



برنامه‌ریزی تحقیق و توسعه‌ی ساخت قرص‌های سوخت هسته‌ای توریم با استفاده از روش رهنگاری فن آوری

افسانه احمدی*^۱، سیدسپهر قاضی نوری^۲، سیدجواد احمدی^۳، بهزاد سلطانی^۴، فاطمه ثقفی^۵، نیلوفر محسنی^۲

۱. مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور، صندوق پستی: ۹۴۴۶۱-۴۳۵۸، تهران- ایران
۲. پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران
۳. دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۱۱۶-۱۴۱۱۵، تهران- ایران
۴. دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۵۳۱۵۳-۸۷۳۱۷، کاشان- ایران
۵. دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۱۳۱۱۴-۱۴۱۱۷، تهران- ایران

چکیده: افزایش تقاضای جهانی انرژی، همراه با حاد شدن مسائل مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و محدودیت‌های موجود در استفاده‌ی گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد مجدد انرژی هسته‌ای را در آینده اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. به دلیل اهمیت امنیت انرژی و تأمین پایدار منابع، مدیریت بهتر پسماند و نیز عدم کاربرد در تکثیر سلاح‌های هسته‌ای، بسیاری از کشورها استفاده از سوخت توریمی در حوزه‌ی انرژی هسته‌ای را مورد توجه قرار داده‌اند. اما انتخاب فن آوری‌های مناسب و تصمیم‌گیری صحیح در مورد سرمایه‌گذاری برای مدیران تحقیق و توسعه و سیاست‌گذاران به علت محدودیت منابع کاری بسیار دشوار است. هدف از این مقاله به کارگیری رهنگاری فن آوری برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی توسعه‌ی فن آوری تولید قرص‌های سوخت هسته‌ای توریم است. رویکرد شروع سریع T-Plan برای رهنگاری محصول- فن آوری ساخت قرص‌های سوخت هسته‌ای توریم انتخاب شد. با برگزاری کارگاه‌ها و مصاحبه با متخصصان، نوع محصول (قرص سوخت) از میان گزینه‌های مختلف سوخت‌های کاربیدی، اکسیدی و فلزی، قرص‌های ترکیبی اکسید توریم- اورانیم با غنای ۴.۸٪ انتخاب و مشخصه‌های عملکردی آن تعیین شد. براساس میزان اهمیت فن آوری که از شاخص‌های توانمندی و جذاب بودن به دست آمد، در خصوص فن آوری‌های تولید پودر، روش‌های رسوب‌گیری و سل- ژل به عنوان دو روش انتخابی در نظر گرفته شدند. در فن آوری تولید قرص دو روش قرص‌سازی با ریزگویی‌های سل- ژل (SGMP) و متالورژی پودر انتخاب شدند. در نهایت با پیشنهاد سرفصل‌های پژوهشی برای دست‌یابی به دانش فنی تولید قرص سوخت هسته‌ای توریم از طریق اکتساب درون‌زا، رهنگاشت توسعه‌ی فن آوری تولید قرص سوخت هسته‌ای توریم تدوین شد.

کلیدواژه‌ها: رهنگاری فن آوری، تحقیق و توسعه، سوخت هسته‌ای توریم

R&D Planning of Thorium Fuel Pellets Fabrication Using Technology Roadmapping Technique

A. Ahmadi*^{1,2}, S. Ghazinoory³, S.J. Ahmadi², B. Soltani⁴, F. Saghafi⁵, N. Mohseni²

1. National Research Institute for Science Policy, P.O.Box: 14358-94461, Tehran – Iran
2. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8496, Tehran – Iran
3. Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-116, Tehran – Iran
4. Faculty of Mechanical Engineering, Kashan University, P.O.Box: 87317-53153, Kashan – Iran
5. Faculty of Management, University of Tehran, P.O.Box: 14117-13114, Tehran- Iran

Abstract: Increasing of the global energy demand, effects of greenhouse gases emissions and restrictions on the use of renewable energies, will inevitably lead to rise again nuclear energy in the future. Due to the importance of energy security and the sustainability of resources, better waste management, as well as the inability to use nuclear proliferation, many countries have focused on the use of Thorium fuel in the nuclear energy field. It is very difficult to select appropriate technologies and make the right decisions about investing for R & D managers and policymakers because of resource constraints. The aim of this study is to use the technology roadmapping to support the development of the Thorium fuel pellets fabrication technology planning. First, the types of technology roadmapping processes were identified and T-plan approach were selected. Next, by holding workshops and expert panels, the type of fuel pellet, mixed Thorium with 4.8% enriched Uranium oxide pellet, was selected among carbide, oxide and metal fuels and its functional characteristics determined. Based on the technology importance, which was considered as capability and attractivity indicators, sedimentation and sol-gel methods were selected for powder production technologies, and SGMP and powder metalurgy methods were chosen because of their priorities. Finally, with the suggestion of research projects for the acquisition of technical knowledge of Thorium Fuel pellet fabrication, the technology roadmap was developed.

Keywords: Technology roadmap, Research and Development, Thorium fuel



۱. مقدمه

در اثر بحران‌های اقتصادی جهان، امروزه توجه به بخش انرژی به منظور مدیریت خطر (احتمالی) و کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی، پایداری و امنیت انرژی از اهمیت زیادی برخوردار است. طی دهه‌های آتی فن‌آوری‌های انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر، ذخیره‌ی کربن و فن‌آوری‌های جدید به‌کارگیری سوخت‌های فسیلی توسعه خواهند یافت [۱]. اما تغییر در زیرساخت‌های انرژی و تجهیزهای نهایی در هر کشور در سطح ملی پیچیده و گران است. بنابراین، برنامه‌ریزی حساب شده و دقیق برای این که منابع محدود به فعالیت‌های با بیش‌ترین اولویت اختصاص یابند، ضروری است. روش‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی فن‌آوری و تحقیق و توسعه وجود دارد. اما پذیرش ره‌نگاری فن‌آوری به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریتی برای برنامه‌ریزی توسعه‌ی فن‌آوری رو به فزونی است [۲]. سیاست‌گذاری در زمینه‌ی ایجاد تنوع در نوع سوخت و فن‌آوری‌های مربوط به سوخت هسته‌ای نیز نیازمند برنامه‌ریزی راهبردی و بلند مدت است؛ این مهم از طریق توسعه‌ی ره‌نگاشت فن‌آوری میسر می‌شود. با توجه به این که ایران در برنامه‌ی توسعه‌ی خود بیست هزار مگاوات برق هسته‌ای را مد نظر دارد، دست‌یابی به این هدف در نیروگاه‌های هسته‌ای منوط به دست‌یابی فن‌آوری‌های سوخت‌های شکاف‌پذیر بر پایه‌ی اورانیم یا توریم است. بنابراین، از مهم‌ترین فعالیت‌ها برای تدوین برنامه‌های راهبردی توسعه‌ی برق هسته‌ای، مطالعه و برنامه‌ریزی تولید سوخت هسته‌ای است. با وجود استفاده از شیوه‌ی ره‌نگاری به عنوان ابزار برنامه‌ریزی راهبردی تحقیق و توسعه در بسیاری از فن‌آوری‌ها در جهان، تجارب اندکی در حوزه‌ی فن‌آوری‌های انرژی هسته‌ای در کشور وجود دارد. بنابراین، می‌توان گفت پژوهش حاضر هم از نظر روش پژوهش و هم فن‌آوری انتخابی دارای نوآوری است. در این پژوهش با به‌کارگیری روش ره‌نگاری فن‌آوری برای توسعه‌ی فن‌آوری‌های تولید سوخت توریم، تلاش می‌شود با نگاهی جامع و حساب شده به نیازها، منابع، محصولات/خدمات، دانش و فن‌آوری به برنامه‌ریزی و مدیریت پژوهش و توسعه‌ی آن کمک شود.

سوالات محوری این پژوهش عبارت‌اند از: مهم‌ترین پیشران‌های توسعه‌ی فن‌آوری‌های تولید قرص سوخت هسته‌ای توریم چیست؟ چه نوع سوختی برای رآکتور انتخاب شده مناسب

است؟ چه فن‌آوری‌هایی برای تولید قرص سوخت هسته‌ای توریم رآکتور انتخاب شده، لازم است؟ چگونه می‌توان به این فن‌آوری‌ها دست یافت؟ هدف از این مقاله پشتیبانی از برنامه‌ریزی راهبردی و بلند مدت فن‌آوری تولید قرص‌های سوخت توریم با به‌کارگیری روش ره‌نگاری فن‌آوری با رویکرد شروع سریع^(۱) است تا فن‌آوری‌های کلیدی و روش‌های اکتساب آن‌ها شناسایی شوند.

این مقاله ابتدا با استفاده از مرور پیشینه‌ی پژوهش در زمینه‌ی ره‌نگاری فن‌آوری، فرایند مناسب ره‌نگاری تولید قرص سوخت هسته‌ای توریم را انتخاب می‌کند. سپس با اجرای گام‌های فرایند شروع سریع با برگزاری جلسات کارگاه و مصاحبه با متخصصان، نوع رآکتور و سپس نوع محصول (قرص سوخت) را از میان گزینه‌های مختلف انتخاب و مشخصه‌های عملکردی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. با شناسایی حوزه‌های کلیدی فن‌آوری‌های مرتبط با تولید قرص سوخت، سرفصل‌ها و پروژه‌های پژوهشی به منظور اکتساب آن فن‌آوری‌ها مشخص می‌شود.

۲. پیشینه‌ی پژوهش‌ها

ره‌نگاری فن‌آوری ابزار مدیریت راهبردی برای کمک به سازمان‌ها در شناسایی مؤثر محصولات و خدمات مورد نیاز در آینده، تعیین گزینه‌های مناسب فن‌آوری و ارتباط با برنامه‌های تخصیص منابع است [۳]. ره‌نگاری فن‌آوری، رویکردی انعطاف‌پذیر است که به طور گسترده در صنعت به منظور برنامه‌ریزی و یکپارچه‌سازی راهبردهای فن‌آوری با راهبردهای کسب و کار استفاده می‌شود [۴]. از زمان اولین کاربرد ره‌نگاشت در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ برای پشتیبانی برنامه‌ریزی یکپارچه‌ی محصول-فن‌آوری در شرکت چند ملیتی موتورولا مفاهیم و روش‌های ره‌نگاری به طور وسیعی در سطوح سازمان، بخش/صنعت و ملی به کار گرفته شده است [۵]. ره‌نگاشت فن‌آوری برنامه‌ی راهبردی است که گام‌هایی را که سازمان باید برای حصول به اهداف خود بردارد، توصیف می‌کند و ارتباط میان اقدامات و اولویت‌های کوتاه، میان و بلند مدت را نشان می‌دهد. هدف از ره‌نگاشت

فن‌آوری تسریع تمام فرایندهای تحقیق، توسعه و استقرار به منظور اراییه‌ی سریع‌تر فن‌آوری خاص به بازار است. فال و همکاران [۶]، ۴۰ نوع ره‌نگاشت فن‌آوری را بررسی و سپس آن‌ها را در ۱۶ حوزه دسته‌بندی کرده‌اند. ره‌نگاری، ابزاری برای



تأمین انرژی جهان خواهد بود [۱۲]. در همین راستا ره‌نگاشت انرژی هسته‌ای توسط سازمان توسعه‌ی همکاری‌های اقتصادی و آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۰ تدوین شد [۱۳]. اما با توجه

این‌که تا سال ۲۰۳۰ بیش‌تر نیروگاه‌های هسته‌ای جهان به پایان زمان مجاز بهره‌برداری نزدیک می‌شوند، ده کشور (سوئیس، امریکا، انگلیس، فرانسه، کانادا، آفریقای جنوبی، آرژانتین، برزیل، کره و ژاپن) برای تهیه‌ی ره‌نگاشت سیستم‌های پیشرفته‌ی انرژی هسته‌ای نسل چهار همکاری خود را آغاز نموده‌اند تا سیستم‌های جدید به طوری طراحی، ساخت و مورد بهره‌برداری قرار گیرند که مزیت صرفه‌ی اقتصادی، پذیرش عمومی، ایمنی و قابلیت اطمینان، مدیریت بهتر پسماند و مقاومت در برابر تکثیر سلاح‌های هسته‌ای تأمین شود [۱۴]. این ره‌نگاشت فن‌آوری به عنوان ابزاری برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی تحقیق و توسعه‌ی سیستم‌های

پیشرفته‌ی انرژی هسته‌ای شامل: رآکتورها، سیستم‌های تبدیل انرژی و تأسیسات چرخه‌ی سوخت از استخراج تا دفع نهایی پسماند استفاده می‌شود.

به طور خلاصه با افزایش نگرانی‌ها از تغییرات زیست محیطی، افزایش میزان تقاضا برای انرژی، محدودیت منابع فسیلی و موانع استفاده‌ی گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی هسته‌ای به عنوان یک انتخاب قابل قبول برای تولید انرژی الکتریکی با انتشار کم‌ترین مقدار گازهای گلخانه‌ای، پذیرفته می‌شود. البته این پذیرش عمومی مبتنی بر تأمین شرایط زیر است:

۱. افزایش ایمنی ذاتی رآکتورهای هسته‌ای؛
۲. کاهش خطر تکثیر سلاح‌های اتمی؛
۳. ارایه‌ی راه حل عملی برای دفن پسماندهای هسته‌ای دراز-عمر.

تلاش برای غلبه بر این مشکلات منجر به تلاش جهانی و بین‌المللی برای توسعه‌ی رآکتورهای پیشرفته شده است. در سال ۲۰۰۷، پروژه‌ی بین‌المللی در خصوص رآکتورهای هسته‌ای و چرخه‌های سوخت نوآورانه (INPRO)^(۱) برای معماری جامع سیستم‌های هسته‌ای نوآورانه (GAINS)^(۳) به منظور بررسی مزایای معرفی سیستم‌های نوآورانه آغاز شده است [۱۵]. راهکارهای جدید در فن‌آوری هسته‌ای برای تأمین الزامات فوق

پشتیبانی از جمع‌آوری اطلاعات، فرایند تصمیم‌گیری و ارتباطها در برنامه‌ریزی راهبردی فن‌آوری است [۷]. مفهوم ره‌نگاشت بسیار گوناگون است و در بسترهایی متفاوت کاربرد دارد [۸]. ره‌نگاری فن‌آوری به مدیران در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری‌های فن‌آورانه از طریق شناسایی فن‌آوری‌های کلیدی و تشخیص شکاف‌های فن‌آوری و تقویت تفکر ساختارمند برای آینده کمک می‌کند. در حقیقت ره‌نگاشت، راهنما و قطب‌نمایی برای برنامه‌ریزی پژوهش و توسعه‌ی جاری و آتی سازمان و تخصیص بهینه و استفاده مطلوب از منابع است. برنامه‌ریزی، یکی از موضوع‌های مهم در حوزه‌ی نوآوری و توسعه‌ی محصول یا فرایند جدید است. اما انتخاب فن‌آوری‌های مناسب و تصمیم‌گیری صحیح در مورد سرمایه‌گذاری برای مدیران تحقیق و توسعه و سیاست‌گذاران به علت محدودیت منابع و کاهش بودجه‌های تحقیقاتی کاری بسیار دشوار است؛

ره‌نگاشت فن‌آوری چارچوبی برای فراهم نمودن اطلاعات و روش‌شناسی لازم برای این تصمیم‌گیری‌ها ارائه می‌دهد [۹]. کاربرد ره‌نگاری فن‌آوری در برنامه‌ریزی تحقیق و توسعه، توسعه-ی محصول جدید توسط پتربیک و همکاران [۱۰] گزارش شده است.

کاربرد ره‌نگاری فن‌آوری در صنایع مختلف به خصوص نیمه‌رساناها و حوزه‌ی انرژی در امریکا، کانادا، ژاپن و اخیراً اروپا و استرالیا گسترش زیادی یافته است [۱۱]. با توجه به رشد تقاضای انرژی و نیز به دنبال چالش‌های جهانی مانند توسعه‌ی اقتصادی، انرژی ایمن و تغییرات آب و هوایی، در سال ۲۰۰۸ در اجلاس گروه ۸ بر شتاب بخشیدن به توسعه‌ی فن‌آوری‌های صفر و

کم-کربن برای کاهش ۵۰٪ در مقدار انتشار دی‌اکسید کربن تا سال ۲۰۵۰ تأکید شد و برای دستیابی به این هدف آژانس بین‌المللی انرژی به توسعه‌ی مجموعه‌ای از ره‌نگاشت‌های فن‌آوری‌های مهم پرداخته است. تاکنون بیش از ۲۰ ره‌نگاشت فن‌آوری انرژی منتشر شده است؛ با شناخت مرحله‌های لازم برای تغییرات سریع فن‌آورانه‌ی این ره‌نگاشت‌ها، دولت‌ها، صنایع و شرکت‌ها را قادر به تصمیم‌گیری صحیح می‌کند. بر اساس ره‌نگاشت انرژی جهان تا سال ۲۰۵۰ نقش انرژی هسته‌ای در کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای در حدود ۱۹٪ و سهم تولید انرژی با فن‌آوری هسته‌ای بالغ بر ۲۴٪ یعنی در حدود یک چهارم



رآکتورهای با سوخت هسته‌ای توریم هستند [۱۹]. سوخت هسته‌ای توریم به شکل‌های گوناگون فلزی، اکسیدی و کاربیدی در رآکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. سوخت هسته‌ای توریم دی اکسید (ThO_2) به تنهایی و یا به صورت مخلوط با اورانیم اکسید ($(\text{Th, U})\text{O}_2$)، به دلیل پایداری شیمیایی در دماهای بالا و همچنین دارا بودن پایداری شکلی پس از قرار گرفتن در معرض پرتوها، کاربرد بسیاری دارد.

مطالعه‌های اولیه در زمینه‌ی به‌کارگیری سوخت هسته‌ای توریم در کشورهای آلمان، هند، روسیه، انگلستان و آمریکا شروع شد. در جدول ۱ نام رآکتورهایی که در آنها از سوخت توریم استفاده شده و می‌شود، آورده شده است [۱۹]. سوخت توریم می‌تواند در انواع رآکتورها از قبیل رآکتورهای آب سبک تحت فشار (PWRs)، رآکتورهای آب سبک تحت فشار روسی (WWERs) رآکتورهای آب سبک جوشان (BWRs)، رآکتورهای آب سنگین (HWRs)، رآکتورهای تند زاینده (FBRs)، رآکتورهای دما- بالا (HTRs/HTGRs) و رآکتورهای نسل چهار مانند رآکتورهای خنک شده با نمک مذاب (MSR) مورد استفاده قرار گیرد. فعالیت‌های زیادی در بسیاری از کشورها در حال انجام است؛ کشور هند به دلیل دارا بودن منابع زیاد توریم، در این زمینه پیشرو است، تلاش‌های هند بیش‌تر بر رآکتورهای آب سنگین متمرکز است [۲۰]. عنصر توریم با فراوانی ۳ تا ۴ برابر اورانیم و با قابلیت استخراج آسان به طور گسترده در طبیعت، در بسیاری از کشورها وجود دارد. بر اساس گزارش سال ۲۰۰۵ آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)، هند با مقدار ذخیره‌ی قطعی ۵۱۹۰۰۰ تن حدود ۲۱٪ و استرالیا با مقدار ذخیره‌ی قطعی ۴۸۹۰۰۰ تن حدود ۱۹٪ از ذخایر تخمینی توریم دنیا را دارا هستند. کشور ایران به دلایل زمین‌شناختی، دارا بودن رخنمون‌های وسیع سنگی واجد توریم و ویژگی فیزیکی- شیمیایی توریم می‌تواند منبع و جای‌گاه ویژه‌ای از نظر ذخایر توریم داشته باشد.

مورد بررسی قرار گرفته‌اند و استفاده از چرخه‌ی سوخت هسته‌ای توریم یکی از انتخاب‌های پیش‌رو است. مجله‌ی نیوزویک در مقاله‌ای با عنوان «فرصت از دست رفته» عنوان می‌کند: «امید بخش‌ترین مسیر به سمت سوخت‌های مقاوم در برابر تکثیر سلاح‌های هسته‌ای، بازگشت به مسیری است که ۵۰ سال پیش رها شده است یعنی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای توریم» [۱۶]. اگرچه پژوهش در مورد کاربردهای ممکن توریم به عنوان سوخت هسته‌ای هم‌زمان و به موازات آغاز مطالعات استفاده از اورانیم و پلوتونیم شروع شد، متأسفانه به دلایل سیاسی، بسیار کم‌تر از اورانیم به آن توجه شد و بعد از سال‌های جنگ سرد که مسأله‌ی کاربرد انرژی هسته‌ای در مسایل غیرنظامی و تولید الکتریسیته مورد توجه قرار گرفت، مطالعات توریم نیز افزایش یافت [۱۷]. از این‌رو اطلاعات هسته‌ای گزارش شده در خصوص این چرخه بسیار محدود بوده و تاکنون هیچ رآکتور تجاری بر پایه‌ی سوخت توریم در دنیا راه‌اندازی نشده است [۱۸].

برخلاف اورانیم طبیعی که دارای دو ایزوتوپ ^{238}U و ^{235}U با فراوانی به ترتیب ۰٫۷٪ و ۹۹٫۳٪ است، توریم طبیعی ۱۰۰ درصد از ایزوتوپ ^{232}Th تشکیل شده است. از این‌رو، امکان استفاده از همه‌ی توریم استخراج شده به عنوان سوخت هسته‌ای در رآکتور وجود دارد که در مقایسه با اورانیم طبیعی، مقدار بسیار زیادی است. به طور کلی دو نوع سوخت شناخته‌شده‌ی رآکتورهای هسته‌ای، سوخت‌های بر پایه‌ی اورانیم و توریم هستند. سوخت هسته‌ای شامل دو نوع ماده‌ی بارور و شکافت‌پذیر است. در سوخت‌های هسته‌ای اورانیم، ^{238}U ؛ و توریم، ^{232}Th نقش ماده‌ی بارور را بر عهده دارند. از آن‌جا که توریم قادر به شروع واکنش زنجیره‌ای نیست، یک ماده‌ی شکافت‌پذیر دیگر باید به عنوان آغازگر واکنش هسته‌ای در رآکتور مورد استفاده قرار گیرد. این ماده‌ی شکافت‌پذیر می‌تواند ^{235}U ، ^{233}U ، و یا ^{239}Pu باشد. ^{232}Th با جذب نوترون، به ^{233}U تبدیل می‌شود. بنابراین دو ایزوتوپ ^{232}Th و ^{233}U به ترتیب عناصر بارور و شکافت‌پذیر در

جدول ۱. رآکتورهای بر پایه‌ی سوخت توریم [۱۹]

نام کشور	نام رآکتور	نوع رآکتور	قدرت رآکتور (مگاوات)	تاریخ شروع بهره‌برداری	نوع سوخت
آمریکا	Indian point	PWR	۲۵۶ _e	۱۹۶۲	$\text{UO}_2\text{-ThO}_2$
	Shippingport	PWR	۶۰ _e	۱۹۶۴	$\text{UO}_2\text{-ThO}_2$
	Elkriver	BWR	۲۲ _e	۱۹۵۷	$\text{UO}_2\text{-ThO}_2$
	Peach bottom	HTR	۴۰ _e	۱۹۶۷	$\text{UC}_2\text{-ThC}_2$
	Forst st.vrain	HTR	۳۳۰ _e	۱۹۷۶	$\text{UC}_2\text{-ThC}_2$
	MSRE	MSR	۱ _{th}	۱۹۶۵	$\text{UF}_4\text{-ThF}_4$



UC _۲ -ThC _۲	۱۹۶۴	۲ th	HTR	Dragon	انگلیس
UC _۲ -ThC _۲	۱۹۶۷	۱۵ ^e	HTR	AVR	آلمان
UC _۲ -ThC _۲	۱۹۸۵	۳۰ ^e	HTR	THTR	
UC _۲ -ThC _۲	۱۹۶۸	۶ ^e	BWR	Lingen	
UO _۲ -ThO _۲	۲۰۰۰/۰۳	۲۰ ^e	PHWR	Kaiga1-2	هندوستان
UO _۲ -ThO _۲	۲۰۰۰	۲۰ ^e	PHWR	RAPS3-4	
UO _۲ -ThO _۲	۱۹۹۳/۹۵	۲۰ ^e	PHWR	KAPS1-2	

۳. روش پژوهش

تدوین یا انتخاب یک مدل مناسب برای برنامه‌ریزی راهبردی پژوهش و توسعه در حوزه‌ی تولید سوخت هسته‌ای توریم گام مهمی است. در ادبیات مدیریت فن‌آوری روش‌های مختلفی برای توسعه‌ی راهبرد فن‌آوری و برنامه‌ریزی تحقیق و توسعه وجود دارد اما متداول‌ترین و انعطاف‌پذیرترین مدل، رهنگاشت عمومی نموداری چند لایه و مبتنی بر زمان است که لایه‌های مختلف پیشران‌های کسب و کار، استراتژی محصول/خدمت، فن‌آوری، قابلیت‌ها و منابع را به هم وصل می‌کند [۲۱]. مدل‌ها و چارچوب‌های مختلفی برای رهنگاری فن‌آوری ارائه شده است؛ از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان در سطح بنگاه به مدل انجمن تحقیقات صنعتی اروپا (EIRMA) بر اساس تجربه‌ی شرکت فیلیپس در سال ۱۹۹۷، مدل آزمایشگاه ملی سندیا در آمریکا برای برنامه‌ریزی

فن‌آوری [۲۲]، چارچوب آژانس بین‌المللی انرژی برای رسیدن به فن‌آوری‌های نوآورانه‌ی انرژی [۱۲، ۱۳] و چارچوب مرکز مدیریت فن‌آوری دانشگاه کمبریج بر اساس فعالیت‌های فال و همکاران [۲۳] برای رهنگاری محصول- فن‌آوری نام برد. در این پژوهش از مدل اخیر استفاده شده است زیرا ارتباط بسیار مستحکمی با تفکر سیستمی دارد و از سرعت انجام بالایی برخوردار بوده و به طور موفقیت‌آمیزی در حوزه‌های مختلف فن‌آوری‌های نوین به کار گرفته شده و دارای بیش‌ترین میزان ارجاع است [۲۴]. مهم‌ترین تصمیمات در این رهنگاشت انتخاب فن‌آوری‌ها و زمان‌بندی آن است و هدف این روش شناسی بهبود فرایند تصمیم‌گیری در حوزه‌ی سرمایه‌گذاری فن‌آورانه است. این روش شامل سه مرحله‌ی اصلی- برنامه‌ریزی، توسعه‌ی رهنگاشت و اجرا است. روش استاندارد توسعه و تدوین رهنگاشت در سازمان برای برنامه‌ریزی راهبردی محصول- فن‌آوری شامل چهار کارگاه است.

کارگاه بازار: برای شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌های بیرونی و

درونی و تعیین نیازها،

کارگاه محصول: برای شناسایی ویژگی‌ها، کارکردها و مشخصه‌های ممکن محصول و اولویت‌بندی آن‌ها با توجه به قدرتشان در پاسخ به نیازها،

کارگاه فن‌آوری: برای شناسایی راه‌حل‌های فن‌آورانه‌ی ممکن برای توسعه‌ی ویژگی‌های محصول شناسایی و اولویت‌بندی شده و شناسایی شکاف‌های دانش.

کارگاه ترسیم نمودار: رهنگاشت اولیه که پیونددهنده‌ی دیدگاه‌های بازار، محصول و فن‌آوری است بر اساس خروجی‌های سه کارگاه اول ایجاد می‌شود و اقدامات مورد توافق قرار می‌گیرند [۲۳]. رویکرد شروع سریع در شکل ۱ نشان داده شده است.

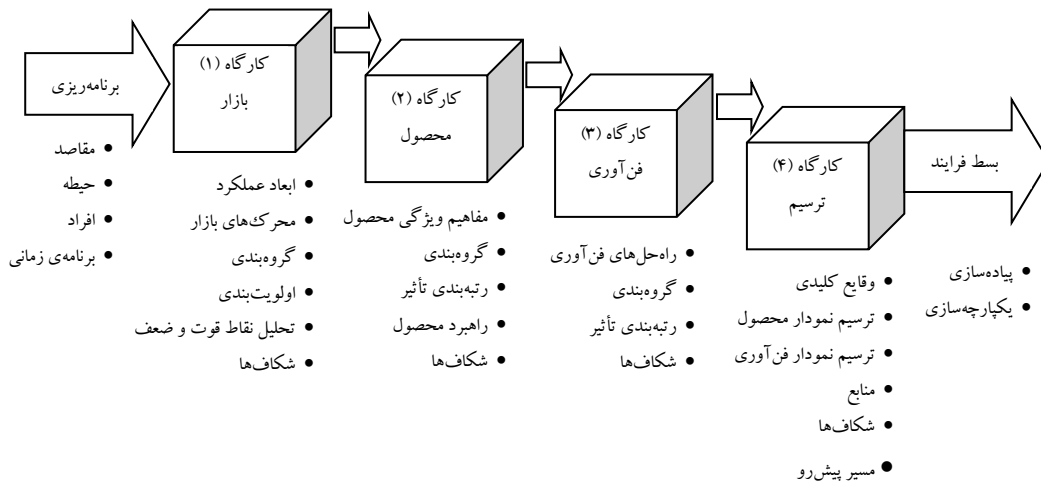
جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای پژوهش به دو صورت کتابخانه‌ای و میدانی انجام شده است. روش کتابخانه‌ای شامل مطالعه‌ی متن‌های فارسی و انگلیسی در رابطه با ادبیات مربوط به رهنگاری فن‌آوری، سیستم‌های انرژی هسته‌ای (رآکتور و چرخه‌های سوخت اورانیم و توریم) در بازه‌ی زمانی از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۵ است. در روش میدانی از دو گروه از خبرگان استفاده شده است:

۱. خبرگان مدیریت و سیاست‌گذاری علم و فن‌آوری، که واجد حداقل یکی از شرایط زیر بوده‌اند:

- عضو هیات علمی دانشگاه‌ها یا مؤسسات پژوهشی در زمینه‌های سیاست‌گذاری علم و فن‌آوری، آینده پژوهی، مدیریت فن‌آوری؛
- مدیر یا مشاور پروژه‌های حوزه‌ی مدیریت فن‌آوری و نوآوری،
- مدیر یا کارشناس ارشد در یکی از سازمان‌ها و دستگاه‌های اجرایی در حوزه‌ی سیاست‌گذاری و مدیریت راهبردی؛

- مدیر یا کارشناس پروژه‌های مرتبط با چرخه‌ی سوخت توریم،
- مدیر و معاون پژوهشکده‌ی چرخه سوخت،
- کارشناس ارشد حوزه‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای.

۲. خبرگان در حوزه‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای توریم، متشکل از ۸ نفر با حداقل دارای یکی از ویژگی‌های زیر بوده‌اند:



شکل ۱. فرایند شروع سریع برای برنامه‌ریزی راهبردی محصول- فن‌آوری [۲۳].

برخی از خبرگان و کارشناسان پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای، اهداف اصلی، افق زمانی، مخاطبین اصلی و منابع موجود برای تدوین رهنگاشت فن‌آوری شناسایی شدند. در جدول ۲ خلاصه‌ی اطلاعات مورد نیاز در فاز مقدماتی درج شده است.

- فاز توسعه. این فاز با تکمیل فاز اول آغاز می‌شود. مرحله‌هایی که در این فاز باید اجرا شود بسته به هر سازمان یا حتی قسمت‌های مختلف درون یک سازمان متفاوت است و به بستر سازمان بستگی دارد. پس از انتخاب رویکرد اجرای فرایند رهنگاری شروع سریع، یک کارگاه ابتدایی برای هر لایه و یک کارگاه نهایی برای ارتباط بین این لایه‌ها برگزار می‌شود.

جدول ۲. اطلاعات مورد نیاز در مرحله‌ی مقدماتی توسعه‌ی رهنگاشت فن‌آوری تولید قرص سوخت توریم

اهداف اصلی	تبیین پیشران‌ها و محرک‌ها برای تعیین نوع سوخت توریم، تعیین نوع سوخت توریم، تعیین مشخصات کارکردی یا ویژگی‌های مطلوب قرص سوخت توریم، مشخص نمودن مهم‌ترین حوزه‌های فن‌آوری ساخت قرص‌های سوخت توریم، تعیین شکاف فن‌آوری میان وضع موجود و مطلوب،
------------	---

روش مصاحبه‌ی اکتشافی با خبرگان گروه ۱ برای مناسب بودن روش شروع سریع برای رهنگاری فن‌آوری تولید سوخت توریم و میزگرد خبرگان گروه ۲ برای شناسایی و اولویت‌بندی پیشران‌ها، نیاز بازار (راکتورها)، محصولات برای پاسخ به نیاز بازار (انواع قرص‌های سوخت)، فن‌آوری‌های کلیدی برای دست‌یابی به محصولات و نهایتاً سرفصل‌های پژوهشی برای کسب این فن‌آوری‌ها استفاده شد.

۴. تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این مقاله، ساختار رهنگاشت فن‌آوری تولید قرص سوخت توریم دارای چهار لایه‌ی اهداف یا نیازهای بازار، محصول، فن‌آوری و سرفصل‌های پژوهشی است. فرایند رهنگاری در این پژوهش از دو مرحله یا فاز اصلی تشکیل شده است:

- فاز آماده‌سازی اولیه. در این مرحله بر تعیین عناصر کلیدی و مهمی تأکید می‌شود که به توسعه‌ی رهنگاشت اعتبار می‌بخشد. این عناصر کلیدی عبارت‌اند از: بستر، هدف، موضوع و محدوده‌ی رهنگاشت، فرایند و ساختار. در این مرحله از طریق مطالعه‌های اسنادی، مصاحبه‌ی حضوری و تشکیل جلسات با



مصرف انرژی جهان با چشم‌انداز بسیار بلند-مدت، برنامه‌های متفاوتی را ترسیم می‌کند. ظرفیت برق هسته‌ای از ۳۷۰ گیگا وات در سال ۲۰۱۲ به ۵۰۱ گیگا وات در برنامه‌ی حداقلی و ۷۴۶ گیگا وات در برنامه‌ی حداکثری تا سال ۲۰۳۰ خواهد رسید [۲۷]. در جدول ۳ مهم‌ترین پیشران‌های توسعه‌ی برق هسته‌ای (راکتور و چرخه‌ی سوخت) و توسعه‌ی سوخت توریم جمع-بندی و آورده شده است.

در اصل، سوخت توریم می‌تواند در طیف نسبتاً وسیعی از انواع راکتورهای هسته‌ای- به ویژه در تمام طرح‌های موجود و تعدادی از طرح‌های در حال توسعه- استفاده شود. طراحی سوخت‌های هسته‌ای توریم، بسته به این که برای انواع راکتورهای در حال کار در صنعت هسته‌ای و یا برای راکتورهای آینده باشد، به طور قابل توجهی متفاوت خواهد بود. (راکتورهای آینده اشاره به راکتورهای زاینده، راکتورهای خنک شده با نمک مذاب و راکتورهای زیربحرانی واداشته شده با شتاب‌دهنده^(۴) دارد). در حالت اول، ما با فن‌آوری‌های توسعه- یافته که تحت شرایط خاصی، امکان جای‌گزینی سوخت‌های سنتی با سوخت توریم را فراهم می‌آورد، سروکار داریم. این، راکتورهای آب سبک و راکتورهای آب سنگین را در بر می‌گیرد. در حالت دوم سیستم‌های انرژی هسته‌ای به طور خاص برای یک چرخه‌ی سوخت توریم توسعه داده می‌شوند. طی برگزاری کارگاه اول برای جمع‌بندی در بخش بازار، با در نظر گرفتن اولویت راکتور تحقیقاتی نسبت به راکتورهای قدرت و راکتور آب سنگین نسبت به آب سبک، یک راکتور تحقیقاتی آب سنگین انتخاب و تولید سوخت توریم برای این بازار فرض شد. شکل ۲ خروجی کارگاه اول یعنی بازار برای محصول سوخت توریم را نشان می‌دهد.

تعیین راهکارها برای پرکردن شکاف فن‌آورانه (سرفصل‌های پژوهشی).	
۱۰ سال / قرص‌های سوخت ThO_2 و $(Th,U)O_2$	افق زمانی / محصول نهایی
سیاست‌گذاران سازمان انرژی اتمی ایران، مدیران چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، کارشناسان و متخصصان، کاربران محصول.	مخاطبین اصلی
اسناد بالا-دستی توسعه‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، مقالات، گزارشات و مدارک ثبت اختراع، مشارکت خبرگان و صاحب نظران.	منابع موجود

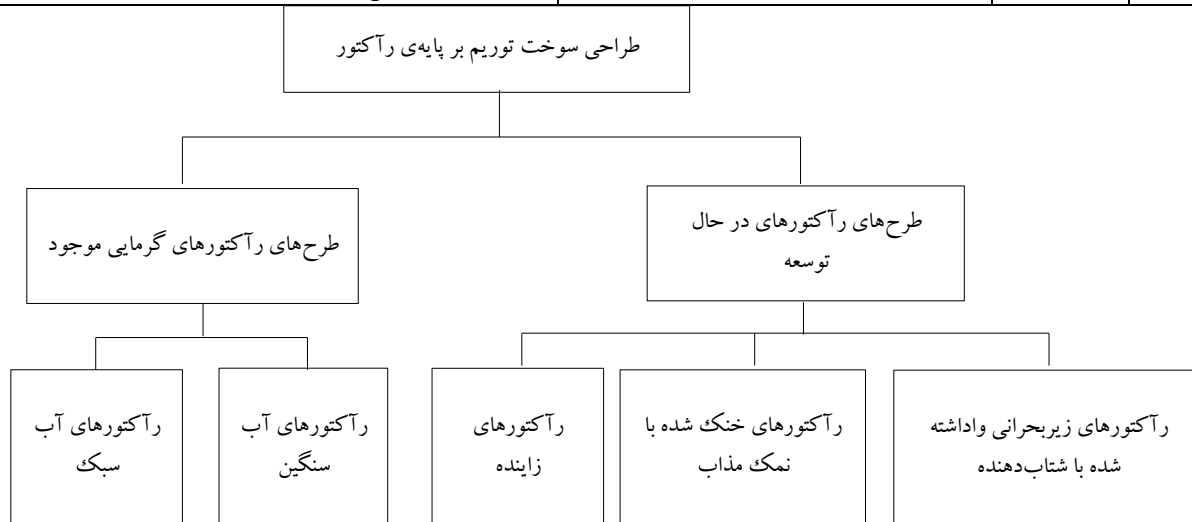
کارگاه بازار (۱)

این مرحله، مرحله‌ی تمرکز بر بازار و نیازها است. ابتدا از طریق مطالعه‌ی اسناد و مصاحبه با خبرگان و سپس برگزاری جلسه با متخصصان پروژه‌ی تولید دانش فنی تولید قرص‌های سوخت توریم، بازار و بخش‌های آن مورد بررسی قرار گرفته و اولویت بازار تعیین شد. نقطه‌ی آغاز، شناسایی مهم‌ترین دلایل حرکت به سمت توسعه‌ی سوخت هسته‌ای توریم است. افزایش تقاضای انرژی جهانی به دلیل دو پیشران مهم افزایش جمعیت و رشد میزان توسعه‌یافتگی، همراه با حاد شدن مسائل مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشکلات و محدودیت‌های موجود در استفاده‌ی گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد مجدد انرژی هسته‌ای را در آینده اجتناب‌ناپذیر نموده است [۲۵]. تخمین میزان مصرف انرژی در میان- و بلند-مدت توسط سازمان‌های بین‌المللی، منطقه‌ای یا ملی بر اساس فرضیات مختلف درباره‌ی عوامل اساسی و مهم مانند قیمت انواع سوخت در آینده، محدودیت‌های فیزیکی، اقتصادی و سیاسی قابل اعمال بر تولید و مصرف انرژی، ارتباط بین مصرف انرژی و توسعه‌ی اقتصادی، تغییرات جمعیت‌شناختی و پیشرفت‌های فن‌آورانه و نیز چشم‌انداز توسعه‌ی اقتصادی هر منطقه انجام شده است [۲۶]. فرضیات یا شرایط حاکم بر عوامل پیش‌گفته از یک منطقه به منطقه‌ی دیگر جهان و حتی از یک کشور به کشور دیگر فرق می‌کند. مطالعات

جدول ۳. مهم‌ترین پیشران‌های توسعه‌ی برق هسته‌ای (راکتور و چرخه‌ی سوخت) و توسعه‌ی سوخت توریم

ابعاد	توسعه‌ی برق هسته‌ای	توسعه‌ی سوخت توریم
اجتماعی	افزایش جمعیت افزایش تقاضای انرژی افزایش درک عموم از مزایای برق هسته‌ای	افزایش پذیرش عموم
فن‌آوری	توسعه‌ی فن‌آورانه‌ی سیستم‌های نسل چهارم توسعه‌ی فن‌آوری انرژی‌های تجدیدپذیر پتانسیل استفاده برای تولید هیدروژن و آب‌شیرین‌کن‌ها توسعه‌ی فن‌آوری‌های پیشرفته در حوزه‌ی ساخت مواد و تجهیزات	چگالی انرژی بالاتر توریم نسبت به اورانیم بهبود کاربری سوخت شکافت‌پذیر در راکتورهای گرمایی دست‌یابی به میزان مصرف بالاتر بازدهی نوترونی بالاتر اورانیم ۲۳۳ در گستره‌های گرمایی و فوق-گرمایی امکان دست‌یابی به زاینده‌گی در راکتورهای گرمایی عدم نیاز به غنی‌سازی افزایش طول دوره‌ی بهره‌برداری
اقتصادی	افزایش توسعه‌ی اقتصادی	هزینه‌ی تولید سوخت توریم، ۳٪ هزینه‌ی تولید سوخت اورانیم

سهم تغییر قیمت سوخت بر هزینه‌ی برق تولیدی کم‌ترین هزینه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	هزینه‌ی تولید برق با رآکتور هسته‌ای توریم یک دهم هزینه‌ی تولید برق با رآکتورهای هسته‌ای اورانیم منابع بیش‌تر و پراکندگی گسترده‌تر نسبت به اورانیم
زیست-محیطی بیش‌ترین پتانسیل برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای عدم انتشار گازهای سمی (NO_x) و (SO_2) و ذرات معلق	ایمنی: عملکرد ایمن‌تر قلب به دلیل کاهش نیاز به رآکتیویته‌ی اضافی قابلیت اطمینان: کارکرد با قابلیت اطمینان بیش‌تر در میزان مصرف بالا به دلیل مقاومت بهتر قرص توریم اکسید در مقابل خوردگی و پرتو کاهش تولید پسماندهای پرتوزای خطرناک با نیم-عمرهای بالا
سیاسی امنیت تأمین انرژی سیاست‌ها و قوانین محرک یا بازدارنده	پتانسیل کم‌تر برای تولید پلوتونیم و امکان سوزاندن پلوتونیم ذخیره شده مقاومت در برابر تکثیر سلاح‌های هسته‌ای



شکل ۲. خروجی کارگاه بازار.

کارگاه محصول (۲)

در حالت‌های مختلف در شبیه‌سازی بررسی شدند. بر طبق نتایج حاصل مدل ۲ با بهترین تطبیق به عنوان طرح سوخت مخلوط انتخاب شد. هم‌چنین قرص سوخت توریم دی اکسید برای استفاده در دو مدل ۳ و ۴ انتخاب شد. از آن‌جایی که امکان دسترسی به ^{239}Pu در داخل کشور وجود ندارد، از اورانیم دی اکسید غنی‌شده به عنوان سوخت آغازگر واکنش زنجیره‌ای در شبیه‌سازی استفاده شد. از طریق کارگاه دوم و میزگردهای تخصصی نوع سوخت توریم، ویژگی‌ها، کارکردها و جنبه‌های عملکردی محصول تعریف شد. خروجی کارگاه محصول، جمع-بندی شده و در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای اجرای موفق ره‌نگاری فن‌آوری نیاز به شناخت فنی کافی از حوزه‌ی مورد نظر داریم. برای این منظور، مشخصات عملکردی محصولات توسط متخصصان تعیین شد (جدول ۵).

کارگاه فن‌آوری (۳)

برای رآکتورهای آب سنگین با سوخت توریم مخلوط همگن اکسیدهای فلزی بهترین گزینه است که چگونگی ساخت و استفاده‌ی آن نیازمند پروژه‌های مطالعاتی است. در رآکتورهای موجود امروزی، سوخت، تک‌جزیی است. اما سوخت همگن

هدف کارگاه دوم تعیین سبد محصولات یا محصول جدید بر اساس نیازها و نوع رآکتور شناسایی شده در کارگاه اول است. کلیدی‌ترین تصمیم در طول پروژه‌ی تدوین ره‌نگاشت، انتخاب نوع محصول است زیرا منجر به شروع اقدامات گوناگونی مانند تأمین مالی، طراحی و مهندسی، تأمین مواد و قطعات، ایجاد زیرساخت‌های آزمون، تولید و غیره می‌شود که در صورت انتخاب نادرست بار زیادی بر سازمان تحمیل می‌کند. از این‌رو، انتخاب باید با خبرگی هر چه تمام‌تر و تحلیل نقاط شکست آتی صورت گیرد و حالت‌های مختلف ترکیب سوخت با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بررسی شود. در این قسمت بر اساس مطالعات و محاسبات نوترونی انجام شده [۲۸]، یک مدل مرجع برحسب طرح رآکتور پایه با سوخت اورانیم، در نظر گرفته شد و ۴ مدل دیگر با سوخت توریم با استفاده از کد MCNPX 2.6 مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴). سه طرح همگن (مخلوط اورانیم دی اکسید و توریم دی اکسید در داخل قرص)، نیمه-همگن (میله‌های سوخت اورانیم دی اکسید و توریم دی اکسید مجزا در داخل یک مجتمع سوخت) و ناهمگن (مجتمع‌های سوخت توریم دی اکسید و اورانیم دی اکسید به صورت مجزا)



جلوگیری از ایجاد نقاط داغ در سوخت باید در مقیاس میکروسکوپی همگن باشد. دو روش مخلوط کردن وجود دارد: روش‌های شیمیایی و روش‌های مکانیکی.

توریم شامل دو جزء- توریم اساساً به عنوان ماده‌ی بارور و پلوتونیم یا اورانیم- ۲۳۳ یا ۲۳۵ به عنوان ماده‌ی شکافت‌پذیر- است. اضافه کردن ماده‌ی شکافت‌پذیر به سوخت توریم با مشکلات و چالش‌های زیادی همراه است چرا که ترکیب برای

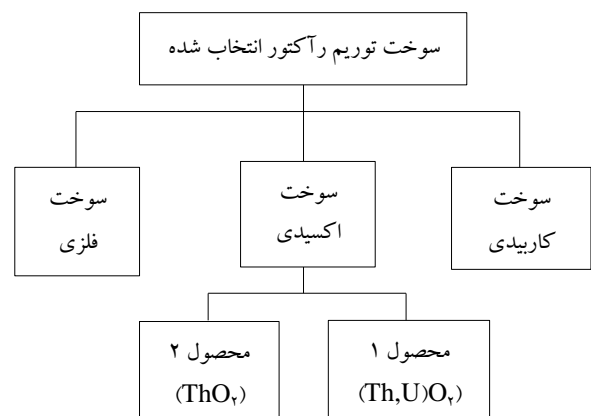
جدول ۴. مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی نوترونی رآکتور [۲۸]

مدل مورد بررسی	
مدل مرجع	سوخت اورانیم دی‌اکسید با غنای طبیعی (در تمام قلب)
طرح همگن	سوخت مخلوط ۷۰٪ توریم دی‌اکسید و ۳۰٪ اورانیم دی‌اکسید با غنای ۴٪ وزنی (در تمام قلب)
	سوخت مخلوط ۵۰٪ توریم دی‌اکسید و ۵۰٪ اورانیم دی‌اکسید با غنای ۳٪ وزنی (در تمام قلب)
	سوخت مخلوط ۷۰٪ توریم دی‌اکسید و ۳۰٪ اورانیم دی‌اکسید با غنای ۴٫۷٪ وزنی (در تمام قلب)
	سوخت مخلوط ۷۰٪ توریم دی‌اکسید و ۳۰٪ اورانیم دی‌اکسید با غنای ۴٫۸٪ وزنی (در تمام قلب)
طرح نیمه‌همگن	۶ میله‌ی سوخت شامل اورانیم دی‌اکسید با غنای ۵٪ وزنی و ۱۲ میله‌ی سوخت شامل توریم دی‌اکسید (در هر یک از مجتمع‌های سوخت قلب)
	۱۲ میله‌ی سوخت شامل اورانیم دی‌اکسید با غنای ۱٫۵٪ وزنی و ۶ میله‌ی سوخت شامل توریم دی‌اکسید (در هر یک از مجتمع‌های سوخت قلب)
	۶ میله‌ی سوخت شامل اورانیم دی‌اکسید با غنای ۷٪ وزنی و ۱۲ میله‌ی سوخت شامل توریم دی‌اکسید (در هر یک از مجتمع‌های سوخت قلب)
طرح ناهمگن	۹۶ مجتمع سوخت شامل اورانیم دی‌اکسید با غنای ۱٫۵٪ وزنی و ۵۴ مجتمع سوخت شامل توریم دی‌اکسید (در تمام قلب)
	۹۶ مجتمع شامل اورانیم دی‌اکسید با غنای ۰٫۸٪ وزنی و ۵۴ مجتمع سوخت شامل توریم دی‌اکسید (در تمام قلب)

جدول ۵. مشخصات عملکردی محصولات

مشخصات عملکردی محصول	محصول ۱ (مدل ۲، جدول ۴) $(Th,U)O_2$	محصول ۲ (سوخت توریم دی‌اکسید مناسب برای مدل‌های ۳ و ۴، جدول ۴) ThO_2
تخلخل	۳ تا ۴ درصد (روش اندازه‌گیری: تخلخل سنجی با آب جوش و سراموگرافی همراه با میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM))	۳ تا ۴ درصد (روش اندازه‌گیری: تخلخل سنجی با آب جوش و سراموگرافی همراه با میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM))
ضریب هدایت حرارتی	ابزار اندازه‌گیری موجود نیست	ابزار اندازه‌گیری موجود نیست
متوسط اندازه‌دانه	زیر ۱ میکرون	زیر ۱ میکرون
سیتترینگ مجدد	میزان چگالش در سیتترینگ مجدد باید کم‌تر از ۲ درصد باشد	میزان چگالش در سیتترینگ مجدد باید کم‌تر از ۲ درصد باشد
تست‌های پرتودهی	ابزار اندازه‌گیری موجود نیست	ابزار اندازه‌گیری موجود نیست
درصد توریم دی‌اکسید در سوخت	۷۰	۱۰۰

فعالیت‌های ساخت شامل چندین روش سنتی و جدید موفق تولید سوخت است. برای تولید پودر توریم دی‌اکسید از روش‌های گوناگونی استفاده شده است. رسوب‌گیری، گرما-آبی (هیدروترمال) و سل-ژل از انواع این روش‌ها هستند. فرایند ساخت قرص به روش ساخت توریم دی‌اکسید بستگی دارد. روش متالورژی پودر فرایند معمول تولید سوخت‌های هسته‌ای سرامیکی است. از این روش به طور موفقیت‌آمیزی در مقیاس صنعتی برای تولید قرص‌های سیتتر شده‌ی



شکل ۳. خروجی کارگاه محصول.



است. امواج ریزموج نیز برای تولید نانوبلورهای توریا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی دیگر از روش‌هایی که برای ساخت نانوذرات توریم دی اکسید مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش گرما-آبی است. در این مرحله همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است فن آوری‌ها و زیرفن آوری‌های کلیدی در رابطه با تولید قرص‌های سوخت شناسایی و دسته‌بندی شدند.

در شکل ۴ خروجی کارگاه (۳) فن آوری‌ها و زیرفن آوری‌های کلیدی تولید قرص سوخت توریم نشان داده شده است.

از مجموع زیرفن آوری‌ها، فن آوری‌های راهبردی باید انتخاب شوند. فن آوری‌های راهبردی می‌تواند از چهار جنبه‌ی توانمندی، جذاب بودن، چرخه‌ی عمر فن آوری و پیش‌نیازهای فن آورانه ارزیابی شوند. در این پژوهش، از دو بعد توانمندی و جذاب بودن برای تعیین درجه‌ی اهمیت استفاده شد. با تحلیل پاسخ‌ها،

فن آوری‌ها اولویت‌بندی و روش اکتساب آن‌ها مشخص می‌شود (جدول ۷).

UO_2 ، $(U, Pu)O_2$ و $(Th, U)O_2$ استفاده شده است. در این روش، بر اثر جابه‌جایی پودر پرتوزا بین ایستگاه‌های مختلف عملیاتی، خطر آلودگی محیط بر اثر پخش گرد و غبار مواد پرتوزا وجود دارد. علاوه بر این، این ذرات بسیار ریز بوده و قابلیت شارش^(۵) آن‌ها برای انتقال بین مرحله‌های مختلف بسیار کم است و ساخت تأسیسات برای تولید سوخت سرامیکی به شیوه‌ی خودکار با روش متداول امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، استفاده از روش‌هایی که بتواند قابلیت خودکارسازی فرایند تولید را بالا برده و از انتشار گرد و غبار مواد پرتوزا جلوگیری کند، مورد توجه است. یکی از روش‌های تولید سوخت‌های سرامیکی عاری از گرد و غبار با قابلیت خودکارسازی بالا، روش سل-ژل است.

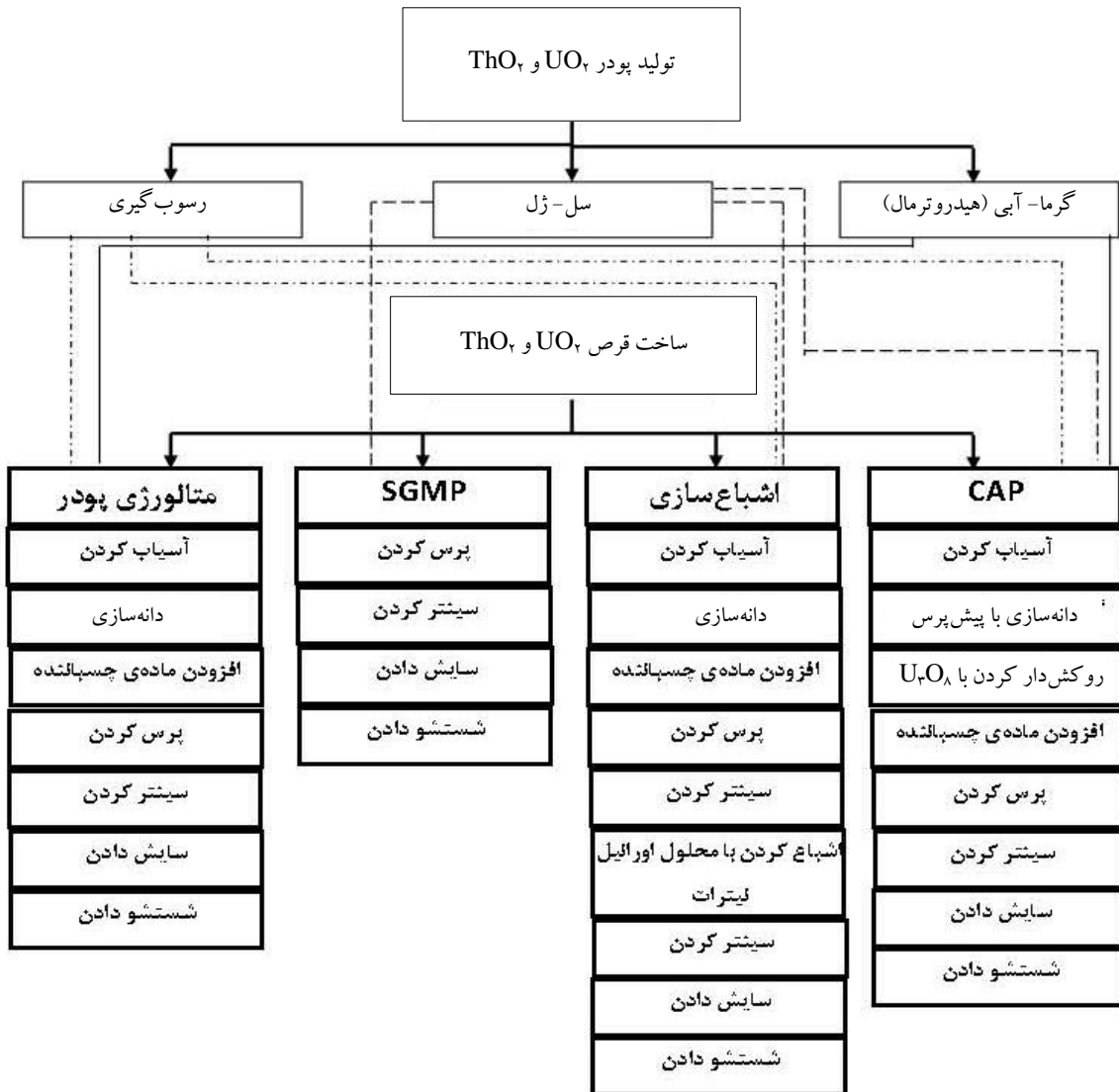
استفاده از این فن آوری می‌توان سوخت‌های سرامیکی به شکل ریزکره‌های^(۶) اکسیدی، کاربیدی و نیتریدی اورانیم، پلوتونیم و توریم و یا مخلوط این عناصر تولید کرد. ابعاد ذرات تولید شده با روش سل-ژل از نانو تا میکرو متغیر خواهند بود. دیگر روش تولید نانوذرات توریم دی اکسید، روش احتراق توریم نیترات

جدول ۶. تقسیم‌بندی فن آوری به حوزه‌ها و زیرفن آوری‌ها

حوزه (سطح ۱)	نام زیرفن آوری (سطح ۲)	
تولید پودر توریم دی اکسید (۱)	سل-ژل	
	رسوب‌گیری	
	گرما-آبی (هیدروترمال)	
ساخت قرص توریم (۲) (هر دو محصول)	متالورژی پودر	
	قرص‌سازی با ریزکره‌های سل-ژل (SGMP) ^(۷)	
	قرص‌سازی با کلوخه‌های پوشش داده شده (CAP) ^(۸)	
روش‌های تجزیه (۳) ابزار تجزیه‌ی پودر: پراش پرتو ایکس (XRD) / میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) / میکروسکوپ نوری (OM) / تخلخل‌سنجی (BET) / تجزیه‌ی گرمایی (TG)	اشباع‌سازی	
	فیزیکی	تعیین ابعاد پودر
		تعیین تخلخل پودر
		تعیین تخلخل قرص
		تعیین اندازه‌دانه در قرص
شیمیایی	تعیین استحکام مکانیکی و بررسی وجود ترک	
	تعیین خلوص پودر	
استحکام مکانیکی	تعیین نسبت توریم به اورانیم در قرص ترکیبی	
	تعیین استحکام قرص از طریق پرتودهی در رآکتور (در چشم‌انداز این پروژه دیده نشده است ولی در صورت فراهم شدن شرایط تحت عنوان پروژه‌های	



دیگر تعریف خواهد شد)	پرتو دهی در رآکتور
----------------------	--------------------



شکل ۴. خروجی کارگاه (۳) فن آوری‌ها و زیرفن آوری‌های کلیدی تولید قرص سوخت توریم.

جدول ۷. ارزیابی زیرفن آوری‌ها و تعیین زیرفن آوری‌های راهبردی و روش اکتساب آن‌ها

حوزه (سطح ۱)	کد زیرفن آوری	نام زیرفن آوری (سطح ۲)	درجه اهمیت		روش اکتساب	
			توانمندی	جذاب بودن	توسعه‌ی درون‌زا	خرید محصول
تولید پودر توریم اکسید	۱۱	سل-ژل	*	*	*	
	۱۲	رسوب‌گیری	*	*	*	
	۱۴	گرما-آبی	*	*	*	
ساخت قرص توریم	۲۱	متالورژی پودر	*	*	*	
	۲۲	SGMP	*	*	*	
	۲۳	CAP	*	*	*	
	۲۴	اشباع‌سازی	*	*	*	



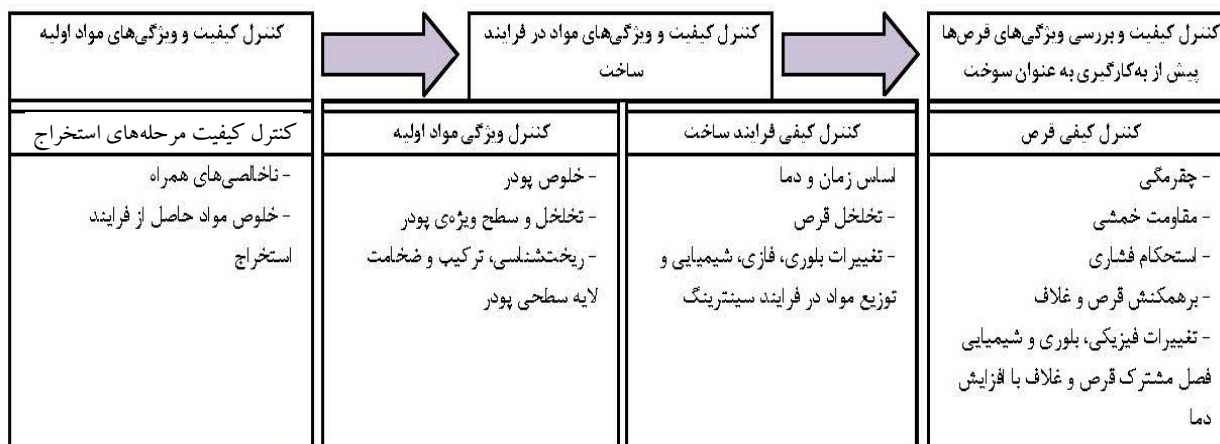
	*	*	*	فیزیکی	۳۱	روش‌های تجزیه
	*	*	*	شیمیایی	۳۲	

۱. بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر انتخاب شده در تهیه‌ی پودر توریم دی‌اکسید و ساخت قرص‌های اکسید مخلوط توریم و اورانیم بر اساس روش‌های طراحی آزمایش (P۱)؛
۲. هضم و تجزیه‌ی توریم در پودر و قرص ترکیبی اورانیم-توریم اکسید با خلوص هسته‌ای و اندازه‌گیری ناخالصی‌ها به وسیله‌ی روش‌های شیمیایی، طیف‌سنجی جرمی و نوری (P۲)؛
۳. تهیه و شناسایی پودر دوتایی اورانیم و توریم اکسید به روش سل-ژل و تعیین ریخت‌شناسی بهینه برای ساخت قرص (P۳)؛
۴. ساخت و مشخصه‌یابی قرص‌های مخلوط اورانیم و توریم اکسید به روش اشباع‌سازی (P۴)؛
۵. ساخت قرص مخلوط توریم و اورانیم دی‌اکسید با استفاده از پودر تهیه شده با روش رسوب‌گیری هم‌زمان (P۵)؛
۶. بررسی روش‌های تجزیه‌ی کیفی پودر و قرص توریم دی‌اکسید و مخلوط توریم و اورانیم اکسید با استفاده از ابزار سراموگرافی (P۶)؛

بالاخره برای اکتساب فن‌آوری‌های راهبردی که از طریق توسعه‌ی درون‌زا تعیین شده‌اند، باید پروژه‌های تحقیق و توسعه تعریف و اجرا شوند. در تعیین سرفصل‌های تحقیقاتی باید به ارتباط عمودی و افقی فن‌آوری‌های راهبردی در مرزهای تولید قرص سوخت توریم توجه داشت. به طور مثال همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است سرفصل‌های پژوهشی مرتبط با فن-آوری تحلیل کمی و کیفی پودر و قرص توریم نشان داده شده است.

کارگاه ترسیم نمودار (۴)

در کارگاه چهارم با هدایت قالب ره‌نگاشت، رابطه‌ها و اتصال-های کلیدی نگاشته می‌شود و از خروجی‌های سه کارگاه اول، لایه‌های بازار، محصول و فن‌آوری و سرفصل‌های تحقیقاتی تعیین می‌شوند. این ره‌نگاشت با در نظر گرفتن سوخت توریم برای رآکتور تحقیقاتی انتخاب شده ارایه و در لایه‌ی آخر طرح‌های پژوهشی که باید برای اجرای این کار انجام شوند طبق نظر خبرگان به شرح زیر پیشنهاد شده است.



بررسی پیشرفت فرایند سینترینگ	روش‌های تعیین میزان تخلخل و سطح ویژه	روش‌های تعیین خلوص پودر	روش‌های تعیین دائم‌بندی
- روش‌های تصویری: آنالیز تصویری با استفاده از عکس‌های ریزساختاری میکروسکوپ الکترون پویشی - روش‌های مکانیکی: سنجش خواص مکانیکی (استحکام فشاری) نسبت به ماده‌ی غیرپودری - روش‌های سنجش سطح ویژه	- روش‌های تصویری: پراش نوترون زاویه‌ی کوچک و پراش پرتو ایکس زاویه‌ی کوچک - تخلخل‌سنجی جیوه‌ای - روش‌های مبتنی بر تئوری لانگمویر - روش تخلخل‌سنجی (BET)	- طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در میکروسکوپ‌های الکترونی - طیف‌سنجی فلونورسانی پرتو ایکس (XRF) - طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) - طیف‌سنجی پلاسما جفت‌شده - لقای (ICP)	- پراش پرتو ایکس (XRD) - تجزیه و تحلیل تصویری (SEM, TEM, AFM, OM) - پراکندگی ایستای نور لیزر

شکل ۵. زیرفن‌آوری‌های شناسایی‌شده‌ی فن‌آوری تحلیل کمی و کیفی پودر و قرص توریم.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نقش انرژی هسته‌ای در آینده‌ی کشورهای جهان، رهنگاشت فن‌آوری به عنوان ابزاری برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی پژوهش و توسعه‌ی سیستم‌های پیشرفته‌ی انرژی هسته‌ای استفاده می‌شود. با وجود استفاده‌ی گسترده از این راهکار در جهان، تجارب اندکی در ایران و به‌خصوص در حوزه‌ی فن‌آوری‌های انرژی هسته‌ای در کشور وجود دارد. بنابراین، می‌توان گفت پژوهش حاضر هم از نظر روش پژوهش و هم فن‌آوری انتخابی دارای نوآوری است. توسعه‌ی رهنگاشت فن‌آوری تولید سوخت توریم سه فایده‌ی مهم دارد:

- به شناسایی نیازها، اهداف و فن‌آوری‌های لازم برای دستیابی به دانش و توانمندی در این حوزه کمک می‌کند.
- برای توسعه‌ی همکاری‌های فن‌آورانه، ساختار و راهنمایی فراهم می‌کند.

- سازوکاری برای پیش‌بینی فن‌آوری‌های جدید فراهم می‌نماید.

در این مقاله رهنگاشت تولید سوخت توریم مطابق با فرایند عمومی رهنگاری مطابق با اطلاعات استخراج شده در جلسات گروه خبرگان، مصاحبه و متون مرتبط استفاده شده در این پژوهش است ترسیم شد (شکل ۶). برای این کار ابتدا بازار و بخش‌های آن بررسی و اولویت‌بازارها تعیین شد. در این مرحله دو بخش رآکتورهای آب سنگین و آب سبک تحقیقاتی و قدرت برای سوخت توریم مطابق با تحلیل انجام شده در قسمت-های قبل، شناسایی شد. از آن‌جا که اولویت‌دهی بازارها منوط به مشخص بودن میزان اهمیت هر یک از سیاست‌های جای‌گزینی انرژی هسته‌ای در صنعت انرژی کشور است و با توجه به این که این سیاست‌ها به طور شفاف مشخص نیستند در این‌جا طبق نظر خبرگان حاضر در کارگاه، اولویت رآکتور تحقیقاتی آب سنگین با سوخت توریم نسبت به رآکتورهای قدرت آب سبک و آب سنگین با سوخت بیشتر است. در لایه‌ی محصول، طبق



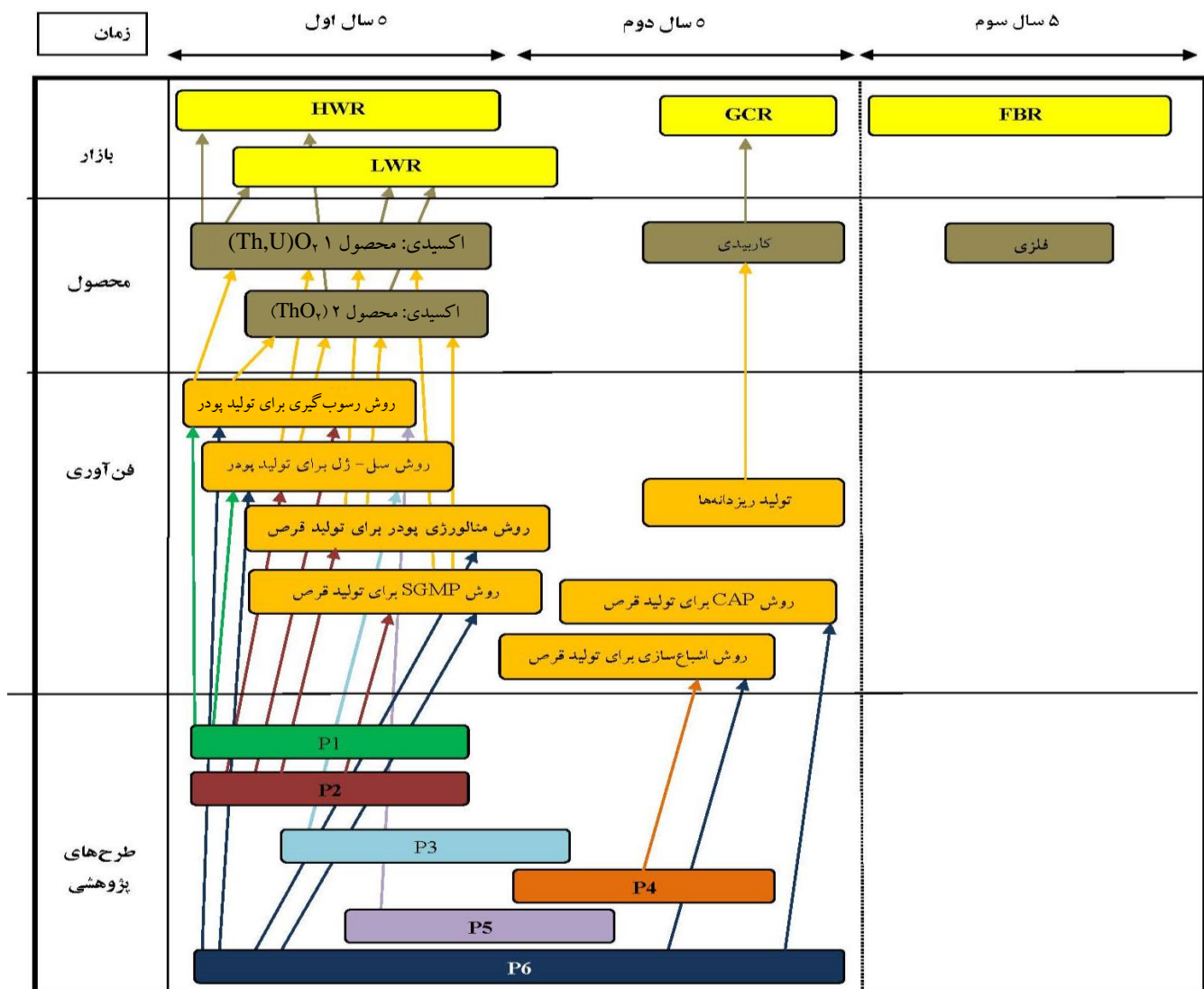
۲. فاز بهبود عملکرد زیرسیستم‌های کلیدی؛
۳. فاز تولید؛
۴. فاز تجاری‌سازی و کاربرد صنعتی.

فاز اول تحقیق و توسعه بر درک و فهم اصول اولیه‌ی فن-آوری تمرکز دارد. برنامه‌ها باید برای نمایش عملی موضوعات کلیدی تمرکز داشته باشد. برای مثال حوزه‌ی سوخت و مواد و ارزیابی خواص فیزیکی و شیمیایی و رفتار سوخت تحت تابش نوترون همراه با ارزیابی روش‌ها و فرایندها اولویت مهمی در برنامه‌ی توسعه‌ی فن‌آوری ساخت سوخت توریم است. نتایج حاصل در این پژوهش که فاز اول پیش‌گفته را شامل می‌شد سرفصل‌های پژوهشی برای اکتساب فن‌آوری‌های کلیدی تولید قرص سوخت توریم را تعیین کرد و پروژه‌های پیشنهادی برای فعالیت‌های آتی را شکل داد. در پژوهش‌های آتی پس از ارزیابی نتایج به مسئولین و اتخاذ سیاست‌های آن‌ها، نقشه‌ی راه ارائه شده مورد بازبینی قرار خواهد گرفت.

شناسایی انجام شده روی محصول سوخت‌های هسته‌ای توریم، سه دسته محصول- سوخت‌های فلزی، اکسیدی و کاربیدی- شناسایی شدند. طبق مذاکرات به عمل آمده در جلسات گروه خبرگان سوخت‌های توریم اکسید (مدل ۳ و ۴) و قرص‌های ترکیبی توریم- اورانیم اکسید با غنای ۴/۸٪ (مدل ۲) اولویت محصولات در لایه‌ی محصول در نظر گرفته شد. اما بر اساس میزان اهمیت فن‌آوری که از شاخص توانمندی و جذاب بودن به دست آمد در خصوص فن‌آوری‌های تولید پودر روش‌های رسوب‌گیری و سل- ژل به عنوان دو روش انتخابی در نظر گرفته شدند. در فن‌آوری تولید قرص دو روش SGMP و متالورژی پودر انتخاب شدند. در نهایت عناوین و سرفصل‌های پژوهشی برای دستیابی به دانش فنی تولید قرص سوخت توریم از طریق اکتساب درون‌زا پیشنهاد شد.

برنامه‌ریزی برای تحقیق و توسعه‌ی فن‌آوری تولید سوخت توریم در چهار فاز تقسیم‌بندی شد:

۱. فاز امکان‌سنجی فن‌آوری‌های کلیدی پیش از سرمایه-گذاری و توسعه‌ی فن‌آوری در مقیاس بزرگ؛



شکل ۶. ره‌نگاشت فن‌آوری تحقیق و توسعه‌ی تولید سوخت توریم.

پی‌نوشت‌ها

1. T-Plan
2. International project on innovative nuclear reactors and fuel cycles
3. Global architecture of innovative nuclear systems
4. Accelerator-driven subcritical reactors (ADSR)
5. Flow ability
6. Microsphere
7. Sol-gel Microsphere Pelletisation
8. Coated Agglomerate Pelletization

تقدیر و تشکر

با سپاس از تمامی مدیران و کارشناسان پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای که با شرکت در جلسات کارگاه ره‌نگاری نویسندگان را در انجام این پژوهش یاری نمودند.



- [1] IEA, & OECD, Energy Technology Roadmaps (2014).
- [2] C. Kerr, R. Phaal, D. Probert, Cogitate, articulate, communicate: The psychosocial reality of technology roadmapping and roadmaps. *R and D Management* (2012).
- [3] N. Gerdri, R. Vatananan, S. Dansamasatid, Dealing with the dynamics of technology roadmapping implementation: A case study. *Technological Forecasting and Social Change*, (2009). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162508000528>.
- [4] M. Amer, T.U. Daim, Application of technology roadmaps for renewable energy sector, *Technological Forecasting and Social Change*, (2010) <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.05.002>.
- [5] R. Phaal, G. Muller, An architectural framework for roadmapping: Towards visual strategy, *Technological Forecasting and Social Change*, 76(1) (2009) 39–49. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.03.018>.
- [6] R. Phaal, C.J. Farrukh, D.R. Probert, Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution, *Technological Forecasting and Social Change* (2004). [http://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](http://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6).
- [7] B. Yoon, R. Phaal, D. Probert, Morphology analysis for technology roadmapping: application of text mining, *R&d Management* (2008). Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9310.2007.00493.x/pdf>.
- [8] R. Phaal, E. O’Sullivan, M. Routley, S. Ford, D. Probert, A framework for mapping industrial emergence, *Technological Forecasting and Social Change*, 78(2) (2011) 217–230. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.018>.
- [9] N. Shibata, Y. Kajikawa, I. Sakata, Extracting the commercialization gap between science and technology- Case study of a solar cell, *Technological Forecasting and Social Change* (2010). <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.03.008>.
- [10] I. Petrick, A. Echols, Technology roadmapping in review: A tool for making sustainable new product development decisions, *Technological Forecasting and Social Change* (2004). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162503000647>.
- [11] R. Phaal, E. O’Sullivan, M. Routley, S. Ford, D. Probert, A framework for mapping industrial emergence, *Technological Forecasting and Social Change*, 78(2) (2011) 217–230. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.018>.
- [12] IEA/NEA, Technology Roadmap: Nuclear Energy, OECD/IEA/NEA, Paris, (2010) 6.
- [13] NEA, & OECD, Technology Roadmap: Nuclear Energy (2015).
- [14] Forum, U. S. D. N. E. R. A. C. and the G. I. I, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems (2002), Retrieved from <http://www.osti.gov/servlets/purl/859029-304XRr/>.
- [15] OECD, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, Preparing Today for Tomorrow’s Energy Needs (2014).
- [16] H. Graham, The lost chance. *Newsweek*, December 2006–. February (2007) 63.
- [17] IAEA, IAEA Nuclear Energy Series Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, (2012a) 157, Retrieved from www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1540_web.pdf.
- [18] K. Furukawa, K. Arakawa, Erbay, L. B. Ito, Y. Kato, Y. Kiyavitskaya, ... R. Yoshioka, A road map for the realization of global-scale thorium breeding fuel cycle by single molten-fluoride flow. *Energy Conversion and Management* (2008). <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.027>.
- [19] IAEA, Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges (2005).
- [20] IAEA, IAEA Nuclear Energy Series Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, (2012b) 157.



- [21] B. De Laat, S. McKibbin, The Effectiveness of Technology Road Mapping: Building a Strategic Vision. Ministry of Economic Affairs (2003).
- [22] M.L. Garcia, O.H. Bray, Fundamentals of Technology Roadmapping (1997).
- [23] R. Phaal, D.R. Probert, A framework for supporting the management of technological knowledge, International Journal of Technology Management, 27(1) (2004) 1–15. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1342330071&partnerID=40&md5=d8e8a1be6617d612ef8e7956cdbf6cc2>.
- [24] C. Holmes, M. Ferrill, The application of Operation and Technology Roadmapping to aid Singaporean SMEs identify and select emerging technologies. Technological Forecasting and Social Change (2005). <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2004.08.010>.
- [25] IAEA, CLIMATE CHANGE AND NUCLEAR POWER (2013).
- [26] IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power : Developments and Projections (2007).
- [27] Gov, International Status and Prospects for Nuclear Power (2012) 566.
- [28] N. Mohseni, Fabrication of ThO₂ and (Th,U)O₂ fuel pellets using nano and micro particles of Thorium Dioxide, PhD Thesis, Nuclear Science & Technology Research Insitute (2016).