخت واحدهای کوچک مدولار تولید کننده کلر قلیایی در نزدیکی واحدهای تصفیه آب ممکن شده است و دیگر نیازی به طی کردن مراحل تغییر فاز کلرین، ذخیره سازی و انتقال آن با خودروهایی سنگین نیست. ضمن اینکه نگرانی از نشت این سیال هنگام انتقال نیز رفع شده است. شرکت اروگوئه‌ای AVS technology AG نمونه‌ای موفق از تولید کننده کلرین به روش‌های پایدار می‌باشد که از تکنولوژی‌های مذکور در طراحی خود بهره برده است و ادعا می‌کند که از نظر تجاری نیز کلرین تولید شده توسط پتروشیمی‌های این شرکت قابلیت رقابت اقتصادی با کلرین تولید شده به روش انبوه و سنتی را دارد.

شرکت AVS technology AG در سال ۲۰۰۹ به عنوان یک شرکت مشاور مهندسی در زمینه تولید کلر قلیایی شروع به فعالیت کرد و در پروژه‌هایی در آمریکا، استرالیا و آرژانتین مشارکت می‌نمود. فعالیت اصلی این شرکت در ابتدا منحصر به انجام توصیه‌هایی در زمینه‌های تکنولوژی به کارفرمایان خود در پروژه‌ها بود مانند کمک در طراحی تجهیزات پتروشیمی‌های کلرین. این شرکت به واسطه تجربه کاری خود، در سال ۲۰۱۲ موفق به توسعه اولین پتروشیمی کوچک مقیاس تولید کلر قلیایی شد.

ویژگی اصلی این پتروشیمی‌های کوچک مقیاس کنترل پذیری از راه دور آن‌ها از مرکزی در اروگوئه به واسطه استفاده از تکنولوژی اینترنت اشیا می‌باشد. سنسورهای موجود در این پتروشیمی اطلاعاتی مانند دما، فشار، سطح PH و ولتاژ سلول‌ها و ... را بلادرنگ به مرکز کنترل که دارای ارتباط ماشین به انسان است، ارسال می‌کند تا تیم بتواند فرآیند را از دور و بدون نیاز به حضور فیزیکی نظارت و هدایت کند و ایرادات را از راه دور شناسایی کنند. همچنین با استفاده از تکنولوژی‌های داده بزرگ می‌توان داده‌های جمع آوری شده را آنالیز کرد و خدماتی مانند ارتقاء بهره برداری از پتروشیمی را فراهم آورد. همچنین با این اطلاعات می‌توان طراحی‌های آینده را بهبود بخشید و پتروشیمی را کارا تر کرد.

طراحی نرم افزار این پروژه از همکاری شرکت AVS technology AG و یک شرکت تولید نرم افزار آرژانتینی صورت پذیرفته است. سنسورهای بکارگرفته شده در این پروژه، در بازار جهانی موجود هستند اما مطابق نیازهای هر پتروشیمی توسط شرکت مذکور به کار گرفته شده‌اند. نرم افزار مخصوص هر پتروشیمی و خرید سنسورها حدود ۱۰٪ الی ۱۵٪ هزینه نهایی ساخت یک پتروشیمی کوچک مقیاس توسط این شرکت را شامل می‌شود. در حال حاضر این شرکت جهت کاهش هزینه تولیدات خود در حال اقدام برای استفاده از تکنولوژی‌های تولید سه بعدی است تا بتواند برخی از قطعات سفارشی را، خود تولید کند. همچنین این کمپانی

از ثبت پتنت خودداری کرده و تصمیم گرفته است تا تکنولوژی نوآورانه خود را به صورت یک راز شرکتی نزد خود نگه دارد. همچنین در این مطالعه موردی نشان داده می‌شود که چگونه تکنولوژی‌های دیجیتال باعث استخدام افراد بیشتر در این کمپانی شده اند. در هنگام تأسیس، این شرکت تنها ۵ کارمند داشت (که همه اعضای هیئت مدیره فعلی شرکت هستند) اما اکنون این شرکت ۲۰ کارمند استخدام کرده است و قصد دارد که شعبه‌ای در اسپانیا برای ارتباط بهتر با مراکز تصفیه آب کشورهای آفریقای شمالی تأسیس کند.

به صورت کلی می‌توان گفت که ویژگی‌های ابداع انجام شده توسط کمپانی AVS technology AG در چهار مورد خلاصه کرد. اولین ویژگی این کار جلوگیری از صدمات ناشی از اتفاقات حمل و نقل کمر قلیایی می‌باشد. با این ابداع دیگر نیازی به حمل و نقل کمر قلیایی به شکل مایع در تانکرها و امکان نشت این سیال ناشی از تصادفات یا خرابی تانکرها وجود ندارد که برای سلامت مردم و حفظ محیط زیست حائز اهمیت می‌باشد. مورد دوم استفاده از تکنولوژی‌های اینترنت اشیا و تولید دیجیتالی پیشرفته باعث کاهش اتلاف در استفاده از مواد اولیه و کاهش مصرف انرژی شده است. علت کاهش مصرف انرژی در این مورد، بکارگیری یک سیستم غشائی از به عنوان الکترولیزر در فرآیند تولید کلرین است.<sup>۱</sup> ویژگی سوم، پایش از راه دور این پتروشیمی است که باعث انجام سریع تست‌های بهینگی انرژی و یافتن سریع علت انحراف از عملکرد بهینه سیستم شده و مهندسان می‌توانند در اسرع وقت جهت تعمیر و بازبینی دستور صادر کنند. ویژگی چهارم این تکنولوژی قابلیت ارتقای طراحی با توجه به داده‌های جمع آوری شده و بررسی و آنالیز آن‌ها می‌باشد که در این صورت پای یکی دیگر از ارکان انقلاب صنعتی چهارم به میدان توسعه و تحقیق باز می‌شود: تحلیل و مهندسی داده.

این مطالعه موردی به خوبی ساخت یک محصول زیست محیطی را نمایش می‌دهد. با تبدیل یک کالا (پتروشیمی کمر قلیایی) به یک کالا-خدمات (پتروشیمی کوچک مقیاسی کلرین و سیستم پایش در چرخه عمر) شرکت AVS technology AG موفق به دستیابی به این مهم شده است که مدل تجارتي شرکت را تغییر داده است.

---

<sup>۱</sup> به طور کلی فرآیند تولید کلرین یک فرآیند انرژی بر است، بطوری که ۴۰ درصد از قیمت تولید کلرین به روش سنتی، قیمت انرژی استفاده شده در فرآیند است.

## مطالعه موردی دوم: پنل‌های خورشیدی با راندمان بالا

در سال ۲۰۱۵ ساخت پروژه اولین کارخانه تولید پنل‌های خورشیدی در قرقیزستان در زمینی به مساحت ۱۰۰۰۰ متر مربع با همکاری دو کمپانی Babek LTD از قرقیزستان و Schmid group از آلمان آغاز شد که هدف آنی پروژه ساخت پنل‌های خورشیدی با آخرین تکنولوژی روز بود. این کارخانه سالانه ۵۰ مگاوات ظرفیت تولیدی دارد (به عبارتی ۲۰۰ هزار پنل در سال) و بازارهای اصلی این کارخانه کشورهای CIS و خاورمیانه هستند. این کارخانه که با نام New-Tek LLC شناخته می‌شود که از سال ۲۰۱۷ فعالیت خود را آغاز کرده است و درخواست‌هایی از کشورهای آمریکا، ایران، افغانستان و مغولستان جهت تأمین پنل خورشیدی مورد نیاز آن‌ها را داشته است.

علت بنا کردن این کارخانه نوین در کشور قرقیزستان موقعیت ژئوپولیتیک مناسب، آب و هوای مناسب و وجود مزایای اقتصادی در این کشور از جمله مالیات و عوارض گمرکی پایین بوده است. به علت واقع شدن این کارخانه در منطقه آزاد است که باعث معافیت آن‌ها از اکثر مالیات‌ها و وجود تنها ۲٪ مالیات بر درآمد کل می‌باشد و از پرداخت گمرک برای ارسال محصولات به مشتریان بین‌المللی معاف می‌باشند. این کارخانه موفق به استخدام ۳۵ نفر متخصص با دستمزد ۵۰۰ دلار در ماه شده است.

شرکت Schmid Group یکی از پیشروان تکنولوژی در دنیا است و خط تولید Montrak کارخانه New-Tek LLC که با پشتوانه همکار آلمانی این کارخانه ساخته شده است، از پیشرفته‌ترین تکنولوژی‌های تولید دیجیتال مانند ربات‌های صنعتی مجهز به سنسورهای کنترل کننده مواد متصل به سیستم کنترل مرکزی، بهره می‌برد. در هر مرحله از تولید این سنسورها اطلاعات زمانی حرکت مواد و اجزای تولید را مخابره می‌کنند و در صورت وجود اشکال یا جابجایی مواد، ربات‌های متصل به سنسور تا زمان رفع آن از کار می‌ایستند. همچنین بجای استفاده از چرخ نقاله‌های متداول در کارخانه‌ها از monorail استفاده می‌شود که با کاهش ارتعاشات در هنگام انتقال مواد، باعث عملکرد دقیق‌تر خط تولید می‌شود. این خط تولید اتوماتیک توسط کارکنانی زده که به علوم الکترونیسیته و IT مسلط هستند و در شرکت آلمانی همکار تعلیم دیده‌اند بهره برداری می‌شود. همچنین بخاطر وجود سنسورهای حساس در این خط تولید مهندسان با تجربه شرکت Schmid در مواقع لزوم می‌توانند به سرعت به اطلاعات مورد نیاز جهت رفع ایرادات دسترسی پیدا کنند. به همین علت این کارخانه توانایی تولید در حد مقدار نامی خود را دارد و زمان اتلاف شده کمی در عملکرد آن وجود دارد.

همچنین تولیدات این کارخانه از کیفیت بالایی برخوردارند. از یک طرف استفاده از مرغوب ترین سیلیکون-های موجود در بازار و استفاده از عناصر مورد تأیید بین المللی و از طرف دیگر سه مرتبه کنترل کیفیت و ثبت داده های آن در سرورهای مرکزی باعث توانایی رقابت بین المللی این واحد تولیدی و تولید پنل های با رتبه A شده است. پنل های خورشیدی این واحد تولیدی بیش از ۱۸٪ بازدهی دارند. کالاهای تولیدی این کارخانه به عنوان کالاهای زیست محیطی شناخته می شوند چرا که علاوه بر کارآیی بالا به علت تأمین انرژی کارخانه از پنل های تولیدی آن، هزینه های تولید ناشی از مصرف انرژی شدیداً پایین آمده است و استفاده از تکنولوژی های دیجیتال باعث کارکرد با حداکثر راندمان و حداقل سازی اتلاف مواد اولیه شده است. تولید این کارخانه تقریباً یک تولید کربن صفر است.

همچنین با استفاده از تکنولوژی های دیجیتال این کارخانه موفق به انجام یک نوآوری در زمینه تولید پنل های خورشیدی شده است. با استفاده از داده های سنسورها و تحلیل آن ها این شرکت موفق به کشف رابطه غیرخطی پلیمرسازی فیلم در فرآیند پخته شدن لایه های شیشه ای پنل های خورشید شده است. همچنین با استفاده از همین داده ها موفق به پی بردن به تأثیر برخی از پارامترهای تولید در تولید فیلم شد که در نهایت این روابط منجر به افزایش چند درصدی کارآیی پنل ها شد.

## فصل پنجم

### انقلاب صنعتی پنجم

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

مفهوم انقلاب صنعتی چهارم در بین شرکت‌کنندگان از سازمان‌های تحقیقاتی و فناوری و همچنین آژانس‌های سرمایه‌گذاری در سراسر اروپا در دو کارگاه مجازی که توسط اداره DG Research and Innovation در ۲ و ۹ ژوئیه ۲۰۲۰ برگزار شد، مورد بحث قرار گرفت.

اگرچه Industry 5.0 یک مفهوم نسبتاً جدید است، برخی نوشته‌های آکادمیک اولیه که ویژگی‌های اصلی این مفهوم را توصیف می‌کنند وجود دارد. Industry 5.0 عدم قطعیت زیادی را در مورد اینکه چه چیزی به ارمان خواهد آورد و چگونه تجارت را با جزئیات مختل می‌کند، و همچنین در مورد پتانسیل آن برای از بین بردن موانع بین دنیای واقعی و onexi مجازی نشان می‌دهد.

بر اساس بررسی ادبیات و تحلیل آینده‌نگر، ما معتقدیم صنعت ۵,۰ با هدفمندی مجدد و گسترده تعریف می‌شود، که فراتر از تولید کالاها و خدمات برای کسب سود است. این هدف گسترده تر سه عنصر اصلی را تشکیل می‌دهد: انسان محوری، پایداری و تاب آوری.

رویکرد صرفاً مبتنی بر سود به طور فزاینده‌ای غیرقابل دفاع شده است. در دنیای جهانی شده، تمرکز محدود بر سود نمی‌تواند هزینه‌ها و منافع زیست محیطی و اجتماعی را به درستی محاسبه کند. برای اینکه صنعت به تامین‌کننده شکوفایی واقعی تبدیل شود، تعریف هدف واقعی آن باید شامل ملاحظات اجتماعی، زیست محیطی و اجتماعی باشد. این شامل نوآوری مسئولانه است، نه تنها یا عمدتاً با هدف افزایش کارایی هزینه یا حداکثر کردن سود، بلکه همچنین در افزایش رفاه برای همه درگیرها: سرمایه‌گذاران، کارگران، مصرف‌کنندگان، جامعه و محیط زیست.

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی



شکل ۸: انقلاب صنعتی پنجم

رویکرد انسان محور در صنعت به جای اینکه فناوری نوظهور را به عنوان نقطه شروع و بررسی پتانسیل آن برای افزایش کارایی قرار دهد، نیازها و علایق اصلی انسان را در قلب فرآیند تولید قرار می دهد. به جای اینکه بپرسیم با فناوری جدید چه کاری می توانیم انجام دهیم، می پرسیم که فناوری چه کاری می تواند برای ما انجام دهد. به جای اینکه از کارگر صنعت بخواهیم مهارت های خود را با نیازهای فناوری به سرعت در حال تکامل تطبیق دهد، ما می خواهیم از فناوری برای تطبیق فرآیند تولید با نیازهای کارگر استفاده کنیم، به عنوان مثال. برای راهنمایی و تربیت او همچنین به این معنی است که اطمینان حاصل شود که استفاده از فناوری های جدید به حقوق اساسی کارگران مانند حق حریم خصوصی، استقلال و کرامت انسانی لطمه نمی زند.

برای اینکه صنعت به مرزهای سیاره ای احترام بگذارد، باید پایدار باشد. نیاز به توسعه فرآیندهای دایره ای دارد که از منابع طبیعی استفاده مجدد، استفاده مجدد و بازیافت، ضایعات و اثرات زیست محیطی را کاهش دهد. پایداری به معنای کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای، جلوگیری از تهی شدن و تخریب منابع طبیعی، تامین نیازهای نسل امروز بدون به خطر انداختن نیازهای نسل های آینده است. فناوری هایی مانند هوش مصنوعی و تولید مواد افزودنی می توانند با بهینه سازی بهره وری منابع و به حداقل رساندن ضایعات، نقش مهمی در اینجا ایفا کنند

تاب آوری به نیاز به توسعه درجه بالاتری از استحکام در تولید صنعتی، مسلح کردن بهتر آن در برابر اختلالات و اطمینان از اینکه می تواند زیرساخت های حیاتی را در مواقع بحران ارائه و پشتیبانی کند، اشاره دارد. تغییرات ژئوپلیتیکی و بحران های طبیعی، مانند همه گیری کووید-۱۹، شکنندگی رویکرد فعلی ما برای تولید جهانی شده را برجسته می کند. باید با توسعه زنجیره های ارزش استراتژیک به اندازه کافی انعطاف پذیر، ظرفیت



## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

تولید قابل انطباق و فرآیندهای تجاری انعطاف‌پذیر متعادل شود، به‌ویژه جایی که زنجیره‌های ارزش نیازهای اساسی انسان مانند مراقبت‌های بهداشتی یا امنیت را برآورده می‌کنند.

# فصل ششم

## نتیجه گیری

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

انقلاب صنعتی چهارم و توسعه پایدار دارای ویژگی‌های قابل توجهی هستند. دانشگاه در ابتدا پیامدهای پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم را به فرصت‌های صرفه جویی در انرژی که تولید دیجیتال و به هم پیوسته ممکن است ارائه دهد، محدود کرد، که ریشه در تعریف تولید محور انقلاب صنعتی چهارم دارد. با این حال، مطالعه حاضر نشان داد که انقلاب صنعتی چهارم به پایداری انرژی در درجه اول از طریق تحول دیجیتال صنعت انرژی و بهبود روش‌های تولید در صنایع مختلف کمک می‌کند. همکاران صنعتی امروزه انقلاب صنعتی چهارم را به عنوان تحول دیجیتالی زنجیره‌های ارزش صنعتی در کل خود، از جمله صنعت انرژی، در نظر می‌گیرند. در حقیقت فن‌آوری‌های دیجیتال ۴,۰، صنعت انرژی را قادر می‌سازد تا چشم‌انداز عملیاتی خود را طبق توسعه پایدار تغییر شکل دهد. مطالعه حاضر نشان داد که مشارکت ۴,۰ در پایداری انرژی با دیجیتالی کردن بخش تامین‌بخش انرژی، به ویژه از طریق کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری نیروگاه‌های برق و تولید انرژی، افزایش بهره‌وری و ایمنی شبکه‌های انتقال انرژی و افزایش قابلیت دید کلی و کنترل بر تولید انرژی و عملیات تحول، آغاز می‌شود. روش‌های تولید بهبودیافته و ظهور فناوری‌های تولید دیجیتال مانند روباتیک هوشمند، دوقلوهای دیجیتال، فناوری‌های کمکی، و تولید افزودنی فرصت‌های پایداری انرژی لرزه‌ای مانند فرآیندهای تولید کارآمدتر انرژی، محصولات با منابع کمتر، و تولید کارآمد تجهیزات تولید انرژی پیشرفته را ارائه می‌دهند. به عنوان مثال، ربات‌های هوشمند با کنترل بهینه هوش مصنوعی می‌توانند زمان تولید کمتری را ارائه دهند و در عین حال مصرف انرژی را کاهش دهند. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که تسهیل مدیریت انرژی هوشمند یکی دیگر از عملکردهای پایدارتر انرژی، فوری‌تر انقلاب صنعتی چهارم است. ویژگی ارتباط متقابل مبتنی بر اینترنت اشیا انقلاب صنعتی چهارم مستلزم داشتن تمام اجزای شبکه‌های ارزش صنعتی برای داشتن هویت دیجیتال و تبادل مداوم داده‌ها در زمان واقعی است. با جمع‌آوری، ترکیب و استخراج داده‌های انرژی خاص، انقلاب صنعتی چهارم استفاده آگاهانه از اطلاعات انرژی را امکان‌پذیر می‌سازد و توسعه یک سیستم مدیریت هوشمند و آگاه از انرژی را تسهیل می‌کند که به دنبال مصرف بهینه انرژی است.

کمک‌های انقلاب صنعتی دیجیتال به پایداری انرژی فراتر از هوشمندسازی صنعت انرژی و زنجیره تامین است، زیرا مطالعه حاضر نشان داد که انقلاب صنعتی چهارم همچنین دیجیتالی شدن بخش تقاضای انرژی را تسريع می‌کند. انقلاب صنعتی چهارم مستلزم دیجیتالی کردن همه نهادها در زنجیره ارزش صنعتی، از جمله ماشین‌آلات تولید، محصولات هوشمند و مشتریان هوشمند است تا از طریق IIoT، IoS و IoD به هم متصل شوند و در زمان واقعی با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. دیجیتالی کردن مصرف کنندگان نهایی انرژی در زمینه انقلاب صنعتی چهارم فرصت‌های پایداری انرژی بسیار زیادی را از طریق امکان تجزیه و تحلیل الگوی مصرف انرژی، ادغام تامین کننده و مصرف کننده نهایی انرژی، استقرار شبکه هوشمند و ادغام فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر به ارمغان می‌آورد. با این وجود، بهره‌وری انرژی در سطح تحلیل کارخانه هوشمند هنوز یکی از کمک‌های اساسی انقلاب صنعتی چهارم به پایداری انرژی است. انقلاب صنعتی چهارم این تابع پایداری انرژی را با ایجاد امکان بهبود کلی در شیوه‌های مدیریت تولید، کنترل برنامه‌ریزی تولید و فرآیندهای تصمیم

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

گیری در سراسر شبکه‌های تولیدی ارائه می‌دهد. به عنوان یکی از ویژگی‌های طراحی حیاتی انقلاب صنعتی چهارم، کارخانه هوشمند با اجزای به هم پیوسته، شفافیت داده‌ها، قابلیت همکاری و چابکی مشخص می‌شود. این ویژگی‌ها که با قابلیت‌های پردازش اطلاعات ارائه‌شده توسط شبیه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی، داده‌کاوی، و محاسبات ابری تکمیل می‌شوند، امکان نظارت مستمر در زمان واقعی کل فرآیندهای تولید را در کارخانه‌های هوشمند فراهم می‌کنند که به نوبه خود امکان تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر و قابلیت اطمینان تولید فعال‌تر را فراهم می‌کند. ارزیابی و برنامه‌ریزی تولید پویا در حمایت از پایداری انرژی می‌دهد.

در نهایت، نتایج نشان داد که عملکرد صنعت SNPD 4.0 تولیدکنندگان را قادر می‌سازد تا مدل‌های توسعه محصول و تولید جدیدی را که پایداری انرژی را ارتقا می‌دهند، به کار گیرند. به طور خاص، تولید دیجیتال و به هم پیوسته شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا حجم عظیمی از داده‌های جمع‌آوری‌شده در کل چرخه عمر محصولات را از فرآیند طراحی، ساخت، استفاده و مرحله پایان عمر پردازش کنند تا کارایی محصولات جدید را بهبود بخشند. تلاش برای طراحی محصول تلاش‌های توسعه محصول جدید مبتنی بر داده‌ها، تکمیل شده با فناوری‌های دیجیتال برای طراحی، مهندسی و ساخت محصولات، راه را برای معرفی کالاهای مصرفی دوستدار انرژی هموار می‌کند.

مطالعه حاضر در حین توصیف مشارکت‌های بالقوه انقلاب صنعتی چهارم در پایداری انرژی، دیدگاه خوش‌بینانه‌ای داشت، عمدتاً به این دلیل که این دستور کار تحقیقاتی در مراحل اولیه خود است و دانشگاه هنوز شواهد تجربی بیشتری از هرگونه ارتباط نامطلوب دیجیتالی‌سازی-پایداری انرژی ارائه نکرده است. به طور گذشته نگر، نیروی برهم زننده انقلاب صنعتی چهارم و انقلاب صنعتی دیجیتال ممکن است نگرانی‌های پایداری را در پی داشته باشد، و از تحقیقات آتی دعوت می‌شود تا این پیامدهای پایداری غیرقابل مشاهده را که به طور قابل‌تصور در مطالعه حاضر قابل‌رسیدگی نیستند، موشکافی کنند. از نظر تئوری، پایداری انرژی بخشی جدایی‌ناپذیر از انقلاب صنعتی چهارم است. با این وجود، تحول دیجیتالی صنایع در بیشتر کشورهای صنعتی عمدتاً ناشی از رقابت است. اگرچه پایداری انرژی ممکن است یک اثر جانبی مورد استقبال باشد، اما ممکن است یک هدف استراتژیک برای پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتالی انقلاب صنعتی چهارم نباشد. به طور پیوسته، جوامع دانشگاهی و صنعتی باید اهداف پایداری انرژی را در عین بازتعریف مرزهای مسئولیت اجتماعی شرکت در محیط انقلاب صنعتی چهارم بشناسند.

علاوه بر این، اثر بازگشت مجدد در زمینه پایداری انرژی انقلاب صنعتی چهارم تا به امروز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. کالاهای مصرفی ارزان‌تر، شخصی‌سازی محصول، محصولات هوشمند با صرفه‌جویی در مصرف انرژی، فرآیندهای تولید بهینه‌تر، و کارایی تامین انرژی از مزایای رایج انقلاب صنعتی چهارم هستند. با این حال، این نتایج مثبت و بهره‌وری انرژی مورد انتظار که توسط انقلاب صنعتی چهارم وعده داده شده است، ممکن است با تغییر رفتار مصرف‌کننده خنثی شود و مصرف انرژی خالص را به طور متناقضی از سطوح مطلوب فراتر رود. انتقال انقلاب صنعتی چهارم مستلزم تغییرات لرزه‌ای مانند جایگزینی انسان با ربات‌های

## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

هوشمند و ایجاد مراکز داده عظیم و پر قدرت است که ممکن است بیشتر به اثر بازگشتی کمک کند. بنابراین، درک اینکه چگونه انقلاب صنعتی دیجیتال معروف به انقلاب صنعتی چهارم ممکن است بر رفتار مصرف انرژی در سطح کلان (به عنوان مثال، بازار مصرف) و سطح خرد (به عنوان مثال، کارخانه‌های هوشمند) تأثیر بگذارد، یک راه تحقیقاتی هیجان‌انگیز برای مطالعات آینده است.

## منابع

- (1) Grigoroudis, E., Kouikoglou, V.S., Phillis, Y.A., Kanellos, F.D., 2019. Energy sustainability: a definition and assessment model. *Operational Res.* 1e41 (Forthcoming)
- (2) Mangla, S.K., Luthra, S., Jakhar, S., Gandhi, S., Muduli, K., Kumar, A., 2020. A step to clean energy-Sustainability in energy system management in an emerging economy context. *J. Clean. Prod.* 242, 118462.
- (3) Prashar, A., 2019. Towards sustainable development in industrial small and medium-sized enterprises: an energy sustainability approach. *J. Clean. Prod.* 235, 977e996.
- (4) Nara, E.O.B., da Costa, M.B., Baierle, I.C., Schaefer, J.L., Benitez, G.B., do Santos, L.M.A.L., Benitez, L.B., 2020. Expected impact of Industry 4.0 technologies on sustainable development: a study in the context of Brazil's plastic industry. *Sustain. Prod. Consum.* 25, 102e122.
- (5) Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., Sarkis, J., 2020. Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective. *Int. J. Prod. Econ.* 221 (1), 107776.
- (6) Machado, C.G., Winroth, M.P., Ribeiro da Silva, E.H.D., 2020. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *Int. J. Prod. Res.* 58 (5), 1462e1484.
- (7) Lange, S., Pohl, J., Santarius, T., 2020. Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? *Ecol. Econ.* 176, 106760.
- (8) Scharl, S., Praktijnjo, A., 2019. The Role of a digital industry 4.0 in a renewable energy system. *Int. J. Energy Res.* 43 (8), 3891e3904.
- (9) Buer, S.-V., Strandhagen, J.O., Chan, F.T., 2018. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. *Int. J. Prod. Res.* 56 (8), 2924e2940.
- (10) Sony, M., Naik, S., 2020. Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: a systematic review and proposed theoretical model. *Technol. Soc.* 61, 101248.
- (11) Fathi, M., Ghobakhloo, M., 2020. Enabling mass customization and manufacturing sustainability in Industry 4.0 Context: a novel heuristic algorithm for in-plant material supply optimization. *Sustainability* 12 (16), 6669.
- (12) Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., Habich, M., 2020. Industry 4.0: how it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes. A literature review. *J. Clean. Prod.* 229 (1), 120856.
- (13) Yli-Ojanpera, M., Sierla, S., Papakonstantinou, N., Vyatkin, V., 2019. Adapting an agile manufacturing concept to the reference architecture model industry 4.0: a survey and case study. *J. Industrial Information Integration* 15, 147e160.
- (14) Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Godinho Filho, M., Roubaud, D., 2018. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Ann. Oper. Res.* 270 (1e2), 273e286.
- (15) Nota, G., Nota, F.D., Peluso, D., Toro Lazo, A., 2020. Energy efficiency in Industry 4.0: the case of batch production processes. *Sustainability* 12 (16), 6631.
- (16) Frank, A.G., Dalenogare, L.S., Ayala, N.F., 2019. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. *Int. J. Prod. Econ.* 210, 15e26.
- (17) Olayh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M.A., Haddad, H., Kitukutha, N., 2020. Impact of industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability* 12 (11), 4674.

- (18) Yadav, G., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J.A., Kumar, V., Batista, L., 2020. A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies' enablers. *Comput. Ind.* 122, 103280.
- (19) Byrne, J., Taminiau, J., 2016. A review of sustainable energy utility and energy service utility concepts and applications: realizing ecological and social sustainability with a community utility. *Wiley Interdisciplinary Rev.: Energy Environ.* 136e154.
- (20) García-Muñoz, F.E., Medina-Salgado, M.S., Ferrari, A.M., Cucchi, M., 2020. Sustainability transition in Industry 4.0 and smart manufacturing with the triple-layered business model canvas. *Sustainability* 12 (6), 2364.
- (21) Cai, W., Lai, K.-h., Liu, C., Wei, F., Ma, M., Jia, S., et al., 2019. Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Sci. Total Environ.* 665 (1), 23e32.
- (22) Agrawal, R., Vinodh, S., 2019. Application of total interpretive structural modelling (TISM) for analysis of factors influencing sustainable additive manufacturing: a case study. *Rapid Prototyp. J.* 25 (7), 1198e1223.
- (23) Dubey, R., Gunasekaran, A., Sushil, Singh, T., 2015. Building theory of sustainable manufacturing using total interpretive structural modelling. *Int. J. Syst. Sci.: Operations Logistics*, 231e247.
- (24) Ghobakhloo, M., Fathi, M., Fontes, D.B.M.M., Ching, N.T., 2018. Modeling lean manufacturing success. *J. Model. Manag.* 13, 908e931.
- (25) Kaswan, M.S., Rath, R., 2019. Analysis and modeling the enablers of green lean six sigma implementation using interpretive structural modeling. *J. Clean. Prod.* 231, 1182e1191.
- (26) Noussan, M., Tagliapietra, S., 2020. The effect of digitalization in the energy consumption of passenger transport: an analysis of future scenarios for Europe. *J. Clean. Prod.* 258, 120926.
- (27) Aheleroff, S., Xu, X., Lu, Y., Aristizabal, M., Velásquez, J.P., Joa, B., Valencia, Y., 2020. IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: a case study. *Adv. Eng. Inf.* 43, 101043.
- (28) Da Silva, F.S.T., Dda Costa, C.A., Crovato, C.D.P., Da Rosa Righi, R., 2020. Looking at energy through the lens of Industry 4.0: a systematic literature review of concerns and challenges. *Comput. Ind. Eng.* 143, 106426.
- (29) Di Silvestre, M.L., Favuzza, S., Sanseverino, E.R., Zizzo, G., 2018. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 93, 483e498.
- (30) Scharl, S., Praktijnjo, A., 2019. The Role of a digital industry 4.0 in a renewable energy system. *Int. J. Energy Res.* 43 (8), 3891e3904.
- (31) Verhoef, L.A., Budde, B.W., Chockalingam, C., Nodar, B.G., van Wijk, A.J., 2018. The effect of additive manufacturing on global energy demand: an assessment using a bottom-up approach. *Energy Pol.* 112, 349e360.
- (32) Willis, D., Niezrecki, C., Kuchma, D., Hines, E., Arwade, S., Barthelmie, R., et al., 2018. Wind energy research: state-of-the-art and future research directions. *Renew. Energy* 125, 133e154.
- (33) Esmaeilian, B., Sarkis, J., Lewis, K., Behdad, S., 2020. Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resour. Conserv. Recycl.* 163, 105064.
- (34) Wu, Z., Yang, K., Yang, J., Cao, Y., Gan, Y., 2019. Energy-efficiency-oriented scheduling in smart manufacturing. *J. Ambient Intelligence Humanized Comput.* 10 (3), 969e978.

- (35) Wang, W., Yang, H., Zhang, Y., Xu, J., 2018. IoT-enabled real-time energy efficiency optimisation method for energy-intensive manufacturing enterprises. *Int. J. Comput. Integrated Manuf.* 31 (4e5), 362e379.
- (36) Pessoa, M.V.P., Becker, J.M.J., 2020. Smart design engineering: a literature review of the impact of the 4th industrial revolution on product design and development. *Res. Eng. Des.* 31 (1), 175e195.
- (37) Marchi, B., Zanoni, S., 2017. Supply chain management for improved energy efficiency: review and opportunities. *Energies* 10 (10), 1618.
- (38) S. T. Roberts, "Digital Refuse: Canadian Garbage, Commercial Content Moderation and the Global Circulation of Social Media's Waste," *Media studies publication, Western University*.
- (39) Z. Chen and X. Mingjie, "Upgrading of textile manufacturing based on Industry 4.0.," *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*, pp. 2143-2146, 2015.
- (40) X. Lemaire, "Glossary of Terms in Sustainable Energy Regulation.," [Online]. Available: <http://www.reeep.org/sites/default/files/Glossary%20of%20Terms%20in%20Sustainable%20Energy%20Regulation.pdf>. [Accessed 29 March 2017].
- (41) B. Brand, "Les énergies renouvelables et la digitalisation des systèmes électriques.," *Tendances et défis pour les pays de la région*, 2017. [Online]. Available: [http://www.enerpirica.com/download/Enerpirica\\_MENA\\_Digitalisation\\_14-02-2017.pdf](http://www.enerpirica.com/download/Enerpirica_MENA_Digitalisation_14-02-2017.pdf).
- (42) K. Ashton, "That "Internet of thing" thing," *RFID Journal*, 2009.
- (43) A. De Mauro and et al., "What is big data? A consensual definition and a review of key research topics," in *AIP Conference Proceedings*, 2015.
- (44) M. Lycett, "'Datafication': making sense of (big) data in a complex world," *European Journal of Information Systems*, vol. 22, pp. 381-386, 2013.
- (45) J. Gantz and D. Reinsel, "The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation?," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 114, pp. 254-280, 2017.
- (46) UN Big Data Global Working Group Task Teams, "Using Big Data for the Sustainable Development Goals — UN GWG for Big Data," UNSTATS, 2014.
- (47) IRENA, "Innovation Outlook: Renewable Mini-grids," IRENA, 2016.
- (48) IEA, "World Energy Outlook," IEA, 2016.
- (49) M. Crosby and et al., "Blockchain technology: Beyond bitcoin," *Applied Innovation Review*, vol. 2, 2016.
- (50) C. Burger, A. Kuhlmann, P. Richard and J. Weinmann, "Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry," *Deutsche EnergieAgentur GmbH (dena)*, 2016.
- (51) B. Brand, "Les énergies renouvelables et la digitalisation des systèmes électriques.," *Tendances et défis pour les pays de la région MENA*, 2017.
- (52) S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1573-1587, 2016.



## انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

## **Abstract**

Understanding the relevance and interactions of the Industry 4.0 and sustainability is a complex research topic. This project tries to explain how and methods to help Industry 4.0 in energy sustainability. This section is a qualitative review of the literature of Industry 4.0 and identifies how primary energy sustainability works. Interpretive structural modeling technique is also used to express and plot the relationships between different energy stability functions. With the development of the interpretive model and its analysis, a better understanding of Industry 4.0 and energy sustainability interactions was formed. Then, the issue of sustainability in production in the Industry 4.0 is examined. The following two case studies of small-scale petrochemicals producing alkaline chlorine and high-efficiency solar panels will be analyzed, and finally, a brief description of the Fifth Industrial Revolution will be provided. Research shows that Industry 4.0 improves energy sustainability through a complex interconnected mechanism. Contrary to popular belief, increasing productivity in production by digitizing the manufacturing industry is not the most critical result of digital industrial transformation in the productivity. Industry 4.0 primarily contributes to energy sustainability and enables the energy industry to change its operational landscape and use more innovative and sophisticated energy generation and distribution equipment. Digitization of the energy demand sector and the manufacturing industry and introducing more intelligent and more sustainable products are among the main opportunities of Industry 4.0 for energy sustainability. In general, the study and the ISM model of developed energy stability explain how Industry 4.0 contributes to energy sustainability through various functions and how each function is placed in the structural model based on the driving force and its dependence.

**Keywords:** Industry 4.0, sustainability, production, ISM model

انقلاب صنعتی چهارم و انرژی

**Sharif University of Technology**  
**Department of Energy Engineering**

**Title of Project**  
**Industry 4.0 & Energy**

**Supervisor**  
**Dr. Abbas Rajabi**

**Advisor**  
**Kian Ebtekar**  
**Amir Hossein Bagherzadeh**

February– 2022