نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۱-۱۷

تحلیل شکست‌های سیستمی توسعه فناوری پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با استفاده از نظام نوآوری فناورانه

علی شفیعی علویجه
دانشجوی دکتری تخصصی، سیاست‌گذاری علم و فناوری، دانشگاه تربیت مدرس
ali_shafiei@modares.ac.ir

سیدسپهر قاضی نوری نائینی
استاد سیاستگذاری علم و فناوری، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول)
ghazinoory@modares.ac.ir

محمدمهدی اخلاقی
دانشجوی دکتری تخصصی، سیاست‌گذاری علم و فناوری، دانشگاه تربیت مدرس
m_akhlaghi@modares.ac.ir

داور ابراهیمی
هیات علمی، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر
Debrahimi@nri.ac.ir

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۵/۰۲

کلمات کلیدی:
نظام نوآوری فناورانه،
پمپ حرارتی زمین‌گرمایی،
عوامل بافتاری،
شکست سیستمی

چکیده

با توجه به شرایط فعلی صنعت برق کشور، توسعه فناوری‌هایی نظیر پمپ حرارتی زمین‌گرمایی که علاوه بر کاهش مصرف برق، توانایی پیک‌سایی در تابستان را دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این فناری در دنیا به مرحله بلوغ خود رسیده است و به دلیل جذابیت‌های زیاد، به صورت گسترده در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گرفته شده است، ولی با این حال مراحل توسعه آن در ایران موفقیت آمیز نبوده است. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل شکست‌های مسیر توسعه فناوری پمپ حرارتی زمین‌گرمایی از طریق مدلی مناسب است. این تحلیل مهم‌ترین ابزار برای سیاست‌گذاری در این حوزه محسوب می‌شود. به این منظور در این مقاله با رویکرد توجه به عوامل بافتاری، مدلی برای تحلیل نظام نوآوری فناورانه پیشنهاد و پیاده‌سازی شد. در مسیر پیاده‌سازی مدل، موانع توسعه فناوری پمپ حرارتی زمین‌گرمایی از طریق مصاحبه عمیق با خبرگان این حوزه استخراج شد. نتایج مطالعات این پژوهش منتج به دو دسته توصیه سیاستی مناسب برای توسعه پمپ حرارتی زمین‌گرمایی شد. نتایج این تحقیق نشان داد درنظرگرفتن عوامل بافتاری در تحلیل نظام ملی نوآوری شکست‌های سیستمی جامع‌تری را شناسایی نموده و توصیه‌های سیاستی متنوع‌تری ارائه می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

۱- مقدمه

سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی[1] (GHP) از جمله سیستم‌های گرمایشی- سرمایشی است که به دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، اهمیت زیادی در دنیا دارد. عملکرد مطلوب GHP (نظیر تأمین هم‌زمان گرمایش و سرمایش، کاهش مصرف انرژی ساختمان و افزایش بازده انرژی در ساختمان) به‌گونه‌ای است که باعث توسعه روزافزون و استقبال زیاد از این سیستم‌ها در دنیا شده است.

کشور ایران به دلیل دسترسی مناسب به منابع انرژی زمین‌گرمایی، پتانسیل مناسبی برای استفاده از این فناوری دارد.(Yousefi, Ehara, and Noorollahi 2007) از آنجایی که در حال حاضر کشور ایران با مشکل پیک برق در تابستان روبرو ست، این فناوری با خاصیت پیک سایی می‌تواند به یک فناوری کلیدی و راهگشا تبدیل شود. استفاده از این سیستم، در حدود ۱۴ سال پیش در کشور آغاز شده است ولی در این سال‌ها پروژه‌های بسیار کمی در شهرهای طالقان، رشت، مشکین شهر، اهواز و بندرعباس به بهره برداری رسیده‌اند (Faride Etabi, Seyed Mohammadreza Heybati, and Setareh Mehrkhu 1393). بنابراین به رغم گذشت بیش از یک دهه از ورود این فناوری به کشور، توسعه آن در مراحل اولیه متوقف شده است. مطالعات مختلفی که در حوزه GHP در کشور انجام شده عمدتاً به پتانسیل سنجی، امکان سنجی و ارزیابی عملکرد آن پرداخته‌اند و مطالعه جامعی برای شناسایی عوامل عدم توسعه آن انجام نشده است. فرآیند توسعه یک فناوری در فضای بسته بدون ارتباط با محیط رخ نمی‌دهد، بلکه با ایجاد شرایط مناسب، فناوری جدید مسیر توسعه خود را از مرحله تولد تا بلوغ طی می‌کند؛ بنابراین زمانی که فرآیند توسعه یک فناوری با شکست مواجه شود، لازم است با مدلی مناسب، عوامل شکست‌ها شناسایی شده و سیاست‌های مناسب به‌گونه‌ای انتخاب شوند که آن شکست‌ها برطرف شده و فناوری مسیر توسعه خود را ادامه دهد. براین‌اساس، پرسش اصلی این مقاله بدین صورت مطرح شد: عوامل شکست در مسیر توسعه GHP در ایران چه بوده است؟ و اینکه با چه مدلی می‌توان این شکست‌ها را به‌صورت جامع شناسایی و تحلیل نمود؟

یکی از چارچوب‌های کاربردی برای تحلیل فرآیند توسعه یک فناوری، تحلیل ساختاری_کارکردی[2] نظام نوآوری فناورانه[3] آن است. به نظر نویسنده رویکرد درون‌گرای این چارچوب، در شناسایی شکست‌های سیستمی که منشأ بیرون از نظام نوآوری فناوری موردنظر دارند ضعف دارد. از همین رو در این مقاله ابتدا مدلی ۷ مرحله‌ای برای تحلیل نظام نوآوری فناورانه با درنظرگرفتن همزمان عوامل درونی و بیرونی از نظام نوآوری[4] ارائه شد. سپس این مدل برای فناوری GHP اجرا شد. در نهایت تلاش شد نتایج تحلیل از طریق این مدل با نتایج تحلیل ساختاری کارکردی نظام نوآوری فناورانه مقایسه شود.

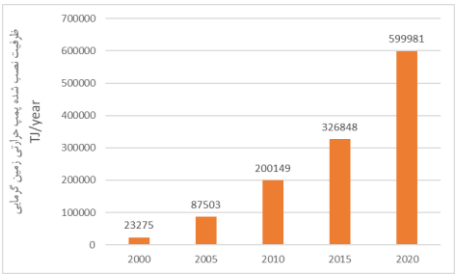
۲- مرور ادبیات

۲-۱- مرور ادبیات پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

سیستم GHP از جمله سیستم‌های گرمایشی- سرمایشی است که به دلیل میزان مصرف انرژی پایین، در مقایسه با سایر سیستم‌های تهویه‌مطبوع در جهان از اهمیت زیادی برخوردار شده است. در حال حاضر GHP یکی از گسترده‌ترین موارد کاربرد انرژی زمین‌گرمایی در سراسر جهان محسوب می‌شوند. (شکل ۱)

1 Geothermal Heat Pump (GHP)
2 Structural-Functional Analysis
3 Technological Innovation System (TIS)
4 Innovation System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۱ روند تغییرات ظرفیت نصب‌شده GHP در جهان طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تراژول در سال (Lund and Toth 2021)

اگرچه بیشتر GHP نصب‌شده در کشورهای واقع در آمریکای شمالی، قاره اروپا و چین هستند، اما تعداد کشورهایی که در آن‌ها میزان نصب سیستم‌های GHP، افزایش قابل‌توجهی داشته است و از ۲۶ کشور در سال ۲۰۰۰، به ۳۳ کشور در سال ۲۰۰۵، ۴۳ کشور در سال ۲۰۱۰ و ۴۸ کشور در سال ۲۰۱۵ و به ۵۴ کشور در سال ۲۰۲۰ افزایش‌یافته است. (Toth 2010) جذابیت روزافزون GHP سبب شده، مطالعات زیادی در دنیا به‌منظور توسعه آن به‌ویژه در بخش مسکن صورت پذیرد. تعدادی از این مطالعات (Allouhi 2022; Farzanehkhameneh 2020; Ghoreishi 2017; Habibzadeh 2019 Farzanehkhameneh 2020; Hu et al. 2022; Zurmuhl 2019) به ارزیابی فنی اقتصادی GHP پرداخته‌اند. برخی دیگر از این مطالعات عملکرد آن را در شرایط خاص مورد بررسی قرار داده‌اند و یا عملکرد آن را با سایر گزینه‌ها مقایسه نموده‌اند (Dai, Lee, Kim, and Im 2017 Li, and Wang 2015; Eriksson and Vamling 2007; Gaigalis et al. 2016; Majuri 2016;). تعدادی از این مطالعات Setiawan et al. 2022) نیز اثر سیاست‌های مختلف را در توسعه GHP در یک بخش خاص مورد بررسی قرار داده‌اند. اما به نظر می‌رسد مطالعه علمی که تلاش کند توسعه GHP در بخش مسکن را به روشی یکپارچه و جامع، با نگاهی به عوامل فنی، اقتصادی و عوامل محسط بیرونی مانند ویژگی‌های بخش تحلیل نماید وجود ندارد. (Kieft, Harmsen, and Hekkert 2021) در ایران نیز مطالعاتی در حوزه GHP صورت گرفته است. بخشی از این مطالعات با استفاده از مدل‌های مختلف، پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی در ایران را محاسبه نموده‌اند (Yousefi et al. 2007). بخش دیگر با استفاده از مطالعات امکان‌سنجی و یا مدلسازی، به پتانسیل GHP در ایران و معرفی مناطق با پتانسیل بالا پرداخته‌اند(Yousefi et al. 2018، Nourollahi Younes et al. 1395). تعداد زیادی از آن‌ها نیز به مطالعه موردی عملکرد GHP در یک یا چند منطقه از ایران پرداخته‌اند (Yousefi Hossein et al. 1395). بخش دیگری از مطالعات نیز به طراحی، مدلسازی و یا شبیه‌سازی یک سیستم GHP پرداخته‌اند Chahartaghi et al. 2019، Noorollahi et al. 2016). دسته‌ای دیگر از مطالعات، به تاریخچه توسعه GHP در ایران و مزایا توسعه آن پرداخته‌اند (Noorollahi et al. 2019). بر اساس مرور ادبیات صورت گرفته در ایران، در بیشتر مطالعات موجود به شناسایی ظرفیت نصب و ارزیابی عملکرد GHP پرداخته شده‌اند و در هیچ مطالعه‌ای، عدم توسعه آن در کشور به‌صورت جامع مورد تحلیل قرار نگرفته است.

۲-۲- مرور بر ادبیات نظام نوآوری فناورانه

نظام نوآوری فناورانه (TIS[1]) یک چارچوب برای فهم چگونگی توسعه یک فناوری ارائه می‌دهد. در ادبیات، TIS به دو بخش اصلی ساختاری و کارکردی تقسیم می‌شود (Jacobsson and Bergek 2011). ساختار TIS شامل بازیگران، نهادها و تعاملات میان آن‌هاست و کارکردهای TIS شامل توسعه دانش، انتشار دانش، تأمین منابع، کارآفرینی، جهت‌دهی، شکل‌دهی به بازار و مشروعیت‌بخشی[2] است (Hekkert et al. 2007). زمانی که عملکرد یک TIS رضایت‌بخش نباشد، اصطلاحاً شکست سیستمی رخ داده و آن را ناشی از ضعف در ساختار آن می‌دانند (Wieczorek and Hekkert 2012)؛ بنابراین برای شناسایی شکست‌های سیستمی باید ساختار آن مورد بررسی قرار گیرد و به این منظور نیز معمولاً کارکردهای آن نظام مورد ارزیابی می‌گیرند. این فرآیند معمولاً تحلیل ساختاری کارکردی-ساختاری TIS نامیده می‌شود (Bergek et al. 2008a). کارکردها خود ماهیتی پویا داشته و در طول زمان تغییر می‌نمایند. شکل‌گیری درست یک کارکرد سبب ایجاد چرخه‌های تغییر و

1 Technology Innovation System

2 creation of legiti

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

تقویت در سایر کارکردهای می‌شود؛ بنابراین انجام فعّالیت‌ها در یک کارکرد، راه را برای انجام فعّالیت‌های سایر کارکردها هموار می‌نماید.(Jacobsson and Johnson 2000) توالی کارکردها مختلف در پی هم، می‌تواند منجر به ایجاد حلقه‌هایی گردد که درنهایت به همان کارکرد ابتدایی ختم گردد. به این حلقه‌ها که از کارکردهای مختلف تشکیل می‌شوند، حلقه‌های علّی تجمعی[1] می‌گویند (Suurs and Hekkert 2009). اگر مسیر توسعه نظام نوآوری یک فناوری به چهار مرحله تقسیم گردد، در هر مرحله نیاز است تا مجموعه‌ای از حلقه‌های علی تجمعی فعال باشند. مجموعهٔ این حلقه‌ها در هر دوره، موتورهای نوآوری نامیده می‌شوند (Suurs 2009). موتورهای نوآوری روند توسعه فناوری در طول زمان را به‌نمایش می‌گذارد و الگوی مناسب تحقق کارکردها را ارائه می‌کند. در یکی از مهمترین دسته‌بندی‌ها، چهار نوع موتور محرک برای شکل‌گیری نظام‌های نوآوری پیشنهاد شده‌است. موتور محرّک علم و فناوری، کارآفرینی، شکل‌دهی به سیستم و بازار که در دوره‌های زمانی مختلف از رشد موفق یک سیستم به وجود می‌آیند.(Suurs 2009) در این تحلیل از TIS، تلاش شده است که پویایی ایجاد شود؛ ولی با نگاه درون‌نگر خود عملاً فرض شده که یک فناوری در یک محیط بسته توسعه می‌یابد. حتی کارکردهای آن نیز عملاً درون‌زا در نظر گرفته می‌شود، درصورتی‌که در عالم واقعیت، توسعه فناوری در یک بخش و صنعت با سابقه تاریخی رخ می‌دهد.

۲-۳- مرور بر ادبیات تحلیل بافتاری نظام نوآوری فناورانه

تحلیل ساختاری-کارکردی، به‌تنهایی فقط پویایی درونی یک TIS را مورد بررسی قرار می‌دهد و عوامل محیطی آن را کمتر در نظر می‌گیرد. درصورتی‌که در بسیاری از موارد، عدم موفقیت در توسعه یک فناوری، بیش از اینکه به TIS داخلی آن مربوط باشد به سایر عوامل بافتاری مرتبط است. از همین رو در مطالعات اخیر TIS توجه ویژه‌ای به عوامل بافتاری شده است. هر TIS، می‌تواند حداقل با چهار عامل بافتاری در تعامل باشد سایر نظام‌های نوآوری فناورانه، سایر بخش‌ها، بافتار جغرافیایی و بافتار سیاسی (Bergek et al. 2015). رابطه هر یک از این چهار عامل بافتاری را می‌توان متناسب با TIS موردمطالعه، مورد بررسی قرارداد؛ بنابراین در تحلیل بافتاری TIS، لازم است ابتدا بافتارهایی که تأثیر قابل‌توجهی در TIS موردنظر دارند انتخاب و در ادامه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرند (Bergek et al. 2015).

۱-۳-۲- تعامل یک TIS با سایر TISهای مرتبط

برای تحلیل بافتاری یک TIS با سایر TISهای مرتبط، ساندرمن یک مدل مفهومی ارائه داده است. براین‌اساس رابطه میان دو TIS به ۶ دسته زیر تقسیم می شود (Sandén and Hillman 2011). رقابت: رقابت یک ارتباط دوطرفه است که در آن هر دو طرف برای منابع یکدیگر محدودیت ایجاد می‌کنند. خنثی[2]: نوعی رابطه است که برای هر دو طرف سود یا زیان ندارد. هم زیستی[3]: دراین‌رابطه، گروهی از بازیگران حضور دارند و محصول یکی، نیاز دیگری را بر طرف می‌نماید. هم‌سفرگی[4]: نوعی همزیستی است که در آن یک طرف از آن بهره می‌برد و طرف دیگر هیچ سود و زیانی در رابطه ندارد. امنسالیسم[5]: درست متضاد رابطه هم‌سفرگی است. این رابطه زمانی اتفاق می‌افتد که زندگی یک طرف از حضور دیگری در خطر قرار گرفته و آسیب ببیند و در واقع یک طرف نه‌تنها هیچ سودی از یک رابطه نبرد؛ بلکه رابطه برای طرف دیگر مضر باشد. به‌عنوان‌مثال، یک شرکت در حالی که با سرعت عادی خود رشد می‌کند، ممکن است بر روی سایر شرکت‌ها اثرگذار باشد. انگلی[6]:رابطه انگلی نوعی همزیستی غیر همیاری یا غیر متقابل است و زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از ارگانیسم‌ها از امکانات ارگانیسم دیگر سود می‌برد. غالباً زنده نگه‌داشتن میزبان برای این چرخه حیات انگل ضروری است.

1Cumulative causal loop
[2] neutralism
[3] symbiosis
[4] Commensalism
[5] Amensalism
[6] Parasitism

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بر اساس این مدل، رابطه دو TIS مشابه تعامل دو فناوری کلیدی آن‌هاست. به‌عنوان‌مثال اگر دو فناوری رقیب یکدیگر باشند، TIS آن‌ها نیز به‌عنوان رقیب شناسایی می شوند. ضمناً نوع این تعامل، رابطه میان بازیگران حاضر در آن TIS را نیز نمایش می‌دهد. مثلاً اگر دو TIS در رقابت با هم هستند، احتمالاً بازیگران اصلی آن‌ها نیز با یکدیگر در حال رقابت هستند. (Sandén and Hillman 2011)

۲-۳-۲- تعامل یک TIS با سایر بخش‌ها

در توسعه هر فناوری، بخش‌های مختلفی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم تأثیرگذارند. بخش‌ها اصولاً واحدهای اصلی توسعه فناوری هستند. رابطه TIS موردنظر با این بخش‌ها حالات مختلفی می‌تواند داشته باشد. برای برخی از بخش‌ها فناوری موردنظر در راستای اهداف اصلی آن‌هاست، برای برخی از بخش‌ها نیز هدف اصلی نیست و در مواردی می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای برای پیشبرد اهداف مدنظر قرار گیرد. هکرت پیشنهاد می‌کند که رابطه میان یک TIS و بافتار بخشی، دقیقاً به اهداف آن بخش وابسته است. مثلاً برای بخش سازندگان ساختمان، GHP به‌عنوان یک گزینه تأمین گرمایش و سرمایش مطرح است؛ ولی تا زمانی که اهداف میزان مصرف انرژی ساختمان سختگیرانه نباشد، هرگز به‌عنوان انتخاب اول تبدیل نمی‌شود؛ بنابراین برای تحلیل رابطه میان یک TIS و بافتار بخشی آن لازم است ابتدا کلیه بخش‌های مرتبط با فناوری کلیدی شناسایی‌شده و نسبت اهداف آن‌ها و توسعه TIS مربوطه مورد بررسی قرار گیرد (Kieft et al. 2021)

۳-۳-۲- تعامل یک TIS با بافتار سیاسی[1]

زمانی که TIS در یک محدوده مشخص سیاسی (نظیر یک کشور) مورد بررسی قرار می‌گیرد، معمولاً سیاست‌های یکسانی بر کلیه بخش‌ها و فناوری‌ها حاکم است. در مواردی هرچند که سیاست‌های اعمال شده یکسان هستند؛ ولی اثرگذاری آن‌ها در حوزه‌ها و فناوری‌ها متفاوت خواهد بود؛ بنابراین اثرگذاری بافتار سیاسی در عملکرد یک TIS می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم و از طریق اثرگذاری متفاوت آن بر سایر TISهای رقیب و یا بخش‌های دیگر باشد؛ بنابراین نوع سیاست‌گذاری می‌تواند، مستقیماً باعث توسعه/ عدم توسعه یک فناوری گردد، اهداف سایر بازیگران را به‌گونه‌ای تحت‌تأثیر قرار دهد که باعث توسعه/عدم توسعه یک فناوری گردد و یا با تقویت و تضعیف فناوری‌های رقیب در توسعه/ عدم توسعه TIS موردنظر اثرگذار باشد.

۴-۳-۲- تعامل یک TIS با بافتار جغرافیایی[2]

در این مقاله فرض بر توسعه GHP در مناطق با اولویت و پتانسیل بالاست، بنابراین ویژگی‌های جغرافیای اثر نسبتاً یکسانی بر توسعه این فناوری خواهد داشت. ازاین‌رو در ادامه این تحلیل، اثر بافتار جغرافیای در تحلیل نظام ملی نوآورانه در نظر گرفته نمی‌شود.

۳- روش کار

برای تحلیل TIS، مدل‌های متنوعی ارائه شده است. هکرت و برگک با معرفی موتورهای نوآوری یک مدل شش‌مرحله‌ای تحلیل ساختاری-کارکردی TIS ارائه داده‌اند (Bergek et al. 2008b) پس از آن هکرت بر اساس مدل شش‌مرحله‌ای یک فرآیند شش‌مرحله‌ای برای تحلیل بافتاری TIS معرفی نمود (Kieft et al. 2021). (خلاصه‌ای از این دو فرآیند در جدول ۱)

جدول ۱ مقایسه تحلیل ساختاری-کارکردی TIS و تحلیل بافتاری TIS

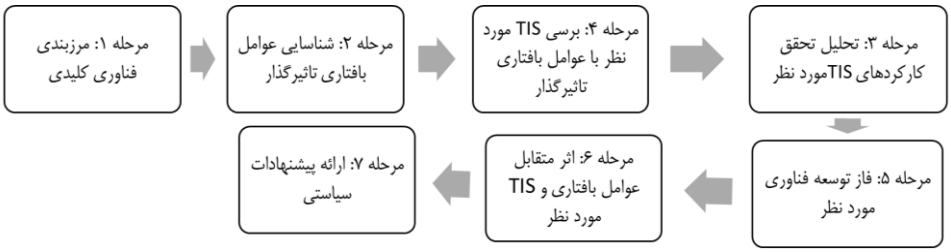
تحلیل	تحلیل ساختاری-کارکردی TIS	تحلیل بافتاری TIS
مرحله ۱	تعیین مرز نظام نوآوری فناورانه	تعریف فناوری محوری
مرحله ۲	شناسایی اجزای ساختاری TIS	تعیین حالت‌های مختلف تعامل میان TISها
مرحله ۳	نگاشت الگوی کارکردی TIS	تحلیل کوپلینگ‌های ساختاری میان TISها
مرحله ۴	ارزیابی عملکرد TIS و تعیین اهداف فرآیند	تعیین عوامل بافتاری بخشی مرتبط
مرحله ۵	شناسایی سازوکارهای محرک و مسدودکننده	بررسی میزان تحقق کارکردها
مرحله ۶	ارائه سیاست‌های کلیدی برای توسعه فناوری	فاز توسعه و عوامل بافتاری بخشی

[1] Political context -TIS

[2] geographical context structures

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بر اساس مدل‌های معرفی شده، مدلی برای تحلیل بافتاری نظام نوآوری فناوری GHP در ایران، در شکل ۲، پیشنهاد شده است.



شکل ۲ مدل پیشنهادی تحلیل بافتاری نظام نوآوری فناوری GHP در ایران

در مرحله اول: فناوری کلیدی انتخاب و مرزهای فنی آن مشخص می‌شود. در مرحله دوم: عوامل بافتاری که در توسعه فناوری کلیدی اثرگذار هستند شناسایی می شوند. در این مرحله عوامل بافتاری با تأثیر ناچیز از ادامه تحلیل کنار گذاشته می شوند. در مرحله سوم: تحلیل TIS موردنظر با هر یک از عوامل بافتاری شناسایی‌شده در مرحله قبل صورت می‌پذیرد. در مرحله چهارم: تحقق کارکردهای TIS، مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر عوامل بافتاری در تحقق کارکردها TIS ارزیابی می‌شود. در مرحله پنجم: فاز توسعه فناوری کلیدی با درنظرگرفتن عوامل بافتاری تعیین می شود. در مرحله ششم: نمایی از TIS موردنظر تر سیم و اثرات متقابل TIS و عوامل بافتاری مشخص می‌گردد. در مرحله هفتم: باتوجه‌به تحلیل‌های صورت‌گرفته، ابزارهای سیاستی متناسب برای توسعه فناوری موردنظر ارائه می‌شود.

نحوه به‌دست‌آوردن اطلاعات: داده‌ها و اطلاعات مرحله اول و دوم: جستجوی کتابخانه‌ای گزارش‌های فنی معتبر بین‌المللی، وب سایت‌های داخلی و خارجی بوده است. داده‌ها و اطلاعات مرحله سوم و ششم: مطالعه سند توسعه فناوری انرژی زمین‌گرمایی و سایر اسناد بالادستی و پنل خبرگان. داده‌ها و اطلاعات مرحله چهارم و پنجم: مصاحبه عمیق با ۱۷ خبره از بخش‌های دولتی (پژوهشگاه نیرو، ساتبا)، بخش خصوصی (شرکت برنولی) و انجمن‌ها (انجمن انرژی زمین‌گرمایی).

٤- نتایج:

این بخش بر اساس فرآیند هفت‌مرحله‌ای تنظیم شده است.

٤-١- مرحله اول: مرزبندی فناوری کلیدی

فناوری موردتوجه در این مقاله پمپ‌های حرارتی منبع زمین هستند که از هوا به‌عنوان سیال استفاده می‌کنند. (ENERSOL EU and https://www.duurzaammbo.nl/images/pdf/Heatpumps.pdf 2004)

٤-٢- مرحله دوم: شناسایی عوامل بافتاری مؤثر در توسعه فناوری پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

۴-۲-۱- عملکرد TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با سایر TISها

در دنیا بر اساس نوع اقلیم و منابع در دسترس، فناوری‌های متنوعی برای گرمایش و سرمایش ساختمان مورداستفاده قرار می‌گیرد (isazade alireza 2022). در ایران بیشتر مناطق مسکونی به شبکه گاز، برق و آب سراسری متصل هستند، بنابراین رقبای قدرتمندی در بخش گرمایش و سرمایش ساختمان برای GHP وجود دارد. (جدول ۲)

جدول ۲ سایر TISهای مرتبط با پمپ حرارتی زمین‌گرمایی[38، ۳۹]

بخش	فناوری	حامل انرژی
گرمایش	بخاری گازی	گاز
	بخاری‌برقی	برق
	پکیج	گاز، برق
	گرمایش مرکزی (موتورخانه)	گاز، برق
	GHP	-
سرمایش	کولر آبی	آب، برق
	کولرگازی	برق
	سیستم سرمایش مرکزی	برق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

	پمپ حرارتی زمین‌گرمایی	-

۴-۲-۲- عملکرد TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با سایر بخش‌ها

معمولاً فناوری‌ها در داخل بخش‌های توسعه پیدا می‌کنند. تولیدکنندگان تجهیزات گرمایش و سرمایشی، نصب‌کنندگان، انجمن‌ها و سازندگان ساختمان، مهم‌ترین بخش‌های مرتبط در این حوزه هستند.

۴-۲-۳- عملکرد TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با بافتار سیاسی

عوامل سیاستی مهم تأثیرگذار در عملکرد TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی عبارتند از: قیمت‌گذاری انرژی، ملاحظات زیست‌محیطی، استانداردهای بازدهی تجهیزات مصرف‌کننده انرژی و استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان.

۴-۲-۴- عملکرد TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با بافتار جغرافیایی

توسعه GHP، به شدت به منطقه نصب وابسته است؛ ولی در این مقاله منظور بررسی توسعه GHP در مناطق و شرایطی است که پتانسیل لازم برای توسعه GHP را داراست؛ بنابراین از تحلیل این عامل بافتاری صرف‌نظر نمود. بنابراین، در ادامه این مقاله سه عامل بافتاری بخش، سیاست‌گذاری و سایر TISها مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

۴-۳- مرحله سوم: بررسی TIS موردنظر با هر یک از عوامل بافتاری

۴-۳-۱- تحلیل TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با سایر TISها

برای تحلیل نظام نوآوری یک فناوری با سایر فناوری‌ها ابتدا باید بررسی نمود که آیا فناوری موردنظر را می‌توان به‌صورت یک TIS مستقل در نظر گرفت یا خیر. برای این منظور منابع موردنیاز فناوری، بازیگران اثرگذار در آن و بازار تقاضای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حوزه تهویه‌مطبوع بازار تقاضا را می‌توان به دو بخش گرمایش فضا و سرمایش فضا تقسیم نمود. (جدول ۳ و **Error! Reference source not found.**).

جدول ۳ فناوری‌های حوزه گرمایش فضا در ساختمان

بخش	فناوری	منبع	مستقل/ مرکزی	هزینه اولیه	هزینه منبع	سهولت راه‌اندازی	سازندگان مستقل	انجمن‌ها
گرمایش	بخاری گازی	گاز	مستقل	پایین	پایین	ساده	سازندگان داخلی	اتحادیه‌های صنعتی
	بخاری‌برقی	برق	مستقل	پایین	بالا	ساده	سازندگان داخلی	اتحادیه‌های صنعتی
	پکیج	گاز، برق	مستقل	متوسط	پایین	متوسط	سازندگان داخلی	اتحادیه‌های صنعتی، انجمن‌های تهویه‌مطبوع
	مرکزی	گاز، برق	مرکزی	متوسط	پایین	تخصصی	سازندگان داخلی، واردکنندگان	اتحادیه‌های صنعتی، انجمن‌های تهویه‌مطبوع
	GHP	_	مرکزی/ مستقل	بسیار بالا	بسیار پایین	بسیار تخصصی	سازندگان لوله‌ها و پمپ‌حرارتی	انجمن انرژی زمین‌گرمایی

در بخش گرمایش، فناوری پکیج و موتورخانه از منبع یکسانی استفاده می‌کنند. راه‌اندازی گرمایش مرکزی تااندازه‌ای فعالیت تخصصی محسوب می شود؛ ولی نصب‌کنندگان آن توانایی نصب پکیج را نیز دارند. علاوه بر این انجمن‌های هر دو فناوری نیز تا حدودی در کشور یکسان هستند؛ بنابراین می‌توان گفت عملاً نمی‌توان، پکیج و سیستم گرمایش مرکزی را به‌عنوان دو TIS مستقل در نظر گرفت. (شکل ۳) بنابراین می‌توان TIS شوفاژ مرکزی و پکیج‌ها را تحت عنوان یک TIS در نظر گرفت. بنابراین در این بخش چهار TIS مستقل GHP، بخاری‌گازی، بخاری‌برقی و گرمایش مرکزی وجود دارد. (شکل ۳)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۳ ارتباط میان اجزا فناوری‌های موجود در بخش گرمایش فضا

در بخش سـرمایش، سـرمایش مرکزی و کولرگازی از منابع یکسـانی اسـتفاده می‌نمایند. تولیدکنندگان و واردکنندگان تجهیزات سـرمایش مرکزی، عموماً تأمین‌کننده کولرگازی نیز هستند. نصب‌کنندگان سیستم سرمایش مرکزی افراد متخصص هستند و توانایی نصب کولرگازی را نیز دارا هستند؛

جدول ۴ فناوری‌های حوزه سرمایش فضا در ساختمان

بخش	فناوری	منبع	مستقل/ مرکزی	هزینه اولیه	هزینه منبع	راه‌اندازی	سازندگان مستقل	انجمن‌ها
سرمایش	کولر آبی	آب- برق	مستقل	پایین	پایین	ساده	سازندگان دخلی	
	کولرگازی	برق	مستقل	متوسط	بالا	متوسط	واردکنندگان، مونتاژکنندگان	
	سرمایش‌مرکزی	برق	مرکزی	بالا	پایین	تخصصی	واردکنندگان، مونتاژکنندگان	اتحادیه‌های صنعتی، انجمن‌های تهویه‌مطبوع
	GHP	_	مرکزی/ مستقل	بسیار بالا	بسیار پایین	بسیارتخصصی	سازندگان لوله و پمپ	انجمن انرژی زمین‌گرمایی

بنابراین در تحلیل TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی نمی‌توان این دو فناوری را به‌صورت دو TISمستقل در نظر گرفت. (شکل ۴)



شکل ۴ ارتباط میان اجزا فناوری‌های موجود در بخش سرمایش فضا

در بخش سرمایش، می‌توان سه TIS مستقل GHP، کولر آبی و سیستم سرمایش مرکزی/ کولرگازی را در نظر گرفت.

جدول ۵ حالت تعامل TIS در بخش گرمایش و سرمایش فضا در ساختمان

حوزه	فناوری ۱	فناوری ۲	تعامل
گرمایش	GHP	بخاری گازی	رقابت
		بخاری‌برقی	خنثی
		گرمایش مرکزی/ پکیج	رقابت
	بخاری گازی	بخاری‌برقی	خنثی
		گرمایش مرکزی/ پکیج	رقابت
	بخاری‌برقی	گرمایش مرکزی/ پکیج	خنثی
سرمایش	GHP	کولر آبی	رقابت
		سرمایش مرکزی/ کولرگازی	رقابت
	کولر آبی	سرمایش مرکزی/ کولرگازی	رقابت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

۲-۳-۴- تحلیل TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با سایر بخش‌ها

برر سی اثرات بخش‌های مختلف روی تو سعه یک فناوری امری بـ سیار پیچیده ا ست. معمولاً فناوری برای بخش‌ها نقش ابزار ر سیدن به هدف را ایفا می‌کند؛ بنابراین یک فناوری می‌تواند به‌عنوان ابزار رسیدن به هدف یک بخش انتخاب شود یا مورداستفاده قرار نگیرد؛ بنابراین مهم‌ترین عامل انتخاب فناوری توسط هر بخش، اهداف این بخش است و برای بررسی اثر هر بخش روی توسعه یک فناوری، باید اهداف آن بخش نسبت به فناوری موردنظر مورد تحلیل قرار گیرد. (شکل ۵)



شکل ۵ نحوه اثرگذاری بخش‌های مختلف در موفقیت یک TIS

مهم‌ترین بخش‌های اثرگذار در بخش GHP، سـازندگان مسـکن، تولیدکنندگان تجهیزات گرمایش و سـرمایش، نصـب‌کنندگان تجهیزات گرمایش و سرمایش فضا، انجمن‌ها (حوزه انرژی، حوزه تهویه‌مطبوع، حوزه ساختمان) هستند. استفاده از هر فناوری برای هر بخش دارای جذابیت‌ها و معایبی ا ست. بخش‌ها و بنگاه‌های موجود در آن‌ها با توجه به برآیند مزایا و معایب هر فناوری به صورت هو شمندانه ا ستفاده و عدم اسـتفاده از آن را انتخاب می‌کنند. به‌عنوان‌مثال مزایای اسـتفاده از GHP برای بخش سـازندگان مسـکن، تولید هم‌زمان گرمایش و سرمایش و کاهش هزینه م صرف انرژی در ساختمان ا ست. این دو عامل هرچند از نگاه بیرونی جذاب با شند؛ ولی با توجه به نبود قوانین بهره‌وری انرژی در ایران، هیچ فشـاری برای مصـرف انرژی در سـاختمان بر سـازندگان مسـکن وجود ندارد و بنابراین از منظر منافع داخل بخش، جذابیت چندانی ندارند. از طرفی افزایش هزینه‌های نصـب، ازدسـت‌دادن بخشـی از مسـاحت سـاختمان به دلیل نصـب تجهیزات و ریسک عملکرد GHP سه عامل عدم جذابیت استفاده از این فناوری برای بخش مسکن هستند که اتفاقاً به دلیل ایجاد بار مالی، وزن بسیار زیادی نیز دارند؛ بنابراین نتیجه ارزیابی سازندگان مسکن از ا ستفاده از GHP منفی ا ست. یکی از نکات مثبت تحلیل بافتاری TIS نسبت به نگاه درون‌گرای تحلیل ساختاری کارکردی TIS، رسیدن به همین چالش‌های بنیادی توسعه فناوری است.

جدول ۶ بررسی علل جذابیت و عدم جذابیت GHP برای بخش‌های مختلف

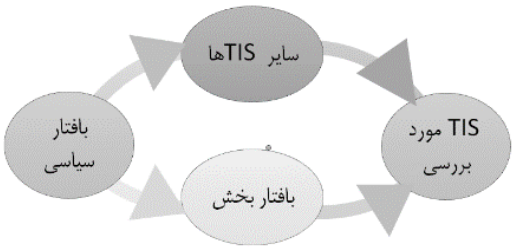
بخش	عامل جذابیت	وزن	عامل عدم جذابیت	وزن	برآیند
تولید مسکن	تأمین گرمایش و سرمایش	کم	هزینه‌های نصب	بالا	غیرجذاب
	کاهش هزینه مصرف انرژی	کم	ازدست‌دادن بخشی از مساحت ساختمان	بالا	
			ریسک عملکرد	بالا	
تولید تجهیزات	تولید فناوری به‌روز و احتمال سودآوری	بالا	نبود بازار مناسب	بالا	بستگی به بازار
نصب	فراگیری نصب فناوری جدید و سود بیشتر	کم	نیاز به کسب مهارت نصب	متوسط	مقاومت
انجمن بخش ساختمان	تأمین گرمایش و سرمایش	متوسط	نیاز به استانداردها و روش کارهای جدید	متوسط	خنثی
انجمن‌های بهره‌وری انرژی	افزایش بهره‌وری ساختمان	بالا	ندارد		جذاب
انجمن‌های انرژی	مصرف انرژی	بالا	ندارد		جذاب
	کاهش آلودگی	بالا			
انجمن‌های صنعتی	ایجاد صنعت جدید	کم	ندارد		خنثی

۳-۳-۴- تحلیل TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با بافتار سیاسی

اثر بافتار سیاسی بر عملکرد یک TIS از جنبه‌های مختلفی قابل‌ارزیابی است که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

- اثر مستقیم بافتار سیاسی بر TIS
- اثر بافتار سیاسی بر بخش‌های مختلف و اثرگذاری بر اهداف آن‌ها
- اثر بافتار سیاسی بر سایر فناوری‌های رقیب و تضعیف و تقویت عملکرد TIS آن‌ها

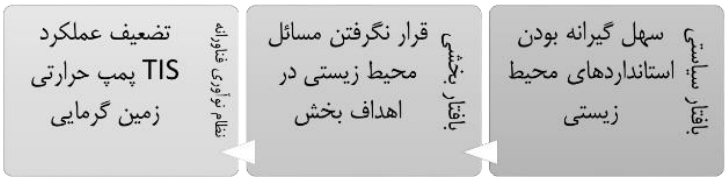
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۶ مسیرهای مختلفی اثر بافتار سیاسی بر عملکرد یک TIS

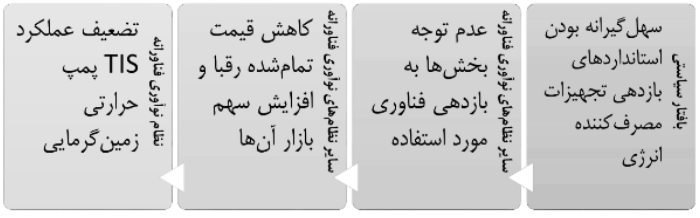
در مباحث مربوط به مصرف انرژی در ساختمان‌ها سه سیاست اصلی: ملاحظات زیست‌محیطی، استانداردهای بازدهی تجهیزات، استانداردهای بازدهی مصرف انرژی و قیمت‌گذاری انرژی اثرگذار هستند.

اهداف کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، یکی از محرک‌های اصلی توسعه GHP در دنیا بوده است. در حال حاضر استانداردهای محیط زیستی در ایران بسیار سهل‌گیرانه هستند که این امر سبب شده اهداف زیست‌محیطی در میان اهداف هیچ یک از بخش‌های مرتبط قرار نداشته باشد و ازاین‌رو این مزیت اساسی نتوانسته است تأثیر مهمی در توسعه GHP در ایران داشته باشد. در واقع سهل‌گیرانه بودن استانداردهای زیست‌محیطی، با اثرگذاری نامناسب بر اهداف بخش‌های مرتبط مانع توسعه GHP شده است. این امر در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷ اثر بافتار سیاسی به وجود آمده حاصل از سهل‌گیرانه بودن استانداردهای زیست‌محیطی بر توسعه GHP

سهل‌گیرانه بودن استانداردهای تجهیزات در بخش تهویه‌مطبوع سبب شده، تولیدکنندگان بدون توجه به استفاده از فناوری‌های بروز و افزایش بازده محصولات خود، به فکر کاهش هزینه‌های تولید و در نهایت کاهش قیمت نهایی محصول خود باشند. از طرف دیگر این سیاست سبب شده است که مصرف انرژی و بازدهی تجهیزات برای مصرف‌کنندگان نیز در اولویت قرار نگیرد و برای انتخاب تجهیزات به سایر مسائل (نظیر قیمت، زیبایی و ...) توجه نمایند؛ همین امر بازار مناسبی برای سایر رقبای پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در کشور به وجود آورده است. در این بافتار سیاسی، توسعه پمپ حرارتی زمین‌گرمایی بسیار پیچیده و دشوار خواهد بود. (شکل ۸)

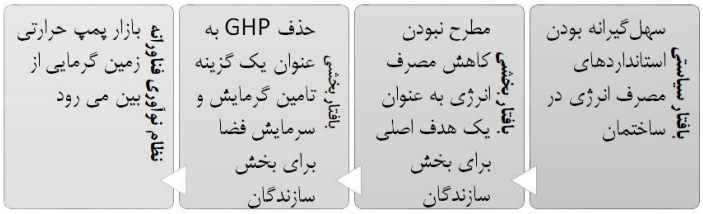


شکل ۸ اثر بافتار سیاسی به وجود آمده حاصل از سهل‌گیرانه بودن استانداردهای تجهیزات در بخش تهویه‌مطبوع بر توسعه GHP

استاندارد مصرف انرژی در ساختمان بسیار سهل‌گیرانه و غیراجرایی است. این امر سبب شده، کاهش مصرف انرژی برای بخش سازندگان ساختمان از اهمیت زیادی برخوردار نباشد. GHP برای این بخش، فقط به‌عنوان یک گزینه تأمین‌کننده گرمایش و سرمایش مطرح است که اتفاقاً هزینه‌های راه‌اندازی آن از سایر گزینه‌ها بالاتر است و از لحاظ اقتصادی برای این بخش جذابیتی ندارد؛ بنابراین با سهل‌گیرانه بودن استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان، کاهش مصرف انرژی برای بخش سازندگان مسکن به‌عنوان کسب‌وکار، یک هدف اصلی محسوب نمی‌شود و سازندگان در انتخاب گزینه‌های مختلف اهداف دیگری نظیر اهداف اقتصادی، زیبایی و ... مدنظر قرار می‌دهند. این امر سبب می‌شود استفاده از GHP به‌عنوان یک گزینه تأمین‌کننده گرمایش و سرمایش در این بخش مطرح نباشد. با توجه به اینکه استفاده از GHP در یک ساختمان مستلزم عملیات حفاری و سیستم نصب و راه‌اندازی مخصوص و برای کل ساختمان است، معمولاً در هنگام ساخت یک ساختمان انتخاب و مورداستفاده قرار می‌گیرد. مصرف‌کننده نهایی (یک واحد از یک ساختمان) نمی‌تواند تصمیم بگیرد که برای

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

گرمایش و سرمایش از این سیستم استفاده نماید و یا سیستم تهویه‌مطبوع خود را از سایر گزینه‌ها به GHP تغییر دهند؛ بنابراین بازار اصلی استفاده از GHP، بخش سازندگان مسکن هستند؛ درنتیجه با سهل‌گیرانه بودن استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان، عملاً کل بازار بالقوه GHP از بین رفته است. (شکل ۹)



شکل ۹ اثر بافتار سیاسی به وجود آمده حاصل از سهل‌گیرانه بودن استاندارد مصرف انرژی در ساختمان بر توسعه GHP

پایین‌بودن قیمت حامل‌های انرژی در ایران سبب شده هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی، سهم کوچکی از سبد هزینه‌های یک خانواده داشته باشد و در نتیجه مطالبات جدی از سمت مصرف‌کنندگان نهایی برای افزایش بهره‌وری مصرف انرژی در ساختمان به وجود نیامده است. در حال حاضر در ایران مصرف انرژی یک ساختمان تأثیر زیادی در ارزش‌گذاری آن ساختمان از سمت مصرف‌کننده ندارد. این موضوع سبب می‌شود، بخش سازندگان ساختمان، انگیزه لازم برای استفاده از سیستم‌های گرمایش و سرمایش با بهره‌وری بالاتر داشته و ازاین‌رو بازاری برای فناوری‌های نظیر GHP نخواهند داشت.

٤-٤- مرحله چهارم: تحلیل تحقق کارکردهای TIS

کارکرد کارآفرینی: در طی اجرای پروژه‌های پایلوت، تعدادی شرکت در این حوزه فعال شدند. این شرکت‌ها عموماً در حوزه تهویه‌مطبوع فعال بودند و اکنون تا حدودی توان انجام پروژه GHP در مقیاس کوچک را دارا هستند. بااین‌حال به دلیل تعداد کم پروژه‌های اجرایی شده در کشور، آشنایی صنعت با فناوری‌های GHP محدود است.

کارکرد توسعه دانش: پروژه‌های GHP نصب‌شده در ایران بسیار اندک بوده است. البته با توجه به اهمیت آن برای کشور و لزوم ایجاد دانش مرتبط با آن، چند پروژه پایلوت دولتی در مناطق مختلف انجام شده است؛ بنابراین در زمینه نصب و راه‌اندازی دانش اولیه در کشور به وجود آمده است. علاوه بر این با توجه به پایه دانشی که در بخش اکتشاف نفت و گاز وجود دارد، در صورت توسعه بازار GHP تا حدودی می‌تواند مشکلات این حوزه را برطرف نماید. از طرف دیگر تأسیس رشته دانشگاهی انرژی‌های تجدیدپذیر و تدریس حوزه انرژی زمین‌گرمایی در آن، تا حدودی جریان دانش مرتبط با این حوزه را در میان دانشگاهیان نیز ایجاد نموده است. البته با توجه به اینکه بازار این حوزه بسیار کوچک است و یک برنامه آموزشی منسجم برای این حوزه در کشور به وجود نیامده است؛ بنابراین دانش خلق شده منحصر به شبیه‌سازی‌های حرارتی و ترمودینامیکی و در مواردی مطالعات امکان‌سنجی باقی‌مانده است. یکی از نقاط ضعف کشور در حوزه دانشی آن، کمبود اطلاعات خاک مناطق مختلف (شامل دما، رطوبت و جنس خاک در اعماق مختلف زمین) است که یکی از ملزومات توسعه GHP محسوب می‌شود.

کارکرد انتشار دانش: انجمن انرژی زمین‌گرمایی، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری ایران، پژوهشگاه نیرو و سایر بازیگران این حوزه در طی سال‌ها تلاش کرده‌اند، دانش مرتبط با GHP را میان بخش‌های تأثیرگذار ترویج نمایند. ولی تعداد زیادی از ذی‌نفعان در این حوزه ورود نکرده‌اند. در این میان شبکه‌های اولیه دانشی میان بازیگران مختلف (کارآفرینان و دانشگاه‌ها) شکل گرفته است؛ ولی به دلیل تعداد کم پروژه‌های اجرایی در کشور، این شبکه‌ها تقویت نشده‌اند. موضوعات مربوط به GHP در کنفرانس‌ها و نمایشگاه‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر، تهویه‌مطبوع و انرژی زمین‌گرمایی مطرح شده است؛ ولی تا کنون رویداد مهمی با محوریت موضوع GHP در کشور برگزار نشده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

کارکرد جهت‌دهی به سیستم: در ابتدای مسیر توسعه تلاش‌هایی برای جهت‌دهی به تحقیقات و منابع مالی به سمت توسعه GHP شکل گرفت. در سال ۱۳۹۰، وزارت نیرو نقشه راه توسعه فناوری‌های انرژی زمین‌گرمایی را تدوین نمود که GHP یکی از اساسی‌ترین قسمت‌های آن بوده است. در این سند چشم‌انداز، اهداف و راهبردهای مناسب برای توسعه GHP ارائه شده است.

کارکرد تأمین منابع: منابع مالی که در حوزه GHP وارد شده است عموماً منابع مستقیم دولتی بوده و فعالیت‌های کارآفرینی به‌صورت مستقیم به جذب منابع مالی منجر نشده است. به دلیل تعداد کم پروژه‌های اجرایی، تعداد منابع انسانی با مهارت بالا نیز در کشور کم است. منابع انسانی در کشور در حد دانشجویان و یا نیروی انسانی چند شرکت معدود هستند؛ بنابراین کارکرد تأمین منابع در TIS پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، تا حدود زیادی محقق نشده است.

کارکرد شکل‌دهی به بازار: در کشور هیچ‌گونه بازاری در حوزه GHP شکل نگرفته است. حتی می‌توان گفت در این حوزه بازار کنام[1] نیز شکل نگرفته است.

کارکرد مشروعیت‌بخشی: با توجه به اینکه توسعه GHP سبب کاهش مصرف سوخت و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود؛ تحقق کارکرد مشروعیت‌بخشی در آن سریع‌تر رخ داد. البته کماکان چالش‌هایی در عملکرد کارکرد مشروعیت‌بخشی وجود دارد. به‌عنوان‌مثال عدم توجه مردم در هنگام خرید منزل مسکونی به مصرف انرژی ساختمان و یا فناوری تأمین گرمایش و سرمایش آن سبب شده سازندگان مسکن نیز به این امر توجهی نکنند. جدول ۷، جمع بندی شکست های سیستمی توسعه GHP از منظر تحلیل TISرا نمایش می‌دهد.

جدول ۷ شکست‌های سیستم حاصل از تحلیل ساختاری کارکردی TIS

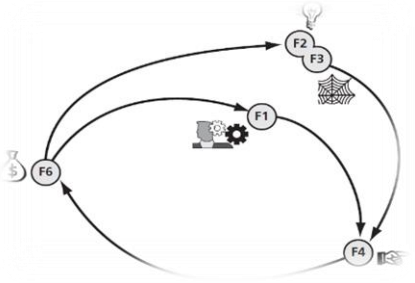
کارکرد	شکست سیستم (در سطح تحلیل ساختاری‌کارکردی TIS)
کارآفرینی	تعداد اندک شرکت‌هایی فعال در این حوزه آشنایی کم صنعت با فناوری‌های نوین GHP نیاز به قوانین تشویقی برای صنایع این حوزه
توسعه دانش	فقدان برنامه آموزشی منسجم در این حوزه کمبود اطلاعات خاک مناطق مختلف
انتشار دانش	کمبود انگیزه برای شرکت‌ها برای آموزش نصب و راه‌اندازی پروژه‌های سطحی دانشجویی (بیشتر در مورد مدل‌سازی مالی) و عدم وجود پروژه‌های پژوهشی در مورد اجرائیات
جهت‌دهی	عدم اجرای پروژه‌های پایلوت در ظرفیت‌های بزرگ طولانی‌بودن فرآیند اخذ مجوزات احداث GHP
شکل‌دهی بازار	بازار کنام نیز شکل نگرفته است
تأمین منابع	منابع مالی در این حوزه جریان نیافته است انگیزه‌ای کم برای آموزش نیروی انسانی متخصص
مشروعیت بخشی	فرهنگ‌سازی نامناسب در مورد برتری‌های سیستم‌های GHP نسبت به سایر گزینه‌های گرمایش و سرمایش

٤-٥- مرحله پنجم: بررسی فاز توسعه فناوری

مرحله اول از فاز توسعه GHP (موتور محرک علم و فناوری): دولت ضرورت توسعه GHP در کشور را درک نموده و به منظورت جهت‌دهی (F4) فعالیت‌ها به این حوزه، پروژه‌های پایلوتی را تعریف نمود. این پروژه‌ها سبب ورود منابع مالی به این بخش (F6) و ورود تعدادی از شرکت‌هایی که در حوزه‌های مشابه فعالیت می‌کردند برای اجرای پروژه‌های پایلوت در این حوزه شد (F1). با افزایش این فعالیت‌های کارآفرینانه، حلقه اول موتور محرک علم و فناوری تحقق یافت. از طرفی به دلیل نیاز این شرکت‌ها به منابع دانشی، بخشی از این منابع به سمت تولید و انتشار دانش جریان یافت (F2,F3). در این سال‌ها دانشگاه‌ها تا حدودی با موضوعات مرتبط با GHP آشنا شدند؛ بنابراین همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، موتور علم و فناوری دو حلقه خود را تکمیل نموده است.

[1] NITCH

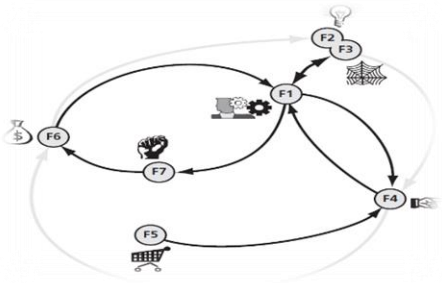
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۱۰ موتورهای محرک علم و فناوری

مرحله دوم از فاز توسعه فناوری GHP (موتور محرک کارآفرینی): افزایش فعالیت‌های کارآفرینانه (F1) سبب شد، جهت‌دهی به این حوزه افزایش یابد (F4) و مستقیماً با تعریف پروژه‌های پایلوت باعث افزایش فعالیت‌های کارآفرینی (F1) در این حوزه گردد. موفقیت‌های این پروژه‌ها سبب می‌شد، تمایل دولت به توسعه این بخش نیز افزایش یابد؛ بنابراین اولین حلقه موتور کارآفرینی فعال شد. فعالیت‌های کارآفرینانه شرکت‌هایی که در پروژه‌های پایلوت شرکت داشتند (F1)، مستقیماً سبب تحریک دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی شد (F2,F3). در این سال‌ها همکاری‌های مشترکی میان مراکز تحقیقاتی و کارآفرینان شکل گرفت (پروژه‌های مشترک پژوهشگاه نیرو و شرکت‌هایی نظیر برنولی، تعریف پایان‌نامه‌های دانشجوی در راستای پروژه‌های عملیاتی و ...). در ادامه مباحث مربوط به GHP در دانشگاه منتشر شد (F3) و موضوعات آن در سرفصل‌های آموزشی دانشگاه‌ها قرار گرفت (مثل رشته انرژی‌های تجدیدپذیر). در این سال‌ها مقالات زیادی توسط دانشجویان و اساتید دانشگاهی نوشته شد که موضوع اکثر آن‌ها مدل‌سازی و شبیه‌سازی اجرای یک پروژه GHP در کشور بود(F2,F3).

افزایش فعالیت‌های کارآفرینی (F1) و دانشگاهی توجه مردم را به خود جلب نمود و انجمن انرژی‌های زمین‌گرمایی شکل گرفت. ماهیت سبز بودن این فناوری سبب شد به‌سرعت توسعه آن در کشور مشروعیت یابد (F7). ولی بنابر دلایلی این افزایش فعالیت‌های مشروعیت‌بخشی و فرهنگ سازی نتوانست به جذب منابع مالی در این حوزه منجر شود و حلقه دوم موتور کارآفرینی تکمیل نشد (F6). در واقع بر اساس تحلیل ساختاری_کارکردی TIS، می‌توان گفت: توسعه GHP در مرحله دوم فاز توسعه و در موتور کارآفرینی متوقف شد. بر اساس این تحلیل، افزایش فعالیت‌های کارآفرینی و مشروعیت شکل‌گرفته در کشور نتوانست منابع لازم را برای فعالیت‌های کارآفرینی تأمین نماید و در واقع شکست کارکرد تأمین منابع مانع از تکمیل حلقه دوم موتور کارآفرینی و در نتیجه توقف فرآیند توسعه پمپ حرارتی در کشور شده است. بر اساس این تحلیل جذابیت درونی این حوزه نتوانسته محرک مناسبی برای شکل‌دهی به بازار کنام در این بخش باشد؛ بنابراین در موتور دوم کارکرد شکل‌دهی به بازار نیز با شکست مواجه شده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱ موتورهای محرک کارآفرینی

در صورتی‌که تحلیل ساختاری کارکردی TIS مبنای سیاست‌گذاری توسعه این بخش قرار گیرد، بنابراین باید سیاست‌هایی در جهت رفع شکست کارکرد تأمین منابع اتخاذ شود. رهنمودهای تحلیل ساختاری-کارکردی TIS برای توسعه GHP:

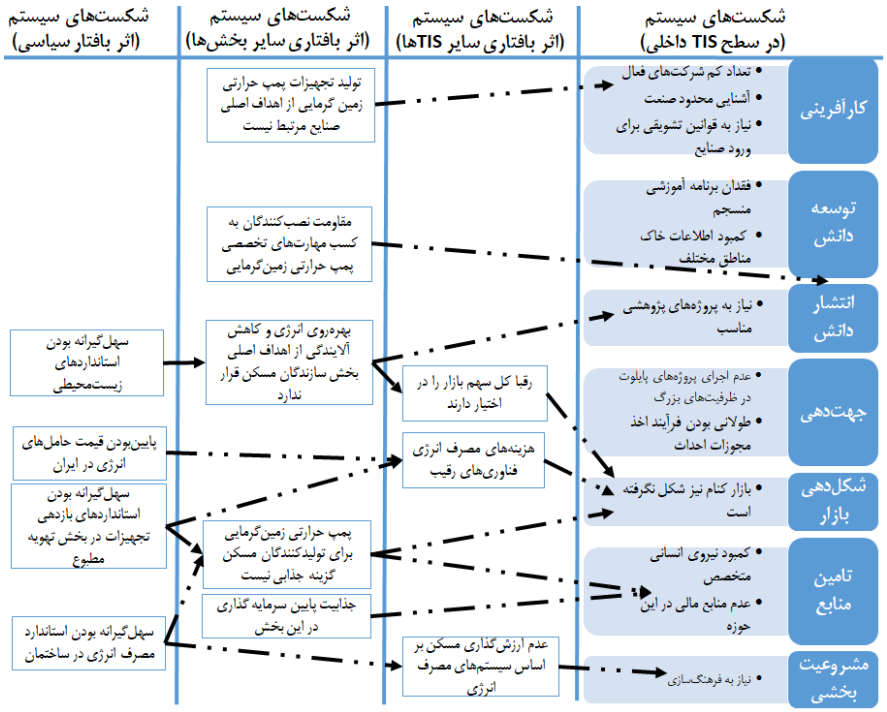
- سیاست‌هایی در جهت توسعه فعالیت‌های کارآفرینی: افزایش پروژه‌های مستقیم دولتی، حمایت از ورود شرکت‌های دانش‌بنیان، رفع موانع ورود شرکت‌های دانش‌بنیان به این حوزه
- سیاست‌هایی در جهت افزایش مشروعیت‌بخشی: فرهنگ‌سازی عمومی، ترویج استفاده از GHP در کشور از طریق مکانیزم‌های تبلیغاتی، حمایت از انجمن‌ها و گروه‌های مرتبط با این حوزه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

• سیاست‌هایی در جهت شکل‌دهی بازار

٤-٦- مرحله ششم: تأثیرات متقابل عوامل بافتاری و TIS موردنظر

رویکرد تحلیل کارکردی-ساختاری TIS سبب شده است، تمرکز جستجو و تحلیل شناسایی عوامل شکست‌های سیستمی در درون TIS قرار گیرد. درصورتی‌که در موارد بسیاری عوامل بافتاری و محیطی تأثیر بیشتری در فرآیند توسعه یک فناوری خواهند گذاشت. در مرحله سوم پیاده‌سازی مدل، نظام نوآوری فناورانه GHP با عوامل بافتاری تأثیرگذار مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس این تحلیل عوامل بافتاری می‌توانند مستقیماً عملکرد یک کارکرد را تحت‌تأثیر قرار دهند و یا با اثرگذاری در سایر عوامل بافتاری در عملکرد آن کارکرد تأثیرگذار باشند. در شکل ۱۲، جمع‌بندی شکست‌های سیستمی حاصل ازتحلیل‌های مختلف به همراه ارتباطات آن‌ها ارائه شده است.



شکل ۱۲ انواع شکست‌های سیستمی شناسایی‌شده در توسعه نظام نوآوری فناورانه GHP (مستخرج از تحلیل ساختاری-کارکردی و بافتاری)

نکته مهم دیگر این است که عوامل بافتاری، عموماً بر عملکرد کارکردهای شکل‌دهی بازار و تأمین منابع اثر گذاشته‌اند. در صورتی مرحله دوم توسعه فناوری GHP (موتور محرک کارآفرینی) مجدداً و با رویکرد درنظرگرفتن عوامل بافتاری مورد تحلیل قرار گیرد:

گسترش فعالیت‌های کارآفرینی ناشی از اجرای پروژه‌های پایلوت، تا حدودی توانسته مشروعیت توسعه آن را در میان انجمن‌ها و گروه‌های فعال در حوزه‌های انرژی و محیطزیست افزایش دهد؛ ولی عوامل بافتاری مانع از تأمین منابع مالی در این بخش شده است. سهل‌گیرانه بودن استانداردها (استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان، بازدهی تجهیزات انرژی و محیط زیستی) نهایتاً سبب شده جذابیت سرمایه‌گذاری در بخش این بخش کاهش یابد و کارکرد تأمین منابع مالی تحقق نیابد.

از طرفی دیگر، به دلیل اینکه مزیت رقابتی GHP نسبت به رقبا، کاهش هزینه‌های مصرف انرژی است، پایین‌بودن قیمت حامل‌های انرژی، باعث می شود هزینه انرژی مصرف شده برای رقبا نیز کاهش یابد و این مزیت رقابتی از بین رود و به همین ترتیب مانع شکل‌گیری بازار (F5) آن گردد. از طرف دیگر سهل‌گیرانه بودن استانداردها سبب شده، GHP برای تولیدکنندگان مسکن به‌عنوان اصلی‌ترین بازار این حوزه گزینه جذابی نباشد و بازار مناسبی برای آن شکل نگیرد (F5).

٤-٧- مرحله هفتم: ارائه پیشنهادهای سیاستی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در صورتی‌که تحلیل ساختاری-کارکردی TIS مبنای سیاست‌گذاری توسعه این بخش قرار گیرد، باید سیاست‌هایی در جهت رفع شکست کارکرد تأمین منابع و کارکردهای حمایتی آن در مرحله دوم توسعه (کارکرد کارآفرینی و کارکرد مشروعیت‌بخشی) اتخاذ شود. ازاین‌رو رهنمودهای حاصل از تحلیل ساختاری-کارکردی TIS برای توسعه GHP شامل:

- سیاست‌هایی در جهت توسعه فعالیت‌های کارآفرینی: افزایش پروژه‌های مستقیم دولتی، حمایت از ورود شرکت‌های دانش‌بنیان، رفع موانع ورود شرکت‌های دانش‌بنیان به این حوزه، تلاش برای کاهش هزینه گمرک از تجهیزات و لوازم و قطعات که باعث کاهش مصرف انرژی می شوند، ایجاد الزام قانونی برای استفاده شرکت‌های دولتی از پمپ حرارتی و لحاظ کردن این شرط در اعطای مجوز ساخت، حمایت از صنایع و تولیدات که باعث کاهش مصرف انرژی می‌شوند
- سیاست‌هایی در جهت افزایش مشروعیت‌بخشی: فرهنگ‌سازی و آگاهی‌بخشی به عموم مردم در مورد مزایای استفاده از GHP به‌خصوص در مناطق جغرافیایی توجیه‌پذیر، ترویج استفاده از GHP در کشور از طریق مکانیزم‌های تبلیغاتی، حمایت از انجمن‌ها و گروه‌های مرتبط با این حوزه
- سیاست‌هایی در جهت تأمین منابع: تأمین اعتبار در خصوص جایگزینی سایر گزینه‌های سرمایش و گرمایش در ساختمان‌های بزرگ دولتی با گزینه پمپ حرارتی، پرورش تکنسین‌ها در حوزه‌های کاری خاص پمپ حرارتی زمین‌گرمایی
- سیاست‌هایی در جهت شکل‌دهی بازار: ایجاد سازوکار مناسب برای افزایش جذابیت پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی به‌منظور استفاده در ساختمان‌ها (به‌عنوان‌مثال اعطای وام‌های بلندمدت خرید تجهیزات پمپ حرارتی به خانوارهای استفاده‌کننده)، حمایت از شکل‌گیری بازار اولیه نصب و راه‌اندازی GHP

اما مطابق شکل ۱۲ توسعه GHP شدیداً به عوامل بافتاری وابسته است؛ بنابراین اگر در تحلیل نظام نوآوری آن، عوامل بافتاری مهم در نظر گرفته نشوند، شکست‌های سیستمی بسیار مهمی قابل‌استخراج نیستند. در بسیاری از موارد، شکست‌های سیستمی ناشی از عوامل بافتاری، ریشه شکست‌های کارکردی و ساختاری نیز محسوب می‌شود. عوامل بافتاری، محیط باثباتی را فراهم می‌کند که فناوری‌ها برای ادامه مسیر توسعه یا باید با آن سازگار شوند یا سعی کنند به نفع خود تغییر دهند که این امر می‌تواند رویکرد سیاست‌گذاری را تغییر دهد. رهنمودهای سیاستی حاصل از تحلیل بافتاری TIS برای توسعه GHP شامل:

- بازنگری در قوانین و مقررات زیست‌محیطی برای تجهیزات تهویه‌مطبوع
- بازنگری در استانداردهای بازدهی تجهیزات در بخش تهویه‌مطبوع
- پیاده‌سازی نظام پویا برای برچسب انرژی در ساختمان
- بازنگری در نحوه قیمت‌گذاری حامل‌های انرژی در ساختمان
- سازوکار مناسب برای استفاده انبوه سازان از GHP سرمایش و گرمایش در طرح‌های جدید انبوه سازی در مناطق جغرافیایی که قبلاً توجیه‌پذیری استفاده از این سیستم‌ها ثابت شده است
- ایجاد سازوکار مناسب برای اندازه‌گیری انرژی صرفه‌جویی شده در ساخامان و ایجاد بازار برای آن
- فرهنگ‌سازی برای گنجاندن صرفه‌جویی مصرف انرژی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های ارزش‌گذاری ساختمان میان مردم

۵- بحث و نتیجه‌گیری

مزایای سیستم GHP، پتانسیل مناسب کشور در بهره برداری از آن و مشکلات فعلی شبکه برق کشور سبب شده، توسعه آن برای کشور بسیار ضروری باشد. در حال حاضر پس از گذشت سال‌ها و صرف هزینه‌ها و اجرای پروژه‌های پایلوت دولتی، مرحله توسعه آن در کشور متوقف شده است. هدف اصلی این مقاله شناسایی دلایل عدم توسعه این فناوری در کشور و ارائه راه حل مناسب برای رفع این موانع است. از اینرو لازم است ابتدا از طریق مدلی جامع، کلیه شکست‌های سیستمی شناسایی و سیاستگذاری مناسب رخ دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

آنچه که استفاده از مدل پیشنهادی در این مقاله نشان داد این است که تأثیر عوامل بافتاری می‌تواند به طور قابل‌توجهی با آنچه که در ادبیات رایج TIS پیشنهاد می شود، متفاوت باشد. تجزیه‌وتحلیل شکست‌های مسیر توسعه GHP در این مقاله نشان داد که چگونه عدم هماهنگی توسعه یک فناوری با بافتار بخشی می‌تواند مانع از توسعه آن فناوری شود. در تحلیل رایج TIS، شکست توسعه این فناری به دلیل ناکافی بودن فعالیت‌های کارآفرینی، مشروعیت‌بخشی و یا منابع مالی تخصیص یافته بوده است. در صورتی که تحلیل بافتاری نظام نوآوری در مدل ارائه شده به وضوح نشان داد، قرار نگرفتن این فناوری در اهداف اصلی بخش مسکن، علت اصلی شکل نگرفتن بازار و تامین منابع برای این حوزه بوده است. این تغییر رویکرد می‌تواند ابزارهای سیاستی مورد استفاده را نیز تغییر دهد. در واقع اگر سیاست‌گذاری بر اساس رفع شکست‌های درونی TIS پایه‌گذاری شود، فعالیت‌هایی نظیر حمایت‌های مالی، حمایت از ورود شرکت‌ها، گسترش پروژه‌های دولتی و ... به‌عنوان اصلی‌ترین ابزار سیاتگذاری خواهد بود. در صورتی که بر اساس نتایج این مقاله اجرای این سیاست‌ها بدون رفع کردن شکست‌های سیستمی ناشی از عوامل بافتاری، منجر به توسعه پایدار فناوری نخواهد شد و به محض توقف حمایت‌ها، فرآیند توسعه متوقف خواهد شد. بنابراین توجه به عوامل بافتاری به‌قدری اهمیت دارند که در هر مرحله از توسعه فناوری، توانایی حذف کامل آن از مسیر توسعه را دارا هستند. در واقع کنار یکدیگر قرارگرفتن صحیح کارکردهای نظام نواوری فناورانه، نمی‌تواند به تنهایی موفقیت توسعه یک فناوری را تضمین نماید. فناوری که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، نمونه واضحی از تأثیر عوامل بافتاری در موفقیت و یا عدم موفقیت توسعه یک فناوری محسوب می‌شود.

مطالعه موردی ارائه شده در این مقاله، بینش جدیدی در مورد نقش عوامل بافتاری در موفقیت نظام نوآوری یک فناوری ارائه می‌دهد. این بینش نظری در مورد چگونگی ترکیب انواع بافتارها در تجزیه‌وتحلیل TIS بحث می‌کند و سعی می‌کند مقایسه‌ای از آن ارائه دهد. مدل ارائه شده در این مقاله، با ترکیب عوامل بافتاری و تجزیه‌وتحلیل TIS، مستقل از نوع فناوری و دوره زمانی بوده است و قابلیت استفاده در تحقیقات آینده در سایر فناوری‌ها را دارد.

٦- منابع:

[1] Allouhi, Amine. 2022. "Techno-Economic and Environmental Accounting Analyses of an Innovative Power-to-Heat Concept Based on Solar PV Systems and a Geothermal Heat Pump." *Renewable Energy* 191:649–61. doi: 10.1016/J.RENENE.2022.04.001.

[2] Bergek, Anna, Marko Hekkert, Staffan Jacobsson, Jochen Markard, Björn Sandén, and Bernhard Truffer. 2015. "Technological Innovation Systems in Contexts: Conceptualizing Contextual Structures and Interaction Dynamics." *Environmental Innovation and Societal Transitions* 16:51–64.

[3] Bergek, Anna, Staffan Jacobsson, Bo Carlsson, Sven Lindmark, and Annika Rickne. 2008a. "Analyzing the Functional Dynamics of Technological Innovation Systems: A Scheme of Analysis." *Research Policy* 37(3):407–29. doi: 10.1016/J.RESPOL.2007.12.003.

[4] Bergek, Anna, Staffan Jacobsson, Bo Carlsson, Sven Lindmark, and Annika Rickne. 2008b. "Analyzing the Functional Dynamics of Technological Innovation Systems: A Scheme of Analysis." *Research Policy* 37(3):407–29. doi: 10.1016/J.RESPOL.2007.12.003.

[5] Chahartaghi, Mahmood, Mohammad Kalami, Mohammad Hossein Ahmadi, Ravinder Kumar, and Ravindra Jilte. 2019. "Energy and Exergy Analyses and Thermoeconomic Optimization of Geothermal Heat Pump for Domestic Water Heating." *International Journal of Low-Carbon Technologies* 14(2):108–21. doi: 10.1093/ijlct/cty060.

[6] Dai, Yanjun, Xian Li, and Ruzhu Wang. 2015. "Theoretical Analysis and Case Study on Solar Driven Two-Stage Rotary Desiccant Cooling System Combined with Geothermal Heat Pump." *Energy Procedia* 70:418–26. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.02.143.

[7] ENERSOL EU, and https://www.duurzaammbo.nl/images/pdf/Heatpumps.pdf. 2004. *Heat Pumps Energy Saving and Renewable Energy in Vocational Education*.

[7] Eriksson, Marcus, and Lennart Vamling. 2007. "Future Use of Heat Pumps in Swedish District Heating Systems: Short- and Long-Term Impact of Policy Instruments and Planned Investments." *Applied Energy* 84(12):1240–57. doi: 10.1016/J.APENERGY.2007.02.009.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[7] Faride Etabi, Seyed Mohammadreza Heybati, and Setareh Mehrkhu. 1393. “Technical-Economic and Environmental Feasibility of Using Geothermal Heat Pumps in Iran.” *Environmental Science and Technology* 16(4):61–75.
[8] Farzanehkhameneh, Pooya, M. Soltani, Farshad Moradi Kashkooli, and Masoud Ziabasharhagh. 2020. “Optimization and Energy-Economic Assessment of a Geothermal Heat Pump System.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133:110282. doi: 10.1016/J.RSER.2020.110282.
[9] Gaigalis, Vygandas, Romualdas Skema, Kazys Marcinauskas, and Irena Korsakiene. 2016. “A Review on Heat Pumps Implementation in Lithuania in Compliance with the National Energy Strategy and EU Policy.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53:841–58. doi: 10.1016/J.RSER.2015.09.029.
[10] Ghoreishi-Madiseh, Seyed Ali, and Ali Fahrettin Kuyuk. 2017. “A Techno-Economic Model for Application of Geothermal Heat Pump Systems.” *Energy Procedia* 142:2611–16. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.12.200.
[11] Habibzadeh-Bigdarvish, Omid, Xinbao Yu, Gang Lei, Teng Li, and Anand J. Puppala. 2019. “Life-Cycle Cost-Benefit Analysis of Bridge Deck de-Icing Using Geothermal Heat Pump System: A Case Study of North Texas.” *Sustainable Cities and Society* 47:101492. doi: 10.1016/J.SCS.2019.101492.
[12] Hekkert, M. P., R. A. A. Suurs, S. O. Negro, S. Kuhlmann, and R. E. H. M. Smits. 2007. “Functions of Innovation Systems: A New Approach for Analysing Technological Change.” *Technological Forecasting and Social Change* 74(4):413–32. doi: 10.1016/J.TECHFORE.2006.03.002.
[13] Hu, Tianfei, Jiankun Liu, Zurun Yue, Lixia Xu, and Zongkai Zhang. 2022. “Proposed Application of a Geothermal Heat Pump Technique to Address Frost Damage of Embankments in Cold Regions.” *Cold Regions Science and Technology* 195:103474. doi: 10.1016/J.COLDREGIONS.2021.103474.
[14] isazade alireza. 2022. “Complete Familiarization with All Types of Heating Systems.” Retrieved May 12, 2023 (https://in.vitrinnet.com/building-heating-system).
[15] Jacobsson, Staffan, and Anna Bergek. 2011. “Innovation System Analyses and Sustainability Transitions: Contributions and Suggestions for Research.” *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1(1):41–57. doi: 10.1016/j.eist.2011.04.006.
[16] Jacobsson, Staffan, and Anna Johnson. 2000. “The Diffusion of Renewable Energy Technology: An Analytical Framework and Key Issues for Research.” *Energy Policy* 28(9):625–40.
[17] Katja Kruit, Joeri Vendrik, Pien van Berkel, and Fenneke van der Poll. 2020. *ZERO CARBON BUILDINGS 2050*.
[18] Kieft, Alco, Robert Harmsen, and Marko P. Hekkert. 2021. “Heat Pumps in the Existing Dutch Housing Stock: An Assessment of Its Technological Innovation System.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 44. doi: 10.1016/j.seta.2021.101064.
[19] Lee, Jae Seung, Hyun Chul Kim, and Shin Young Im. 2017. “Comparative Analysis Between District Heating and Geothermal Heat Pump System.” *Energy Procedia* 116:403–6. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.05.087.
[20] Lund, John W., and Aniko N. Toth. 2021. “Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review.” *Geothermics* 90:101915.
[21] Majuri, Pirjo. 2016. “Ground Source Heat Pumps and Environmental Policy – The Finnish Practitioner’s Point of View.” *Journal of Cleaner Production* 139:740–49. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.08.017.
[22] Noorollahi, Younes, Pedram Bigdelou, Fathollah Pourfayaz, and Hossein Yousefi. 2016. “Numerical Modeling and Economic Analysis of a Ground Source Heat Pump for Supplying Energy for a Greenhouse in Alborz Province, Iran.” *Journal of Cleaner Production* 131:145–54. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.059.
[23] Noorollahi, Younes, Muhammad Salman Shabbir, Ahmed F. Siddiqi, Lubov K. Ilyashenko, and Esmaeil Ahmadi. 2019. “Review of Two Decade Geothermal Energy Development in Iran, Benefits, Challenges, and Future Policy.” *Geothermics* 77:257–66. doi: 10.1016/J.GEOTHERMICS.2018.10.004.
[24] Nourollahi Younes, Yousefi Hossein, Rezayian Ali hossein, and Farabi asl hadi. 1395. “Technical, Economic and Environmental Feasibility of Replacing Conventional Urban Heating with Geothermal Energy in Iran.” *Environmental Science and Technology* 73–88.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[25] Sandén, Björn A., and Karl M. Hillman. 2011. “A Framework for Analysis of Multi-Mode Interaction among Technologies with Examples from the History of Alternative Transport Fuels in Sweden.” *Research Policy* 40(3):403–14. doi: 10.1016/J.RESPOL.2010.12.005.
[26] Setiawan, Andri D., Marmelia P. Dewi, Bramka Arga Jafino, and Akhmad Hidayatno. 2022. “Evaluating Feed-in Tariff Policies on Enhancing Geothermal Development in Indonesia.” *Energy Policy* 168:113164. doi: 10.1016/J.ENPOL.2022.113164.
[27] Suurs, Roald A. A. 2009. *Motors of Sustainable Innovation: Towards a Theory on the Dynamics of Technological Innovation Systems*. Utrecht University.
[28] Suurs, Roald A. A., and Marko P. Hekkert. 2009. “Cumulative Causation in the Formation of a Technological Innovation System: The Case of Biofuels in the Netherlands.” *Technological Forecasting and Social Change* 76(8):1003–20.
[29] Toth, Aniko. 2010. “Hungary Country Update 2005-2009.” Pp. 1–8 in *Proceedings World Geothermal Congress*.
[30] Wieczorek, Anna J., and Marko P. Hekkert. 2012. “Systemic Instruments for Systemic Innovation Problems: A Framework for Policy Makers and Innovation Scholars.” *Science and Public Policy* 39(1):74–87. doi: 10.1093/scipol/scr008.
[31] Yousefi, Hossein, Halldór Ármannsson, Soheil Roumi, Sanaz Tabasi, Hamed Mansoori, and Mehdi Hosseinzadeh. 2018. “Feasibility Study and Economical Evaluations of Geothermal Heat Pumps in Iran.” *Geothermics* 72:64–73. doi: 10.1016/j.geothermics.2017.10.017.
[32] Yousefi, Hossein, Sachio Ehara, and Younes Noorollahi. 2007. “Geothermal Potential Site Selection Using GIS in Iran.” Pp. 174–82 in *Proceedings of the 32nd workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California*.
[33] Yousefi Hossein, Rumi Hossein, Tabasi Sanaz, and Hamle dar maryam. 1395. “Economic and Environmental Analysis of Replacement of Natural Gas Heating System with Geothermal Pump in District 11 of Tehran.” *Quarterly Journal of Renewable and New Energies* 3(1):1–6.
[34] Zurmuhl, David P., Maciej Z. Lukawski, Gloria A. Aguirre, William R. Law, George P. Schnaars, Koenraad F. Beckers, C. Lindsay Anderson, and Jefferson W. Tester. 2019. “Hybrid Geothermal Heat Pumps for Cooling Telecommunications Data Centers.” Energy and Buildings 188–189:120–28. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.01.042.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]