Journal of Marine Medicine
Winter 2024, Volume 5, Issue 4
Pages: 231-242
10.30491/5.4.231

Assessment of the Risk of Radioactive Contamination Release from Accidents in Nuclear Ships and Submarines at Sea

Mahmoodreza Abbasi [1 *]

[1] *Assistant Professor, Faculty of Basic Sciences, Imam Hossein University of Officer Training and Guard Training, Tehran, Iran*

Received: 3 January 2024 **Accepted:** 17 February 2024

Abstract

The operation of marine nuclear reactors mirrors that of all nuclear reactors. However, unlike other reactors, much of the information regarding marine reactors is classified, making it challenging to assess their safety levels. While the likelihood of an accident resulting in the release of radioactivity from the core of a nuclear reactor on a ship or submarine into the environment is minimal, the potential for such incidents cannot be disregarded. Numerous studies have explored the risks associated with accidents in nuclear reactors. This article provides a descriptive examination of various aspects of accidents in nuclear ships and submarines, delving into the extent of risks posed by these incidents.

The article highlights the rigorous safety measures incorporated into the design and construction of nuclear vessels and submarines to prevent the release of radioactive materials in case of accidents. Each nuclear system, including the fuel casing, cooling system, and safety chamber, presents potential risks of radioactive material leakage into the environment. By categorizing nuclear accidents based on these subsystems, safety protocols aimed at preventing contamination spread and ensuring nuclear safety are reviewed.

Furthermore, the emission characteristics of radioactive materials released into the marine environment during a nuclear accident are explored in terms of half-life, emission range, and decay types. The study also investigates the crucial role of seawater in attenuating and modifying the radiation properties of radioactive materials. It is demonstrated that fast neutrons and gamma rays are rapidly attenuated by surrounding seawater, typically traveling less than 1 meter. Additionally, most radioactive materials resulting from a nuclear accident emit alpha (α) and beta (β) radiation, both of which have limited ranges of less than 10 cm in water, with seawater serving as an effective shield against this type of radiation pollution.

Keywords: Marine nuclear reactors, Radioactive, Pollution, Accident.

[*]**Corresponding author:** Mahmoodreza Abbasi, **Email**: phys.ocean.abbasi@gmail.com
Address: Faculty of Basic Sciences, Imam Hossein University of Officer Training and Guard Training, Tehran, Iran.

مجله طب دریا
دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲
صفحات: ۲۴۲-۲۳۱
10.30491/5.4.231

ارزیابی ریسک انتشار آلودگی رادیواکتیو در اثر حادثه در کشتی‌ها و زیردریایی‌های هسته‌ای در دریا- مطالعه مروری روایتی

محمودرضا عباسی [1*]

[1] استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین(ع)، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳ **پذیرش مقاله:** ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

عملکرد راکتورهای هسته‌ای دریایی مانند همه راکتورهای هسته‌ای است. اما بر خلاف سایر راکتورها ، بیشتر اطلاعات، در مورد راکتورهای دریایی طبقه‌بندی می‌شوند و به سختی می‌توان گفت چقدر ایمن هستند و از چه روشی ایمن را رعایت می‌کنند. گرچه احتمال حادثه‌ای که منجر به انتشار رادیواکتیویته از خود هسته راکتور هسته‌ای از کشتی یا زیردریایی به محیط می‌شود بسیار کم است اما وقوع حادثه قابل انکار نیست. مطالعات زیادی در مورد خطرات وقوع حادثه در راکتورهای هسته‌ای انجام شده‌است اما در این مقاله از دید توصیفی به بررسی جنبه‌های مختلف این حادثه در یک شناور یا زیردریایی هسته‌ای پرداخته شده‌است و میزان خطرات ناشی از این حوادث مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نشان داده شده‌است که شناورها و زیردریایی‌های هسته‌ای از سطح ایمنی بالایی جهت جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو در اثر وقوع حادثه برخوردار بوده و این جنبه‌ها در مرحله طراحی و ساخت مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجا که در هر سامانه هسته‌ای، زیر سامانه‌های پوشش سوخت (غلاف)، سامانه خنک‌کننده و محفظه ایمنی باعث نشت مواد رادیو اکتیو به محیط زیست می‌گردند. پس از تقسیم‌بندی حوادث هسته‌ای بر اساس هر کدام از این زیر سامانه‌ها، به بررسی ملاحظات ایمنی منظور شده جهت جلوگیری از انتشار آلودگی و حفظ ایمنی هسته‌ای پرداخته شده است. سپس به بررسی ویژگی‌های انتشاری مواد رادیواکتیو منتشر شده در محیط دریایی در صورت بروز حادثه هسته‌ای از نظر نیمه عمر، برد انتشاری و انواع واپاشی‌های آنها در طول نیمه عمرشان پرداخته شده‌است. در نهایت نقش بسیار مهم آب دریا در تضعیف و ترقیق مواد خواص تابشی مواد رادیواکتیو بررسی شده‌است و نشان دادیم که نوترون‌ها سریع و پرتوهای گامای در زیر آب، به سرعت توسط آب دریای اطراف ضعیف می‌شوند و معمولاً کمتر از ۱ متر حرکت می‌کنند. همچنین اغلب مواد رادیواکتیو حاصل از یک حادثه هسته‌ای دارای تابش‌های رادیواکتیو از جنس آلفا (α) و بتا (β) هستند که این دو نوع تابش در آب دارای برد بسیار محدود زیر ۱۰ سانتی‌متر هستند و آب دریا حفاظ خوبی در برابر انتشار پرتویی این نوع آلودگی‌ها است.

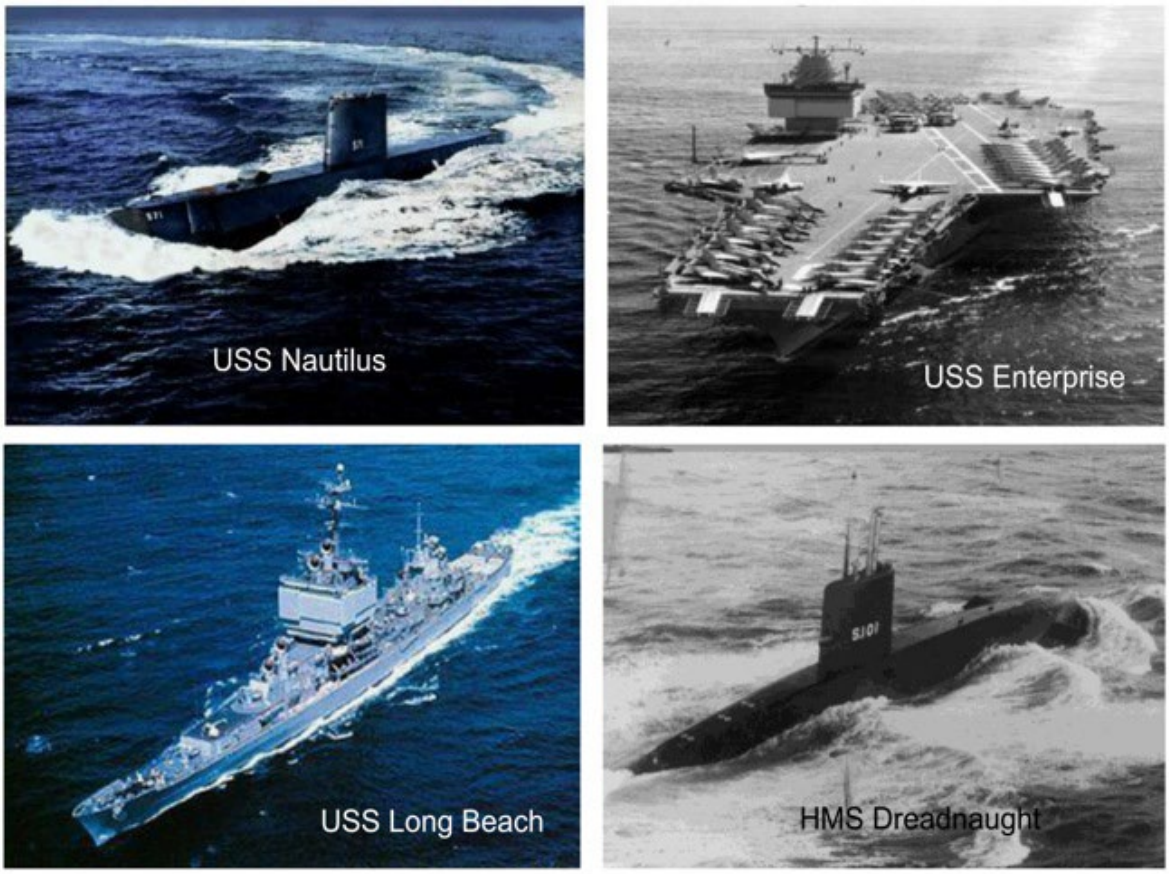
کلیدواژه‌ها: راکتورهای هسته‌ای دریایی، رادیواکتیو، آلودگی، حادثه.

*نویسنده مسئول: **محمود رضا عباسی**. پست الکترونیک: phys.ocean.abbasi@gmail.com
آدرس: دانشکده علوم پایه، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین(ع)، تهران، ایران.

مقدمه

کشف شکافت در سال ۱۹۳۸، طرفداران نیروی محرکه هسته‌ای را برانگیخت که از راکتورهای هسته‌ای برای تامین انرژی در وسایل مختلف حمل و نقل استفاده کنند. اولین پیاده‌سازی فناوری هسته‌ای دریایی در نیروی دریایی آمریکا صورت گرفته که برای اولین بار از فناوری راکتور آب تحت فشار هسته‌ای (PWR (Pressurized Water Reactor)) استفاده کرد.

هدف آن‌ها افزایش سرعت زیردریایی‌هایشان به ۲۰ تا ۲۵ گره بدون سوخت‌گیری و باقی ماندن برای مدت طولانی‌تر در زیر آب بود. اولین نمونه اولیه راکتور هسته‌ای PWR برای کاربردهای دریایی در آمریکا در سال ۱۹۵۳ آغاز شد و اولین زیردریایی هسته‌ای، USS Nautilus، با استفاده از فناوری PWR در سال ۱۹۵۵ عملیاتی شد USS Enterprise با ۸ واحد PWR در سال ۱۹۶۰ شروع به کار کرد و رزمناو USS Long Beach با دو فروند از این واحدهای اولیه در سال ۱۹۶۱ شروع به کار کرد. HMS Dreadnaught، اولین زیردریایی هسته‌ای نیروی دریایی سلطنتی، آزمایش‌های دریایی را در سال ۱۹۶۲ تکمیل کرد که طی آن نیروی دریایی آمریکا ۲۶ زیردریایی هسته‌ای عملیاتی و ۳۰ زیردریایی در دست ساخت داشت (شکل-۱).



شکل-۱. زیردریایی و کشتی‌های هسته‌ای اولیه

از دهه ۱۹۷۰، نسخه‌های فن‌آوری پیشرفته PWR مبتنی بر بخار که عملیات سوخت‌گیری بهتر را تضمین می‌کند (مانند رولز رویس -۲PWR انگلستان) و ویژگی‌های ایمنی غیرفعال (مانند نسخه‌های -۳USA Westinghouse PWR) توسعه یافته‌اند. آن‌ها همچنان بر کاربردهای فعلی و آینده در ناوگان دریایی سطحی یا زیردریایی تسلط دارند. روسیه به طور مستقل، اما به موازات آمریکا، فناوری PWR و راکتور سریع خنک‌شده با سرب (LFR) را نیز توسعه داد. از سال ۱۹۵۰ (سری کلاس Severodvinsk اتحاد جماهیر شوروی) تا سال ۲۰۰۳ اتحاد جماهیر شوروی/روسیه ۲۴۸ زیردریایی هسته‌ای، ۵ کشتی سطحی نیروی دریایی و ۹ یخ شکن نیروی دریایی با ۴۶۸ راکتور ساخت. در سال‌های اخیر، زیردریایی‌های روسی کلاس تایفون ۲۶۵۰۰ تنی، که از دو راکتور ۱۹۰ مگاواتی PWR نیرو می‌گیرند، توسط کلاس ۲۴۰۰۰ تنی Oscar-II با همان نیروگاه جایگزین شدند.

از دهه ۱۹۷۰، نسخه‌های فن‌آوری پیشرفته PWR مبتنی بر بخار که عملیات سوخت‌گیری بهتر و ویژگی‌های ایمنی غیرفعال داشتند، توسعه یافته‌اند. روسیه به طور مستقل، اما به موازات آمریکا، فناوری PWR و راکتور سریع خنک‌شده با سرب (LFR) را نیز توسعه داد. از سال ۱۹۵۰ (سری کلاس Severodvinsk اتحاد جماهیر شوروی) تا سال ۲۰۰۳ اتحاد جماهیر شوروی/روسیه ۲۴۸

زیردریایی هسته‌ای، ۵ کشتی سطحی نیروی دریایی و ۹ یخ شکن نیروی دریایی با ۴۶۸ راکتور ساخت. در سال‌های اخیر، زیردریایی‌های روسی کلاس تایفون ۲۶۵۰۰ تنی، که از دو راکتور ۱۹۰ مگاواتی PWR نیرو می‌گیرند، توسط کلاس ۲۴۰۰۰ تنی Oscar-II با همان نیروگاه جایگزین شدند (۱).

همزمان با کاربردهای نظامی دریایی، توسعه کشتی‌های تجاری هسته‌ای در دهه ۱۹۵۰ آغاز شد. کاربردهای انرژی هسته‌ای دریایی تجاری از نمایش مفهومی اثربخشی فناوری PWR دریایی بهره مند شدند. کشتی یخ شکن اتحاد جماهیر شوروی لنین اولین کشتی سطحی با انرژی هسته‌ای در جهان بود که در سال ۱۹۵۹ راه‌اندازی شد و به مدت ۳۰ سال مشغول به خدمت بود. در ابتدا دارای سه راکتور ۹۰ مگاواتی بود که پس از یک حادثه در سال ۱۹۷۰، با دو راکتور با قدرت ۱۷۱ مگاوات جایگزین شد که برای توربین‌ها بخار تولید می‌کردند و برق تولید می‌کردند تا ۳۴ مگاوات را در پروانه‌ها تحویل دهند. از سال ۱۹۵۰ تا سال های اخیر، سه کشتی هسته‌ای تجاری توسط آمریکا ، آلمان و ژاپن راه‌اندازی شده‌است. NS Savannah با ظرفیت ۲۲۰۰۰ تن آمریکا ساخته شد که در سال ۱۹۶۲ راه‌اندازی شد، توسط یک راکتور ۷۴ مگاواتی به حرکت در آمد و در سال ۱۹۷۰ وارد خدمت شد. این یک موفقیت فنی بود اما از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبود. کشتی باری و تحقیقاتی ۱۵۰۰۰ تنی NS Otto Hahn حدود ۶۵۰۰۰۰ مایل دریایی را در ۱۲۶ سفر طی ۱۰ سال بدون هیچ مشکل فنی طی کرد. این یک راکتور ۳۶ مگاواتی داشت که ۸ مگاوات را به پروانه می‌رساند. با این حال، کارکرد آن بسیار گران بود و در سال ۱۹۸۲ پیشرانه آن به دیزل تبدیل شد. کشتی ۸۰۰۰ تنی ژاپنی NS Mutsu، همچنین توسط یک راکتور ۳۶ مگاواتی هدایت می‌شود، سومین کشتی غیرنظامی بود که در سال ۱۹۷۰ به خدمت گرفته شد. از زمان راه‌اندازی اولین زیردریایی هسته‌ای در سال ۱۹۵۵، حدود ۷۰۰ راکتور دریایی در کشتی‌های مختلف در سراسر جهان در دریا کار کرده‌اند و حدود ۲۰۰ راکتور دریایی هنوز در حال کار هستند(۲).

با این حال، خطرات ناشی حوادث شدید مانند طوفان، سونامی، سیل، و تصادم، نگرانی‌های ایمنی اجتناب‌ناپذیری را برای رآکتورهای دریایی ایجاد کرده‌است. متفاوت از نیروگاه هسته‌ای زمینی، راکتور دریایی همیشه اثرات حرکت کشتی یا تغییرات بار را به دلیل شرایط دریا تجربه می‌کنند که منجر به احتمال تصادف بیشتر می‌شود. در طول تاریخ، حوادث و شرایط اضطرار زیادی رخ داده‌است. برای بسیاری، راکتورهای هسته‌ای، به طور اجتناب‌ناپذیری با حوادثی مانند فوکوشیما، جزیره تری‌مایل و چرنوبیل مرتبط خواهند بود. با این ملاحظات، کشتی‌های هسته‌ای در حین طراحی، ساخت، بهره‌برداری و از رده خارج شدن مورد توجه ویژه قرار خواهند گرفت. هر حادثه هسته‌ای، در خشکی یا دریا، می‌تواند بر کشتیرانی نظامی و علی‌الخصوص تجاری هسته‌ای تأثیر بگذارد.

بطور کلی اثرات شناورها و زیردریایی‌های هسته‌ای بر محیط زیست به دو دسته مجزا تقسیم می‌شود: آنهایی که از عملیات عادی یک زیردریایی ناشی می‌شوند و آنهایی که از یک حادثه راکتور ناشی می‌شوند. برای ارزیابی میزان خطرات ناشی از حوادث راکتورهای دریایی، ابتدا باید اصول کار و عملکرد و نیز ساختار یک راکتور را مطالعه پرداخت و در مرحله بعد به بررسی انواع مختلف حوادث در آنها و انواع انتشار آلودگی‌های منتشره در هر سناریو را مورد بررسی قرار دهیم.

ساختار و عملکرد راکتور هسته‌ای

راکتور هسته‌ای وسیله‌ای است که برای شروع و کنترل یک واکنش زنجیره‌ای هسته‌ای پایدار استفاده می‌شود.

انواع راکتورهای هسته‌ای

انواع راکتورهای هسته‌ای را می‌توان بر اساس:

- نوع واکنش هسته‌ای (به عنوان مثال شکافت یا همجوشی)
- مواد تعدیل‌کننده (مانند گرافیت، آب یا هیچ کدام)؛
- نوع خنک‌کننده (مانند آب، فلز مایع، گاز، نمک مذاب)؛
- نوع کاربرد (به عنوان مثال برق، نیروی محرکه دریایی، منبع تشعشعات نوترونی، تحقیقات)
- و فناوری (انواع نسل راکتورها)

طبقه‌بندی کرد. البته به آن‌ها می‌توان طبقه‌بندی بر اساس نوع سوخت را اضافه کرد که می‌تواند اورانیوم یا ماده فعال دیگری مانند توریم باشد.

فن‌آوری انرژی هسته‌ای دریایی کاربردی اساساً از طریق دو نوع سامانه تکامل یافته است:

- نسل اول: نمونه‌های اولیه و اولین راکتورهای در نوع خود که در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ عمدتاً توسط آمریکا آمریکا، اتحاد جماهیر شوروی و انگلیس ساخته شدند.
- نسل دوم: ساخته شده از سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰، که اکثر آنها هنوز در حال کار هستند.

طرح‌های مدرن‌تر را می‌توان به این صورت طبقه‌بندی کرد:

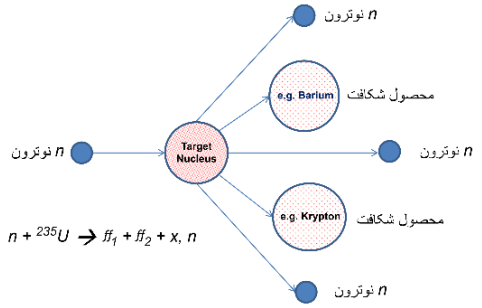
- راکتورهای آب سبک پیشرفته نسل سوم از نوع PWR یا BWR (Advanced Boiling Water Reactor) با سامانه‌های ایمنی فعال (مانند شرکت جنرال الکتریک ABWR، شرکت وستینگ‌هاوس الکتریک) یا راکتورهای آب سنگین.
- راکتورهای نسل III+ که بهبودهای تدریجی را به طرح‌های اثبات شده با سطوح ایمنی و امنیت افزایش یافته اضافه می‌کنند (مانند Areva/EDF EPR، Westinghouse Electric Co.).

- راکتورهای نسل چهارم که نشانگر انحراف رادیکال‌تر از طرح‌هایی است که امروزه بر صنعت هسته‌ای تسلط دارند. از آنجایی که ممکن است ویژگی‌هایی داشته باشند که هنوز آزمایش نشده‌اند، بیشتر جنبه تئوری دارند. می‌توان تا سال ۲۰۲۰ و قبل از سال ۲۰۳۰ به‌کارگیری آن‌ها (به‌عنوان مثال Energy SMR۴Gen) انتظار داشت که مفهوم آن‌ها مبتنی بر زمین باشد. اخیراً، GENIV (۲۰۱۱) شش سامانه انرژی هسته‌ای پیشرفته را شناسایی کرده‌است که به این گروه راکتور تعلق دارند و پتانسیل برآوردن الزامات پایداری را دارند. از این سه سامانه راکتور سریع می‌توان به راکتورهای سریع خنک‌شونده با سدیم (SFR)، راکتورهای سریع خنک‌شونده با سرب (LFR) و راکتورهای سریع خنک‌شونده با گاز (GFR) اشاره کرد. همه این فناوری‌ها می‌توانند بر روی طیف وسیعی از انواع سوخت از جمله سوخت‌های اکسیدی، نیتریدی و پراکندگی کار کنند. سوخت فلزی (نوع LFR) و سوخت اکسی‌کاربید (نوع GFR). در حال حاضر، تجربه عملیاتی فقط برای سوخت‌های اکسید و فلز وجود دارد (۳).

راکتورهای هسته‌ای دریایی

فرآیند تولید الکتریسیته در نیروگاه‌های هسته‌ای مشابه نیروگاه‌هایی است که از سوخت‌های فسیلی جهت تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. در یک نیروگاه هسته‌ای آب بر اثر انرژی تولید شده ناشی از واکنش‌های شکافت هسته‌ای تحت فشار و دمای بالا بخار می‌شود. بخار تولیدی جهت چرخاندن توربین و ژنراتور مورد استفاده قرار گرفته و چرخش ژنراتور تولید جریان الکتریسیته می‌نماید. فرآیند تولید حرارت در نیروگاه‌های هسته‌ای بر اساس شکافت هسته‌های ناپایدار نظیر ^{235}Uاست. وقتی که هسته یک اتم ناپایدار به عنوان نمونه، ^{235}Uیک نوترون جذب می‌نماید شکافته شده و تولید هسته‌های دختر، تعدادی نوترون و انرژی می‌کند. نوترون‌های تولید شده خود باعث ایجاد شکافت بعدی در هسته‌های اورانیم خواهد شد و این فرآیند به صورت زنجیروار ادامه می‌یابد. در یک نیروگاه هسته‌ای زنجیره‌های شکافت هسته‌های اورانیم جهت تولید انرژی تحت کنترل قرار می‌گیرد. راکتورهای هسته‌ای در طرح‌های مختلفی در دنیا ساخته شده‌اند. راکتورهای آب تحت فشار از جمله این موارد است. در این راکتورها از آب به عنوان خنک‌کننده قلب راکتور و کندکننده نوترون استفاده می‌شود. به دلیل پایین بودن نقطه جوش آب در فشار متعارف، برای استفاده از آب در دماهای بالا فشار سیستم را افزایش می‌دهند. قلب راکتور قسمتی از راکتور است که در آن واکنش‌های زنجیره‌ای شکافت صورت می‌پذیرد. قلب راکتور از مجتمع‌های سوخت، میله‌های کنترل، منبع ایجاد نوترون‌های اولیه برای شروع واکنش شکافت و برخی از اجزای دیگر تشکیل شده‌است. واکنش شکافت هسته‌ای از طریق میله‌های کنترل هدایت می‌شود. با بالا بردن و پایین آوردن میله‌های کنترل راکتور را روشن، خاموش و یا قدرت آن را تغییر می‌دهند.

راکتورهای هسته‌ای دریایی معمولی بر اساس شکافت هسته‌ای کار می‌کنند و حاوی اتم‌های اورانیوم (U) هستند که در روکش فلزی مهر و موم شده‌اند. U یکی از معدود موادی است که قادر به تولید گرما در یک واکنش زنجیره‌ای خودپایدار است. شکافت هسته‌ای زمانی ایجاد می‌شود که یک نوترون در یک اتم بزرگ مانند ^{235}U، ^{239}Pu یا ^{233}U جذب شود. جذب این نوترون می‌تواند ارتعاشاتی را در هسته ایجاد کند که باعث می‌شود آن را تا جایی که تحت دافعه الکترواستاتیکی متقابل قطعات از هم جدا می‌شود، متسع شود. اگر این اتفاق بیفتد اتم به قطعات (معروف به محصولات شکافت – مانند سزیم، استرانسیوم) تقسیم می‌شود. در همان زمان انرژی همراه با دو یا سه نوترون آزاد می‌شود (شکل–۲). در حالی که نوترون‌ها اتم‌های U جدید را می‌شکافند و باعث رشد سریع (نمایی) تعداد شکافت‌ها می‌شوند، انرژی آزاد شده ممکن است برای استفاده در راکتور هسته‌ای کنترل شود. بیشتر گرمای تولید شده در فرآیند شکافت از رادیواکتیویته ایجاد شده در طول شکافت می‌آید. این به این دلیل است که برخی از محصولات شکافت در هنگام تشکیل بسیار رادیواکتیو هستند. از این رو، هم ایمنی و هم امنیت برای طراحی و عملیات مهم هستند. راکتورهای هسته‌ای دریایی نسل دوم عمدتاً از مواد تعدیل‌کننده نوترون حرارتی استفاده می‌کنند و بنابراین راکتورهای حرارتی هستند (۴).



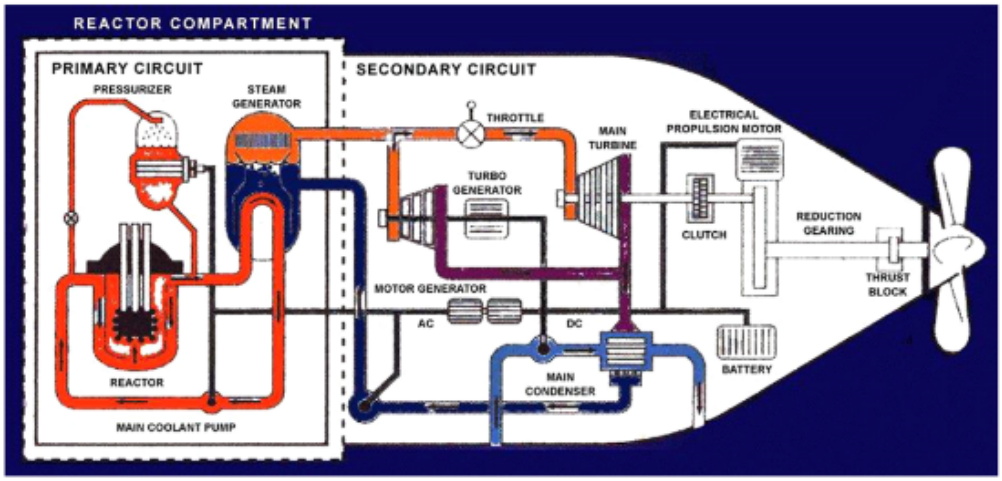
شکل–۲. واکنش شکافت هسته‌ای

نوترون‌های حرارتی در مقایسه با نوترون‌هایی که در اصل از شکافت حاصل می‌شوند، احتمال بیشتری برای شکافت ^{235}U، ^{239}Pu یا ^{241}Pu دارند و احتمال جذب نوترون‌ها توسط ^{238}U در مقایسه با نوترون‌هایی که از شکافت تولید شده‌اند، کمتر است. در این راکتورها، امکان استفاده از اورانیوم با غنای پایین با آب را به عنوان ماده تعدیل‌کننده فراهم شده‌است. طرح‌های نیروگاه PWR عمدتاً شامل ۲ سامانه بسته (حلقه‌های جدا شده) یعنی اولیه و ثانویه است (شکل–۳، شکل–۴).

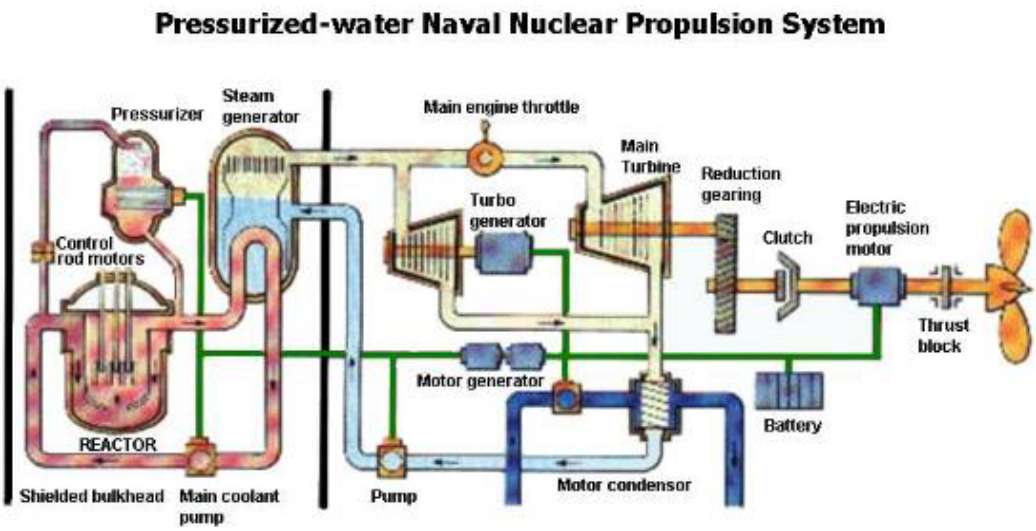
حلقه اولیه برای جلوگیری از جوشیدن، آب معمولی تحت فشار را به گردش در می‌آورد و از راکتور، حلقه‌های لوله‌کشی، پمپ‌ها و مولدهای بخار تشکیل شده‌است.

در سامانه ثانویه، بخار از ژنراتورهای بخار برای به حرکت

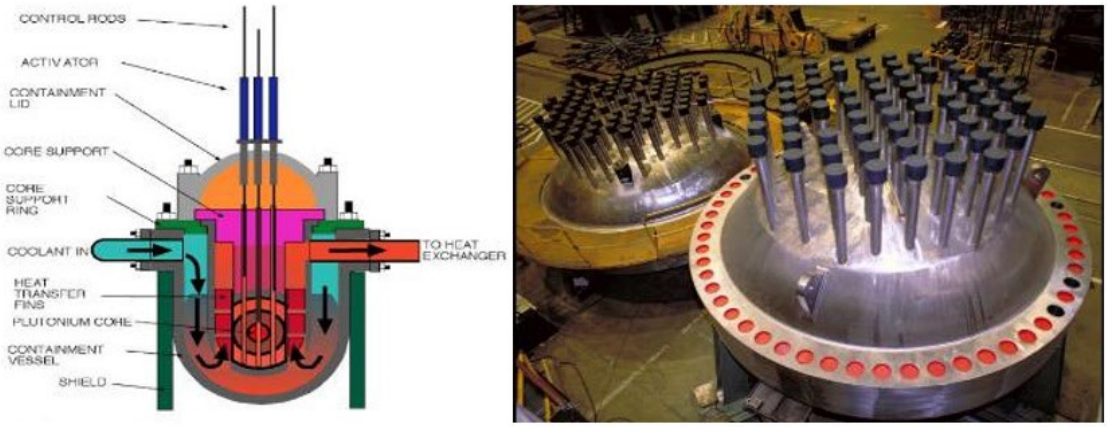
درآوردن ژنراتورهای توربین و به سمت توربین‌های پیشران اصلی که پروانه را به حرکت درمی‌آورند، جریان می‌یابد. در راکتورها، خنک‌کننده اولیه (آب سبک، آب سنگین، فلزات مایع (به جای آب) یا نمک مایع) تحت فشار بالا به هسته راکتور پمپ می‌شود و در آنجا با انرژی تولید شده توسط شکافت اتم‌ها گرم می‌شود. سپس آب گرم شده به یک مولد بخار جریان می‌یابد و در آنجا انرژی حرارتی خود را به یک سامانه ثانویه منتقل می‌کند. در آنجا بخار تولید می‌شود و به سمت توربین‌ها جریان می‌یابد که به نوبه خود یک ژنراتور الکتریکی را می‌چرخانند و نیروی رانش مورد نیاز برای نیروی محرکه را تولید می‌کنند (شکل-۵).



شکل-۳. راکتور زیردریایی



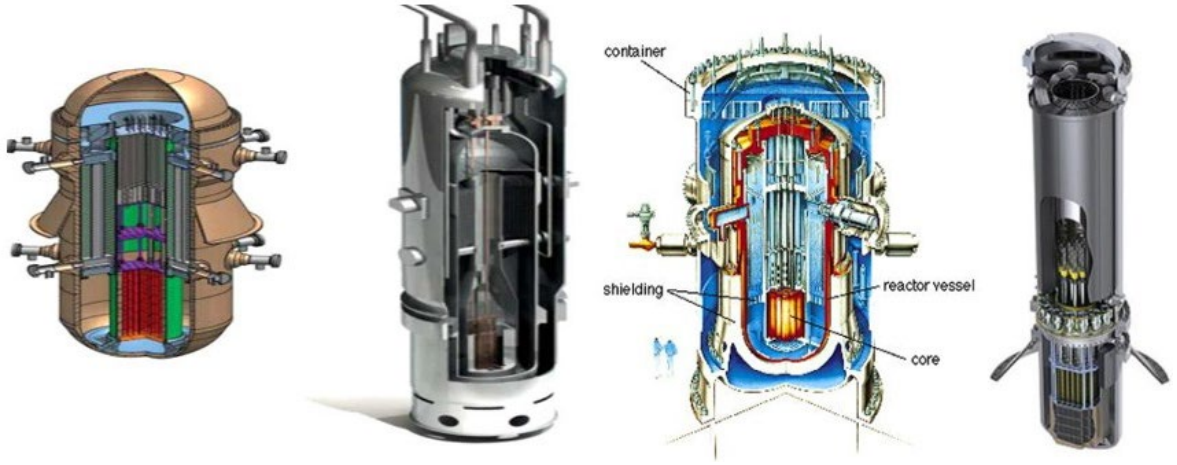
شکل-۴. ساختار یک راکتور کشتی



شکل-۵. ساختار یک راکتور LWR

میله‌های کنترل جذب نوترون برای تنظیم توان خروجی راکتور استفاده می‌شود. اینها معمولاً از جاذب‌های قوی نوترون (مانند بور و/یا کادمیوم) ساخته می‌شوند و در میان مجموعه‌های سوخت قرار می‌گیرند. هنگامی که میله‌ها کمی از موقعیت خود خارج می‌شوند، نوترون‌های بیشتری برای شکافتن اتم‌های U در دسترس هستند و در نتیجه توان خروجی افزایش می‌یابد. سپس میله‌های کنترل ممکن است مجدداً وارد شوند تا سطح توان تثبیت شود و در مواقع اضطراری ممکن است به طور خودکار خاموش شوند. برای محافظت از اپراتور در برابر اثرات تشعشع، سپرهایی در اطراف راکتور نصب شده‌است. به عنوان مثال، یک PWR معمولی حاوی بیش از ۱۰۰ تن محافظ سرب است و از یک موتور دیزل معمولی سنگین‌تر است. در حالی که مشخصات سامانه‌های مهندسی مشابه کارخانه توربین بخار است، قدرت کشتی برای تطبیق با ویژگی‌های راکتور و الزامات ایمنی در صورت برخورد و اتصال به زمین تنظیم می‌شود. پتانسیل پیشرانه پشتیبان یا اضطراری و خاموش شدن خودکار دو ویژگی طراحی اضافی هستند که مورد توجه قرار می‌گیرند.

در شکل-۶ چند نمونه از راکتورهای دریایی دیده می‌شود (۵).



شکل-۶. چند نمونه از راکتورهای دریایی

منابع انتشار آلودگی رادیواکتیو

گرچه هر جا شکافت هسته‌ای وجود داشته باشد، احتمال آسیب رساندن به مردم و محیط زیست وجود دارد و حفاظت از مردم و محیط زیست در برابر خطرات غیرقابل قبول ناشی از انتشار عمدی یا تصادفی مواد رادیواکتیو و تشعشعات یونیزان در بندر یا دریا لازم است اما عملکرد راکتور دریایی به دلیل اهداف عملیاتی متفاوت نسبت به راکتورهای معمولی قطعاً از درجه خطراکی کمتری برخوردارند. این به این دلیل است که اولاً، راکتورهای دریایی نسبت به راکتورهای معمولی غیرنظامی کوچکتر و از نظر توان کمتر هستند. به عنوان مثال، بزرگترین راکتورهای نیروی دریایی کمتر از یک پنجم یک کارخانه بزرگ راکتور تجاری آمریکا است. دوماً راکتورهای دریایی معمولاً با قدرت کامل کار نمی‌کنند. میانگین سطح توان راکتورهای ناوهای هواپیمابر هسته‌ای در طول عمر کشتی کمتر از ۱۵ درصد توان کامل آنها است. در مقابل، راکتورهای تجاری معمولاً با توان کامل کار می‌کنند. سوماً، سطح قدرت راکتور دریایی براساس نیازهای نیروی محرکه تعیین می‌شود، و نه جهت تامین انرژی برای نیازهای خدماتی دیگر کشتی، که همچنین توسط راکتور تغذیه می‌شوند، اما به بخش کوچکی از قدرت مورد نیاز برای رانش نیاز دارند.

در حالت کلی در سامانه راکتورها، وجود شکاف در یکی از این ۳ سامانه زیر باعث نشت مواد رادیو اکتیو به محیط زیست می‌گردد:

۱) پوشش سوخت(غلاف)

۲) سامانه خنک‌کننده

۳) محفظه ایمنی.

بنابراین این سامانه‌ها در راکتورها بسیار حائز اهمیت می‌باشند و کوچکترین خطا و خرابی در این سامانه‌ها می‌تواند منجر به حادثه گردد(۶).

حوادث هسته‌ای

تاریخچه حوادث در شناورهای هسته‌ای

اطلاعات موجود تا اکتبر ۲۰۰۰ نشان می دهد که حدود ۴۰۰ راکتور در شناورهای هسته‌ای در سراسر جهان وجود داشته است. از این تعداد، فدراسیون روسیه حدود ۷۵ کشتی نظامی فعال شامل ۳ کشتی سطحی و ۷۲ زیردریایی که حدود ۱۵۰ راکتور بود، داشت. زیرا اکثر زیردریایی‌های اتحاد جماهیر شوروی سابق دارای دو راکتور بودند در حالی که زیردریایی‌های کشورهای غربی معمولاً یک رآکتور دارند.

گزارشات موجود نشان می‌دهد که پنج حادثه تایید شده مربوط به کشتی‌های نظامی هسته‌ای رخ داده‌است که منجر به از دست دادن مواد رادیواکتیو و انتشار رادیونوکلئیدها در محیط‌های دریایی شده است. تایید شده که ۶ زیردریایی هسته‌ای از سال ۱۹۶۳ به دلیل تصادف در سایت‌های مختلف در اقیانوس اطلس از بین

رفته‌اند: دو زیردریایی از نیروی دریایی آمریکا – Thresher در ۱۹۶۳ و Scorpion در سال، سه مورد دیگر از نیروی دریایی اتحاد جماهیر شوروی – K-8 در سال ۱۹۷۰، K-219 در سال ۱۹۸۶ و K-278 s در سال ۱۹۸۹ و یک مورد از روسیه – K-141 Kursk در سال ۲۰۰۰.

در تمام موارد مربوط به سوانح هسته‌ای در دریا، بررسی‌های رادیولوژیکی بر روی نمونه‌هایی از آب دریا، رسوبات و ارگانیسم‌های اعماق دریا جمع‌آوری شده در نزدیکی مکان‌های مختلف سوانح گذشته انجام شده‌است و تاکنون، نظارت به طور کلی هیچ افزایشی را در سطوح رادیونوکلئیدها بالاتر از سطوح ناشی از ریزش سلاح‌های هسته‌ای نشان نداده‌است، به جز برخی از ^{60}Co که در نمونه‌های رسوب جمع‌آوری‌شده نزدیک زیردریایی‌های Scorpion و Thresher و ^{137}Cs در نمونه‌های آب و رسوب شناسایی شده‌اند(۷).

تقسیم‌بندی حوادث هسته‌ای براساس ساختار راکتور

انواع حوادث محتمل را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: دسته اول حوادثی هستند که در طراحی در نظر گرفته می‌شوند که به وسیله ی عملکرد اپراتور و سیستم‌های ایمنی نیروگاه می‌توان از آسیب ناشی از آنها جلوگیری کرد و یا مقدار آنها را به حداقل رساند. دسته دوم حوادثی می‌باشند که احتمال وقوع آنها نسبت به حوادث اول کمتر بوده اما در صورت وقوع می‌توانند منجر به حوادث شدید شامل پدیده‌هایی مانند ذوب قلب، اکسیداسیون شدید غلاف سوخت، تولید هیدروژن و نشت کسر قابل توجهی از مواد رادیواکتیو به بیرون گردند که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم. حوادث پیش آمده در رآکتورهای چرنوبیل، TMI و فوکوشیما از این قبیل هستند (۸).

حادثه در سامانه خنک‌کننده و ملاحظات ایمنی

یک منبع خنک‌کننده – غالباً آب و گاهی اوقات یک فلز مایع - حول هسته‌ی رآکتور برای جذب گرمای تولیدشده، در گردش است. گرما از رآکتور خارج و برای تولید بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکثر دستگاه‌های رآکتور دارای سیستم خنک‌کننده‌ای است که به‌طور فیزیکی از آب جدا هستند. آب به جوش می‌آید و بخار تحت فشار را برای توربین‌ها تولید می‌کنند. اما در بعضی رآکتورها آب مورد نیاز برای توربین‌های بخار به‌طور مستقیم توسط هسته‌ی رآکتور به جوش می‌آید.

یکی از خطرناکترین حوادثی که ممکن است در راکتورهای هسته‌ای اتفاق بیافتد حادثه از دست دادن خنک‌کننده می‌باشد که مهمترین این حوادث، حادثه شکسته شدن گیوتینی شاخه خنک‌کننده سرد یا گرم راکتور درحین بهره برداری در قدرت بالا می‌باشد که در صورت مهار نشدن آن منجر به ذوب قلب راکتور می‌گردد.

تجارب بین‌المللی بدست آمده از کارکرد نیروگاه‌های هسته‌ای نشان می‌دهد که از دست دادن جریان برق داخلی یا خارجی و عدم در دسترس بودن ژنراتورهای تغذیه برق اضطراری از مهمترین حوادث شکل گرفته در راکتورهای هسته‌ای است.

در یک شناور هسته‌ای، حوادث شدید ممکن است منجر به ذوب قلب راکتور و اجزای داخلی آن شود که از نتایج آن می‌تواند نشت مواد رادیواکتیو به محیط دریایی باشد. در یک حادثه چنانچه در اثر خاموشی کل راکتور، بایستی برای تامین برق مورد نیاز راکتور از دیزل ژنراتورها استفاده شود که شروع به کار آنها زمان بر می‌باشد. لذا تاخیر به وجود آمده در شروع به کار مجدد بعضی از سیستم‌ها مانند سیستم خنک‌کنندگی تجهیزات، منجر به آسیب رسیدن به بعضی از سیستم‌ها از جمله آب‌بندی پمپ‌های مدار خنک‌کننده می‌شود. این آسیب می‌تواند منجر به نشت خنک‌کننده از محل آب‌بندی پمپ‌ها شود. طبق این سطح از حادثه، نهایتاً قلب راکتور ذوب می‌شود. در این سناریوی حادثه و در نبود سیستم خنک‌کننده تجهیزات، آب‌بندی پمپ خنک‌کننده از دست رفته و نشت آن آغاز می‌شود.از دست رفتن خنک‌کننده سبب افزایش سریعتر دمای میله‌های سوخت و ذوب آنها می‌شود.

در حادثه‌ای با شدت کمتر، منبع برق AC پمپ‌های مدار خنک‌کننده و منبع تغذیه اصلی مولد بخار خاموش می‌شوند. همچنین شیرهای توربین بسته شده و راکتور خاموش می‌شود. در سناریوی مورد نظر در این حادثه منبع تغذیه کمکی مولد بخار نیز در دسترس نمی‌باشد و برداشت حرارت از راکتور متوقف می‌شود. با از دست رفتن برق، AC دیزل ژنراتورها سریعا شروع به کار می‌کنند و برق مورد نیاز برای شروع بکار سیستم‌های خنک‌کننده تجهیزات تامین می‌شود. با کار این سیستم، آب‌بندی پمپ‌ها بخصوص پمپ‌های مدار خنک‌کننده حفظ می‌شوند و نشتی از آنها صورت نمی‌گیرد.

با شروع این دو نوع حادثه و در نبود سیستم‌های ایمنی، دمای میله‌های سوخت تا نقطه ذوب بالا می‌رود. در نتیجه واکنش مواد مذاب با بتن کف محفظه ایمنی روی می‌دهد. هر چه این واکنش‌ها بیشتر باشند خوردگی بتن کف محفظه ایمنی افزایش می‌یابد و موجب تولید هیدروژن تولیدی ناشی از واکنش مواد مذاب با بتن می‌شود. هر چه خنک‌کنندگی مواد مذاب بهتر صورت گیرد خوردگی بتن کف کاهش یافته و احتمال نشت مواد رادیواکتیو از این طریق به محیط زیست کاهش می‌یابد.

در این سناریو سطح آب موجود در قلب راکتور که برای خنک‌کاری استفاده می‌شود کاهش یافته و میله‌های سوخت خارج از پوشش آب قرار گیرد. وقتی که قابلیت خنک‌کاری قلب راکتور از میان برود میله‌های سوخت شروع به ذوب شدن می‌کند و موادرادیواکتیو به محیط منتشر می‌شود. حوادثی که منجر به از بین رفتن پوشش قلب راکتور می‌شود معمولاً منجر به انتشار درصد زیادی از مواد نیز می‌گردد (۹).

البته استفاده شناورها و زیردریایی‌های جدید از سامانه خنک‌سازی غیرفعال برای تأثیرگذاری بر حذف گرمای واپاشی را دارند. این سامانه وظیفه برداشت حرارت قلب راکتور پس از خاموشی عادی و یا اضطراری را برعهده دارد. این سیستم به صورت منفعل بدون استفاده از پمپ‌ها و برق و با تکیه بر تزریق گرانشی و انبساط گازهای متراکم عمل می‌کند. این سامانه که مستقیماً به محفظه تحت فشار راکتور متصل است، می‌تواند درصد بالایی از گرمای واپاشی راکتور را برداشت و خنک‌کنندگی قلب راکتور را تضمین نماید و از آنجا که این سیستم به صورت غیرفعال عمل می‌کند لذا حتی در صورتی که حادثه از دست دادن کامل برق نیروگاه رخ دهد بدون نیاز به منابع الکتریکی تضمین‌کننده برداشت حرارت باقیمانده قلب بوده و از ذوب شدن قلب جلوگیری می‌نماید. این درحالی است که در راکتورهای متداول اغلب از سیستم‌های فعال استفاده می‌شد که در صورت حادثه فقدان تمامی منابع الکتریکی می‌توانست حاشیه ایمنی راکتور را به خطر اندازد.

از منظر دیگر وجود اقیانوس و دریا به عنوان محافظ و راهکاری برای خنک کردن راکتور نیز مدنظر است به‌طوری‌که اقدام به غرق کردن و خنک سازی چاهک راکتور در یک نیروگاه برای حفظ قلب مذاب درون راکتور در طول مدت حادثه شدید، یک رویکرد موثر برای پیشگیری از انفجار بخار خارج از مخزن راکتور و فعل و انفعال بتون و قلب ذوب شده‌است. هنگامی‌که دمای خروجی قلب به دمای شروع ذوب قلب برسد اپراتور مسیر آب را به کف ساختمان راکتور باز و چاهک راکتور را در آب غرق و خنک می‌نماید (۹).

حادثه منجر به نشت مایع خنک‌کننده

حادثه دیگری که ممکن است روی دهد نشت آب خنک‌کننده به محیط دریایی است که حاوی رادیونوکلئیدهایی با نیمه‌عمر بسیار کوتاه است که از چند ثانیه تا چند ساعت متغیر است. این گروه شامل گونه‌هایی مانند نیتروژن ۱۶ (نیمه عمر ۷ ثانیه)، آرگون ۴۱ (نیمه عمر ۱/۸ ساعت) و منگنز ۵۶ (نیمه عمر ۲/۶ ساعت) است. اما باید دانست که رادیواکتیویته در آب خنک‌کننده که در اطراف هسته راکتور جریان دارد عمدتاً محصول فعال‌سازی نیتروژن ۱۶ است که توسط جذب نوترون از اکسیژن ایجاد می‌شود. برای طولانی‌ترین عمر این گروه، غلظت آب در عرض حدود ۲۴ ساعت به یک هزارم غلظت اولیه کاهش می‌یابد. بنابراین حتی در صورت نشت آب خنک‌کننده در محیط دریایی، سریعاً در همان چند متر اول آب دریا، جذب و انرژی آن از بین می‌رود(۱۰).

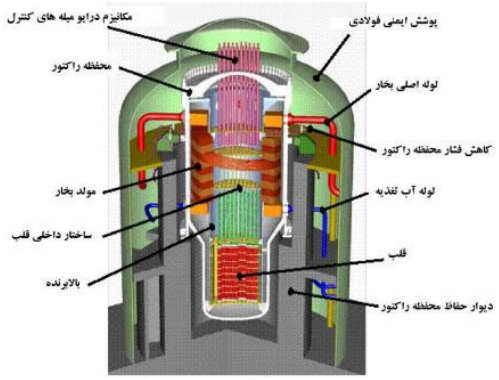
حادثه در محفظه ایمنی و ملاحظات ایمنی

محفظه ایمنی یک حفاظی است که معمولاً ازجنس استیل یا بتن مسلح شده می‌باشد، این حفاظ را در اطراف راکتورها قرار می‌دهند که در مواقع حوادث مانع از خروج مواد رادیواکتیو به خارج از راکتور و آلودگی محیط‌زیست گردد. معمولاً هر محفظه ایمنی دارای یک فشار طراحی می‌باشد که نباید فشار محیط درون محفظه از این فشار بیشتر گردد. محدوده این فشار طراحی معمولاً بین ۴۱۰ تا ۱۴۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. این محفظه طوری ساخته شده است که هوای درون محفظه را کاملاً از هوای بیرون جدا می‌کند، به عبارت دیگر چون هوای درون آن ممکن است آلوده به موادرادیواکتیو باشد قدرت نفوذ به خارج را ندارد. و همچنین لایه استیلی محفظه ایمنی، جدا از لایه بتنی است و لایه بتنی جهت حفظ محفظه از آسیب‌های ناشی از برخورد موشک و هواپیما تعبیه گردیده است. سامانه محفظه‌های ایمنی در راکتورهای قدرت معمولاً بوسیله اندازه، شکل، مواد استفاده شده در ساختارمحفظه و سامانه‌های حمایتی در هنگام حوادث مشخص می‌شوند.

نوع محفظه برای راکتورها با توجه به نوع راکتور، تولیدات راکتور و نیازهای ضروری نیروگاه تعیین می‌گردد. راکتور آب تحت فشار معروف به رآکتورهای پی.دبیلیو.آر یکی از نخستین انواع رآکتور هسته‌ای صنعتی در نیروگاه‌های هسته‌ای در جهان است که از انرژی هسته‌ای استفاده می‌کند. این رآکتورها معمولاً در فشارهای آبی بالا (مثل ۱۵ مگاپاسکال) کار می‌کنند، و از آنجایی که آب درون این سامانه‌ها به صورت بخار نیست، رآکتور احتیاج به مبادله‌گرهای گرمایی جهت تولید انرژی دارد، لذا بازده کل این نوع راکتورحدودا بین ۳۲٪ تا ۳۳٪ تخمین زده می‌شود. این رآکتور یکی ازسه نوع راکتورهای آب سبک است، این نوع راکتور، رایج‌ترین نوع راکتورهای هسته‌ای است و در حال حاضر، بیش از ۲۳۰ عدد ازآنها در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید برق و صدها راکتور دیگربرای تأمین انرژی تجهیزات دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از حوادثی که ممکن است برای یک راکتور هسته‌ای رخ دهد، بوجود آمدن شکاف یا شکستگی در محفظه ایمنی راکتور است. محفظه ایمنی راکتور همان‌طورکه از نام آن پیداست از نظر ملاحظات ایمنی از درجه حفاظت بالایی برخوردار است به‌طوری‌که ایمنی آنها برای مقابله با موشک‌های خارجی طراحی شده‌است. به عنوان مثال در برخی از شناورها و زیردریایی‌ها اولاً از مواد بالاستینگ مانند ماسه یا بتن در فضای دو طرفه ساختار بدنه استفاده شده‌است تا بتواند انرژی جنبشی اولیه را در حمله هوایی به طور موثر جذب کند. استفاده از مواد بالاست شن و بتن، ایمنی تجهیزات هسته‌ای در داخل سازه بدنه در برابر حملاتی مانند حمله هوایی ایمن تلقی می‌شود زیرا حداکثر نفوذ به تجهیزات با موتور ضربه‌ای مدل‌سازی شده توسط هیچکدام از آنها نمی‌رسد. ثانیاً در بدنه محفظه راکتورهای شناورها یا زیردریایی‌ها مانند اکثر راکتورهای نیروگاهی، از دو لایه حفاظتی استفاده شده‌است که سپر اولیه درونی که برای محدود کردن تشعشعات داخل محفظه هسته‌ای استفاده می‌شد، از یک حلقه آب و یک حفاظ سربی تشکیل می‌شود. سپر ثانویه بیرونی نیز دارای دیواره بتنی با ضخامت از ابعاد متر در قسمت پایینی و در نیمه بالای محفظه هسته‌ای، لایه‌های سربی و پلی اتیلن با ضخامت مناسب وجود دارد. در راکتورهای جدید در نیمه بالایی از بتن سرپانتینیت

جذب‌کننده نوترون ساخته می‌شوند. وجود بتن در بدنه راکتور باعث جذب حداقلی نفوذ اجسام حمله‌ور خارجی به بدنه راکتور شده و کمترین انحنا را در پوسته داخلی راکتور ایجاد می‌کند(شکل-۷).



شکل-۷. ساختار محفظه ایمنی یک راکتور

علاوه بر این، هر دو طرف محفظه هسته‌ای با لایه‌های چوبی و فولادی متناوب به ضخامت مناسب به منظور محافظت در برابر برخورد محافظت می‌شوند. تمام این اقدامات اجازه می‌دهد کشتی یا زیردریایی در برابر برخورد و سقوط ایمن باشند.

برخی از شناورها یا زیردریایی‌ها، دارای سامانه‌های مهار هستند تا هرگونه انتشار مواد رادیواکتیو از سامانه اولیه در داخل محفظه باقی بماند. در صورت غرق شدن کشتی، دریچه‌های دیواره محفظه تا زمانی که فشار بیرونی بیشتر از فشار داخل باشد، باز می‌ماند و در نتیجه محفظه را غرق می‌کند و از تخریب آن و انتشار رادیواکتیویته جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، یک سامانه سرکوب فشار وجود دارد. با آزاد شدن بخار در داخل محفظه، فشار افزایش می‌یابد. اگر افزایش فشار از حدود استاندارد بیشتر شود، یک دریچه باز می‌شود و مخلوط هوا و بخار از طریق یک حوضچه آب به پایین هدایت می‌شود که در آن بخار متراکم می‌شود و فشار کاهش می‌یابد. سپس، مایع خنک‌کننده از طریق پمپ گردشی کنسرو شده به راکتور جریان می‌یابد. طراحی بسیار فشرده است. به این ترتیب طول لوله و تعداد اجزای مدار اولیه به حداقل می‌رسد و خطر نشتی کاهش می‌یابد. مخزن‌های راکتور با یک لایه فولادی ضد زنگ پوشیده شده‌اند (۱۱).

مواد رادیواکتیو ناشی از حوادث هسته‌ای

راکتورهای مورد استفاده در همه زیردریایی‌های نیروی دریایی و کشتی‌های سطحی ایالات متحده به گونه‌ای طراحی شده‌اند که خطرات احتمالی برای محیط‌زیست را حتی در شدیدترین شرایط تلفات، از جمله غرق شدن واقعی کشتی، به حداقل برسانند. ابتدا، هسته راکتور طوری طراحی شده‌است که از نظر فیزیکی غیرممکن است که مانند بمب منفجر شود. دوم، عناصر سوخت راکتور از موادی ساخته شده‌اند که حتی در آب دریا بسیار مقاوم در برابر خوردگی هستند. هسته راکتور می‌تواند برای قرن‌ها در آب دریا غوطه‌ور بماند، بدون اینکه محصولات شکافت آزاد شود، در حالی که رادیواکتیویته تجزیه می‌شود، زیرا روکش محافظ روی عناصر سوخت تنها چند میلیونم اینچ در سال خورده می‌شود. بنابراین، در صورت وقوع یک حادثه جدی که راکتور به طور کامل در آب دریا غوطه‌ور می‌شود، عناصر سوخت به طور نامحدود دست‌نخورده باقی می‌مانند و مواد رادیواکتیو موجود در این عناصر سوختی نباید آزاد شوند. علاوه بر این، حداکثر سرعت انتشار و پراکندگی رادیواکتیویته در اقیانوس، حتی اگر پوشش محافظ روی سوخت از بین برود، آنقدر کم خواهد بود که ناچیز است.

مواد رادیواکتیو تنها در صورتی می‌توانند از این نوع راکتور آزاد شوند که عناصر سوخت واقعاً ذوب شوند و علاوه بر این، مرز سیستم راکتور کاملاً جوش داده شده با استحکام بالا پاره شود. بسیاری از وسایل حفاظتی راکتور و ویژگی‌های خودتنظیمی ذاتی برای جلوگیری از ذوب شدن عناصر سوخت طراحی شده‌اند. سیل یک راکتور با آب دریا خنک‌کننده اضافی را برای عناصر سوخت فراهم می‌کند و بنابراین محافظت بیشتری در برابر انتشار محصولات شکافت رادیواکتیو ایجاد می‌کند.

رادیونوکلئیدهای محصول شکافت تولید شده در خود راکتور در عناصر سوخت از جمله گازهای شکافت کریپتون و زنون باقی می مانند. برخی از محصولات شکافت در خنک‌کننده راکتور آزاد می‌شوند که طولانی‌ترین گونه‌های آن استرانسیوم ۹۰ و سزیم ۱۳۷ است. محصولات شکافت تولید شده از سوخت در راکتور، از جمله ید و گازهای شکافت کریپتون و زنون، در عناصر سوخت حفظ می‌شوند. با این حال، مقادیر کمی از ناخالصی‌های اورانیوم طبیعی موجود در مواد ساختاری راکتور، مقادیر کمی از محصولات شکافت را به خنک‌کننده راکتور آزاد می‌کند. با این حال، غلظت محصولات شکافت و حجم مایع خنک‌کننده راکتور آزاد شده به قدری کم است که کل رادیواکتیویته منتسب به رادیونوکلئیدهای محصول شکافت با عمر طولانی تنها بخش کوچکی از کل انتشار رادیواکتیویته گامای طولانی مدت را تشکیل می‌دهد.

تریتیوم، عنصر رادیواکتیو دیگری که در سیستم‌های خنک‌کننده راکتور تشکیل می‌شود، نیمه عمری معادل ۱۲/۳ سال دارد، اما پرتودهی ساطع شده به شکل ذرات بتا با انرژی بسیار کم است. همچنین، تریتیوم یک جزء طبیعی از محیط است که در نتیجه تابش کیهانی در جو فوقانی تشکیل شده‌است. تریتیوم ایزوتوپ رادیواکتیو هیدروژن است. مقادیر کمی از تریتیوم در سیستم‌های خنک‌کننده راکتور هنگامی تشکیل می‌شود که نوترون‌ها با دوتریوم (ایزوتوپ غیر رادیواکتیو هیدروژن) که به طور طبیعی وجود دارد و حدود ۰/۰۱۵ درصد از اتم‌های هیدروژن را در آب دریا تشکیل می‌دهد، برهم کنش می‌کنند. اگرچه تریتیوم نیمه عمری معادل ۱۲ سال دارد، اما تابشی که تولید می‌کند آن‌قدر کم انرژی است که از نظر زیست محیطی ناچیز است. در واقع، دستورالعمل‌های ایمنی صادر شده توسط کمیسیون بین‌المللی

حفاظت رادیولوژیکی، شورای ملی حفاظت در برابر تشعشع و اندازه‌گیری، کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای ایالات متحده و سایر آژانس‌های تنظیم استاندارد، وجود تریتیوم ۱۰۰ برابر کبالت-۶۰ را مجاز می‌سازد. تریتیوم تولید شده توسط راکتورهای هسته‌ای دریایی به شکل اکسید است و از نظر شیمیایی از آب قابل تشخیص نیست. بر خلاف سایر رادیونوکلئیدها، تریتیوم نه به طور قابل‌توجهی در زندگی دریایی متمرکز می‌شود و نه در رسوبات جمع می‌شود.

کربن ۱۴ به مقدار کم در سیستم‌های خنک‌کننده راکتور تشکیل می‌شود و نیمه عمر آن ۵۷۳۰ سال است. با این حال، در طول فرآیند واپاشی، فقط تابش بتا با انرژی کم ساطع می‌کند و همچنین معمولاً در محیط طبیعی یافت می‌شود. کربن ۱۴ به طور طبیعی در محیط وجود دارد. از فعل و انفعالات تشعشعات کیهانی با نیتروژن و اکسیژن در اتمسفر فوقانی تولید می‌شود و برای تشکیل دی‌اکسیدکربن اکسید می‌شود. کربن ۱۴ از نظر شیمیایی از سایر ایزوتوپ‌های کربن قابل تشخیص نیست. دی‌اکسیدکربن در سراسر اتمسفر پخش و همرفت می‌شود و وارد چرخه کربن زمین می‌شود. مرجع ۲۰ بیان می‌کند که موجودی کربن ۱۴ طبیعی زمین حدود ۲۵۰ میلیون کوری تخمین زده می‌شود که تقریباً ۹۵ درصد آن در اقیانوس‌ها قرار دارد. رادیونوکلوئیدهای حاصل از شکافت اورانیم مانند سزیم ۱۳۲ و ید ۱۳۱ خود دارای خاصیت پرتوزایی بوده و تشعشعات رادیواکتیو از خود متصاعد می‌کنند. از طرفی انتشار این مواد در محیط در افرادی که با آن مواجه می‌شوند ایجاد اثرات پرتوی نموده و در حیوانات و گیاهانی که در معرض این مواد قرار می‌گیرند اثرات کوتاه مدت و دراز مدت پرتوی ایجاد می‌نماید. تمامی مواد رادیواکتیو بسته به نیمه‌عمری که دارند با واپاشی هسته‌های خود به رادیونوکلوئیدهای دیگر تبدیل شده و در این فرآیند برخی از ذرات و تشعشعات از خود متصاعد می‌کنند. این تشعشعات شامل تشعشعات الکترومغناطیسی مانند اشعه γ و تشعشعات ذره‌ای نظیر ذرات β، α و نوترون می‌باشد. در یک حادثه نیروگاه هسته‌ای، استرانسیوم-۹۰ نیز در نتیجه شکافت هسته‌ای تولید می‌شود، هرچند از نظر مقدار کمتر از سزیم-۱۳۴ و سزیم-۱۳۷ است (جدول-۱) (۷،۱۲).

جدول-۱. مواد رادیواکتیو حاصل از یک حادثه هسته‌ای

	تریتیوم	استرانسیوم ۹۰	ید ۱۳۱	سزیم ۱۳۴	سزیم ۱۳۷
نوع تابش	β	β	β, γ	β, γ	β, γ
نیمه عمر زیستی	۱۰ روز	۵۰ سال	۸۰ روز	۷۰-۱۰۰ روز	۷۰-۱۰۰ روز
نیمه عمر فیزیکی	۱۲/۳ سال	۲۹ سال	۸ روز	۲/۱ سال	۳۰ سال
نیمه عمر موثر	۱۰ روز	۱۸ سال	۷ روز	۶۴-۸۸ روز	۷۰-۹۹ روز

اثر آب دریا بر مواد رادیواکتیو

در این قسمت فرض شده‌است که یک حادثه شدید هسته‌ای در شناور یا زیردریایی هسته‌ای رخ داده‌است و با این فرض اثرات آب دریا بر مواد رادیواکتیو انتشاری مورد بررسی واقع شده‌است.

- درصورت تولید نوترون‌ها سریع و پرتوهای گامای در زیر آب، این پرتوها به سرعت توسط آب دریای اطراف ضعیف می‌شوند و معمولاً کمتر از ۱ متر حرکت می‌کنند. مولکول‌های آب فعال نمی‌شوند، زیرا جذب نوترون هیدروژن و اکسیژن، ایزوتوپ‌های پایدار دوتریوم را تولید می‌کند. در مقیاس‌های کوتاه‌مدت، جذب دوگانه نسبتاً کمی برای تشکیل تریتیوم رادیواکتیو که معمولاً با راکتورهای هسته‌ای مرتبط است، وجود دارد. احتمال جذب سه گانه برای تشکیل ^{19}O یا ^{16}O تحت واکنش نوترون-پروتون با انرژی بالا برای تشکیل ^{16}N نیز کم است.
- با توجه به جدول-۱ دیده می‌شود که اغلب مواد رادیواکتیو حاصل از یک حادثه هسته‌ای دارای تابش های رادیواکتیو از جنس آلفا (α) و بتا (β) هستند که این دو نوع تابش در آب دارای برد بسیار محدود زیر ۱۰ سانتی‌متر هستند و آب دریا حفاظ خوبی در برابر انتشار پرتویی این نوع آلودگی‌ها است.
- با توجه به جدول-۱ دیده می‌شود که این عناصر از نیمه عمرهای پایینی برخوردار هستند و تنها رادیونوکلئید ^{134}Cs دارای نیمه عمر قابل توجهی است. اما از آنجایی که پراکندگی چنین این عناصر در مقیاس‌های زمانی نسبتاً سریع رخ می‌دهد و رادیونوکلئیدهای مربوطه به سرعت توسط آب‌های اطراف پراکنده و رقیق می‌شوند، بنابراین توزیع مکانی آلودگی به صورت محلی محدود می‌شود. به عنوان اثبات این نظریه پس از آزمایش انفجار هسته‌ای ویگوام، که دارای بالاترین بازده (۳۰ کیلوتن) و عمیق ترین عمق (۶۱۰ متر) از هر آزمایش زیر آب بود، فعالیت سطحی تا حد زیادی در عرض ۴ روز پس از انفجار پراکنده شد (همانطور که با استفاده از ابزارهای نقشه‌برداری اندازه‌گیری شد). این کاهش نتیجه اختلاط افقی و عمودی علاوه بر واپاشی رادیواکتیو است. بر اساس داده‌های آزمایش Wigwam، این بدان معناست که سیگنال پرتوها پس از ۱ روز به ۴/۵۷ درصد، پس از ۷ روز به ۰/۰۹ درصد و پس از ۱۴ روز به ۰/۰۲٪ کاهش می‌یابد. نکته مهم دیگر، اینکه سهم ^{38}Cl و ^{24}Na که ۹۹/۸ درصد از فعالیت القایی اولیه را تشکیل می‌دهند، در عرض ۲ هفته پس از انفجار هسته‌ای به طور کامل تجزیه می‌شود (۱۰).

نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه ساختار و عملکرد راکتورهای هسته‌ای شناورها و زیردریایی‌های هسته‌ای پرداختیم و منابع تولید مواد و پرتوهای رادیواکتیو ناشی از یک حادثه هسته‌ای را مورد بررسی قرار دادیم. سپس به قسمت‌های مختلف راکتور به عنوان منبع تولید رادیواکتیو و نیز جنبه‌های ایمنی این قسمت‌ها جهت جلوگیری از نشت و یا انتشار مواد رادیواکتیو در محیط‌زیست پرداختیم. نشان دادیم که ۳ قسمت عمده میله‌های سوخت، سامانه خنک‌کننده و محفظه ایمنی منابع اصلی انتشار رادیواکتیو در اثر حادثه هستند. اشاره شد که راکتورهای زیردریایی‌ها و کشتی‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که خطرات احتمالی برای محیط زیست را حتی در شدیدترین شرایط تلفات، از جمله غرق شدن واقعی کشتی، به حداقل برسانند. همچنین نشان دادیم که هسته راکتور طوری طراحی شده‌است که از نظر فیزیکی غیرممکن است که مانند بمب منفجر شود و سوخت راکتور از موادی ساخته شده‌اند که حتی در آب دریا بسیار مقاوم در برابر خوردگی هستند. هسته راکتور در صورت وقوع یک حادثه جدی که راکتور به طور کامل در آب دریا غوطه‌ور می‌شود، عناصر سوخت به طور نامحدود دست‌نخورده باقی می‌مانند و مواد رادیواکتیو موجود در این عناصر سوختی نباید آزاد شوند.

همچنین به نقش مهم آب دریا در تضعیف و پراکندگی انتشار مواد رادیواکتیو پرداختیم و نشان دادیم که نوترون‌ها سریع و پرتوهای گامای در زیر آب، این پرتوها به سرعت توسط آب دریای اطراف ضعیف می‌شوند و معمولاً کمتر از ۱ متر حرکت می‌کنند و همچنین اغلب مواد رادیواکتیو حاصل از یک حادثه هسته‌ای دارای تابش‌های رادیواکتیو از جنس آلفا (α) و بتا (β) هستند که این دو نوع تابش در آب دارای برد بسیار محدود زیر ۱۰ سانتی‌متر هستند و آب دریا حفاظ خوبی در برابر انتشار پرتویی این نوع آلودگی‌ها است.

تشکر و قدردانی: از همه اساتیدی که در غنای مطالب حاضر یاری‌رسان بودند، نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

نقش نویسندگان: همه نویسندگان در نگارش اولیه مقاله یا بازنگری آن سهیم بودند و همه با تایید نهایی مقاله حاضر، مسئولیت دقت و صحت مطالب مندرج در آن را می پذیرند.

تضاد منافع: نویسندگان تصریح می‌کنند که هیچ گونه تضاد منافعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

منابع

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_marine_propulsion
2. Schøyen H, Steger-Jensen K. Nuclear propulsion in ocean merchant shipping: The role of historical experiments to gain insight into possible future applications. Journal of cleaner production. 2017; 169:152-60. doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.163
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor
4. https://elicaelectric.com/blog/
5. Carelli MD, Conway LE, Oriani L, Petrović B, Lombardi CV, Ricotti ME, Barroso AC, Collado JM, Cinotti L, Todreas NE, Grgić D. The design and safety features of the IRIS reactor. Nuclear Engineering and Design. 2004;230(1-3):151-67 doi:10.1016/j.nucengdes.2003.11.022
6. Mohammad Sadeghi Azad MB, Chobdar Rahim F. Investigating the thermohydraulic parameters of the safety chamber of the reactor due to the accident of breaking the cooling cold branch, Amirkabir Mechanical Engineering. 2020; 53(3):1606-1591.
7. Hashimoto S, Komatsu M, Imamura N, et al. Forest Ecosystems. In: Environmental Transfer of Radionuclides in Japan Following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. IAEA, Vienna, 2020: 129-178.
8. Pirouzmand A, Ghasemi A, Faqihi F. Analysis of the LBLOCA incident along with the failure of the active part of the emergency cooling system by the RELAP5 code in Bushehr reactor, Proceedings of the 20th Iran Nuclear Conference, Gilan University, Rasht, Iran, March 8-7. 2012:787-782.
9. Qiu J, Li L, Tai Y, Yao S, Su G, Qiu S. MELCOR simulation of the SBLOCA induced severe accident for the SMR in a floating nuclear power plant. Progress in Nuclear Energy. 2020; 129:103509. doi:10.1016/j.pnucene.2020.103509
10. Burnett JL, Milbrath BD. Radionuclide observables of underwater nuclear explosive tests. Journal of environmental radioactivity. 2018; 192: 160-5 doi:10.1016/j.jenvrad.2018.06.007
11. Hirdaris SE, Cheng YF, Shallcross P, Bonafoux J, Carlson D, Prince B, et al. Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. Ocean Engineering. 2014;79:101-30 doi:10.1016/j.oceaneng.2013.10.015
12. Hashimoto S, Komatsu M, Miura S. Radioactive Materials Released by the Fukushima Nuclear Accident. In: Forest Radioecology in Fukushima. Springer. 2022 doi:10.1007/978-981-16-9404-2_1