پژوهشی بر روند تغییرات چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین در نسل‌های مختلف نیروگاه‌های آب سبک تحت فشار

امیر بهرامی‌پناه[1] (نویسنده مسئول)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵

چکیده

حدود دو سوم برق تولیدی کل نیروگاه‌های مختلف هسته‌ای جهان، در نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک تحت فشار تولید می‌گردد. کشورهای متعددی در طراحی و توسعه این نیروگاه‌ها بر پایه تکنولوژی‌های مشابه و یا متفاوت نقش داشته‌اند و در این بین کشور آمریکا به‌عنوان یکی از پیشروترین کشورها در زمینه طراحی و ساخت نیروگاه‌ها مطرح بوده است. نسل‌های مختلف این نیروگاه‌ها از اواسط قرن گذشته تا کنون با تاریخچه‌ای درحدود بیش از شش دهه توسعه یافته‌اند. در این مقاله با بیان این تاریخچه به بررسی نمونه‌های موردی نسل‌های مختلف این نوع نیروگاه در طول زمان و ارزیابی روند تغییر و تحول ساختمان‌های اصلی آن‌ها یعنی ساختمان راکتور و ساختمان توربین پرداخته می‌شود. در این پژوهش ابتدا با بررسی وتشریح نحوه فرآیند تولید بخار و الکتریسیته در این دو ساختمان و سپس به بررسی روند تکامل تدریجی معماری و نحوه چیدمان این دو ساختمان شامل فرم و نحوه چیدمان و قرارگیری آن‌ها نسبت به یکدیگر در نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها و تغییرات عمده چیدمان معماری نسبت به یکدیگر پرداخته می‌شود. روش تحقیق در این پژوهش به صورت توصیفی، ترسیمی و تحلیلی می باشد که بر اساس بهره‌گیری از کتب، مقالات و بر اساس روش مشاهداتی و بررسی بر روی فضاهای پیچیده هر نیروگاه بر مبنای نقشه هوایی و سایت های اینترنتی بوده است. نمونه‌های بررسی شده در این مقاله شامل بیست و نه واحد نیروگاه آب سبک تحت فشار می‌باشد که تمامی نسل‌های نیروگاه‌ها را شامل می‌شوند. در این مقاله با ترسیم چیدمان دو ساختمان راکتور و توربین در نمونه‌های موردی، به تجزیه و تحلیل و ارائه الگوی مناسب چیدمان این دو ساختمان نسبت به یکدیگر پرداخته می‌شود. سپس با روش تطبیقی و مقایسه‌ای تفاوت چیدمانی نیروگاه‌های نسل‌های مختلف و دلایل آن بیان گردیده و در یک جدول گرافیکی مدل‌های استخراجی با توجه به نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها گردآوری شده است. در نهایت با توجه به مطالعات و تجزیه و تحلیل صورت گرفته، نحوه چیدمان‌های مناسب و نامناسب ساختمان توربین نسبت به ساختمان راکتور ارائه گردیده است. نتیجه این مقاله نشان می‌دهد که چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین با الویت افزایش ایمنی و عملکرد نیروگاه طراحی گردیده است و این چیدمان همواره در نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها بهبود یافته و روند رو به تکاملی را طی نموده است.

واژه‌های کلیدی

نیروگاه آب سبک تحت فشار، نسل نیروگاه، ساختمان راکتور، ساختمان توربین، چیدمان معماری.

۱. دکتری معماری، عضو هیات علمی (استادیار) دانشکده هنر و معماری، دانشگاه خوارزمی

۱. مقدمه

امروزه کشورهای بسیاری به ویژه کشورهای پیشرفته، سهم قابل توجهی از برق مورد نیاز خود را از انرژی هسته‌ای تامین می‌نمایند. در این میان آمریکا با دارا بودن ۱۰۴ نیروگاه هسته‌ای در حال بهره‌برداری بیشترین نیروگاه‌های هسته‌ای را نسبت به سایر کشورها در خود جای داده است و تقریباً ۱۹.۲ در صد یا ۷۹۰ bkWh[1] از برق مصرفی خود را از انرژی هسته‌ای که یک منبع انرژی پاک محسوب می‌شود، تأمین می‌نماید.

نیروگاه‌های هسته‌ای با راکتورهای آب سبک تحت فشار[2](PWR) به عنوان یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین نیروگاه‌ها در حدود ۶۴ درصد کل نیروگاه‌های هسته‌ای جهان و ۶۶ در صد نیروگاه‌های هسته‌ای آمریکا را تشکیل می‌دهد. (www.nrc.gov/reactor : 2013) این راکتورها که در ابتدا در زیر دریایی‌ها بکار گرفته می‌شدند، در طی بیش از شش دهه توسعه، طراحی و ساخت همواره به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع تولید برق هسته‌ای کاربرد داشته‌اند. در این بین، شرکت وستینگهاوس[3] تلاش بسیاری در جهت طراحی و ساخت این نیروگاه‌ها داشته است بطوریکه تکنولوژی بکار رفته در حدود نیمی از نیروگاه‌های هسته‌ای جهان بر پایه تکنولوژی این شرکت در شش دهه توسعه می‌باشد. تاریخچه‌ای از نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک تحت فشار آمریکا را به شرح زیر می‌توان بیان نمود:

۱۹۵۷، دوم دسامبر، اولین نیروگاه هسته‌ای آب سبک تحت فشار در مقیاس بزرگ در Shipping port در پنسیلوانیا شروع به بهره‌برداری نمود. نیروگاه بعد از سه هفته به بالاترین قدرت خود رسید و برق منطقه پیتس بورگ را تامین نمود.

۱۹۶۰، نوزدهم آگوست، سومین نیروگاه هسته‌ای این کشور از نوع آب سبک تحت فشار به نام Yankee Rowe به بهره‌برداری رسید.

۱۹۷۱، بیست‌و دو نیروگاه هسته‌ای تجاری در بهره‌برداری کامل قرار می‌گیرند و ۲/۴ درصد برق آمریکا را تولید می‌نمایند.

۱۹۷۴، اولین نیروگاه هسته‌ای با قدرت بالای ۱۰۴۰MWe به‌نام Common wealth Edison’s Zion 1به بهره‌برداری می‌رسد. (www.nrc.gov : 2013)

۱۹۷۸، بیست و هشت مارس، یک حادثه شدید در نیروگاه Three Mile Island در نزدیکی هاریسبورگ ایالت پنسیلوانیا رخ می‌دهد. حادثه براساس کاهش خنک‌کننده در قلب راکتور براساس ترکیبی از خطاهای انسانی و درست عمل نکردن تجهیزات مکانیکی رخ می‌دهد اما خوشبختانه کسی در این حادثه صدمه نمی‌بیند.

۱۹۸۲، اول اکتبر، بعد از ۲۵ سال بهره‌برداری از نیروگاه Shipping port، آن را برای همیشه خاموش کردند. (Goswami D. Y., 2008: 16-8)

۱۹۹۲، صد و ده نیروگاه هسته‌ای درحال بهره‌برداری می‌باشند که تقریباً ٪۲۲ برق کشور را تامین می‌کنند.

۱۹۹۶، یک واحد از نیروگاه Watts Bar با قدرت ۱۱۲۱ MWeدر تنسی از نوع آب سبک تحت فشار به عنوان جدیدترین نیروگاه به بهره‌برداری رسید.

۲۰۰۹، صد و چهار نیروگاه هسته‌ای در آمریکا در حال بهره‌برداری می‌باشد. تعداد شصت و نه نیروگاه آنPWR هستند که پانزده نیروگاه یک راکتوری، بیست و چهار نیروگاه دو راکتوری و دو نیروگاه سه راکتوری می‌باشند. (www.nei.org: 2013)

۱-۱- بیان مساله

از اصول مهم در طراحی نیروگاه هسته‌ای اتخاذ تدابیر ایمنی و پیشگیرانه جهت حفاظت از نیروگاه در برابر حوادث مختلف می‌باشد. در طراحی نیروگاه‌ها طراحان رشته‌های گوناگون مهندسی با یک کار منسجم جهت بالا بردن کیفیت طراحی و پیشگیری از حوادث و محدود کردن اثرات حوادث تهدیدکننده نیروگاه بر روی افزایش ایمنی تمرکز دارند. در بین طراحان رشته‌های مختلف مهندسی، طراحان معماری نقش مؤثری در بالا بردن کیفیت استانداردهای ایمنی در طراحی ایفا می‌کنند. طراح معمار با چیدمان اصولی و یا غیر اصولی ساختمان‌های نیروگاه می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش ایمنی نیروگاه‌ها گردد. یکی از راه‌های ضروری رسیدن به روش‌های اصولی طراحی و چیدمان ساختمان‌های نیروگاه، بررسی نحوه چیدمان نیروگاه‌های طراحی و ساخته شده قبلی می‌باشد. فرضیه این مقاله بر این اساس است که با بررسی روند تکامل ساختمان‌های نیروگاه‌های هسته‌ای در طی زمان می‌توان به کاستی‌های طراحی در این دوره‌ها پی برد و به طرح مناسب چیدمان معماری ساختمان‌ها دست یافت. در واقع فعالیت‌های تئوری در کنار تجربیات ساخت یک نیروگاه می‌تواند ما را گام به گام به طرح‌های مناسب‌تر نیروگاهی نزدیک‌تر سازد. در این مقاله به دلیل گستردگی و تنوع ساختمان‌های تشکیل دهنده یک نیروگاه هسته‌ای به بررسی ساختمان‌های راکتور و توربین به عنوان بخشی

از این ساختار پیچیده پرداخته می‌شود. هدف از این مقاله رسیدن به طرح مناسب چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین به عنوان اصلی‌ترین ساختمان‌های یک نیروگاه هسته‌ای آب تحت فشار می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، بررسی‌های متعددی در رابطه با ساختمان‌های راکتور و توربین و نحوه چیدمان و قرارگیری این دو ساختمان نسبت به یکدیگر در بیست و نه واحد نیروگاهی در نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها صورت پذیرفته است که در نهایت منجر به ارائه الگو مناسب چیدمان معماری این ساختمان‌ها گردیده است.

۱-۲- روش تحقیق

به منظور رسیدن به یک نتیجه دقیق در ارتباط با روند تغییر و تحول چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین نسبت به یکدیگر در نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک تحت فشار، با توجه به اینکه طراحی حدود نیمی از نیروگاه‌های هسته‌ای جهان برپایه تکنولوژی شرکت وستینگهاوس می‌باشد، تمامی نمونه‌های موردی از نمونه کارهای این شرکت اقتباس گردیده است. بدین ترتیب روند تغییر و تحول چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین را حول تکنولوژی یک شرکت که خود پایه‌گذار طراحی نیمی از نیروگاه‌های PWR در دنیا می‌باشد و صرفاً از نمونه های ساخته شده در امریکا صورت پذیرفته است. فقط در دو نمونه موردی یعنی نیروگاهThree Mile Island و نیروگاه Palo Verde که نقطه عطفی در طراحی نیروگاه‌ها محسوب می‌شوند، طراحی شرکت جنرال الکتریک می‌باشند. به منظور مرور ادبیات فنی در روند تحقیق، ضوابط و الزامات نظام ایمنی جهت طراحی راکتورهای آب سبک پیشرفته معروف به URD[۴] بررسی گردیده است.

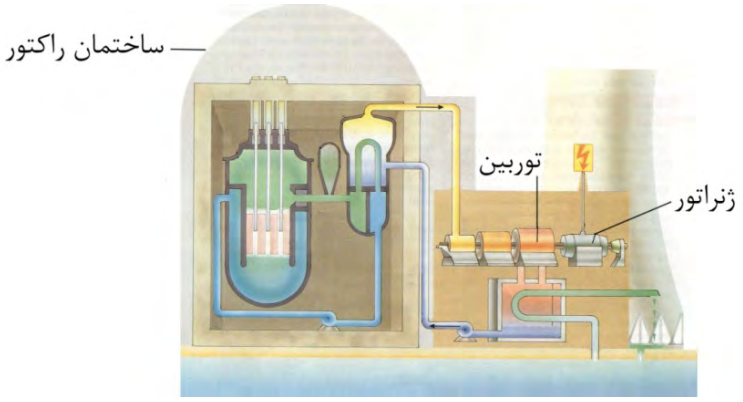
روش تحقیق در این مقاله به صورت توصیفی، ترسیمی - تحلیلی می باشد که بر اساس بهره‌گیری از کتب، مقالات و بر اساس روش مشاهداتی و بررسی بر روی فضاهای بسیار پیچیده هر نیروگاه بر مبنای نقشه هوایی و سایت های اینترنتی بوده است. بدین ترتیب که پس از انتخاب نمونه موردی، نقشه هوایی سایت پلان پیچیده مجموعه نیروگاه از سایت‌های اینترنتی برداشت شده و پس از بررسی تمام ساختمان‌های نیروگاه، چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین از سایت برداشت شده است. سپس از طریق یک روش تطبیقی و مقایسه‌ای تفاوت‌های چیدمانی نیروگاه‌های نسل‌های مختلف و دلایل این تفاوت بیان گردیده است. با توجه به اینکه ارائه همه نمونه‌ها از حوصله مقاله خارج است، در یک جدول گرافیکی مدل‌های استخراجی با توجه به نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها گردآوری و ارائه شده است. در نهایت با توجه به مطالعات و تجزیه و تحلیل صورت گرفته، نحوه چیدمان‌های مناسب و نامناسب ساختمان توربین نسبت به ساختمان راکتور ارائه گردیده است.

۲. نیروگاه‌های هسته‌ای PWR

نیروگاه‌های هسته‌ای با راکتور آب سبک تحت فشار (PWR) رایج‌ترین نوع نیروگاه هسته‌ای در دنیا می‌باشند. این نیروگاه‌ها دارای سه مدار اصلی بوده و از آب سبک به عنوان خنک‌کننده و کندکننده راکتور استفاده می‌نمایند. در مدار اولیه این نیروگاه‌ها از آب تحت‌فشار استفاده می‌گردد. آب تحت فشار در دمایی به مراتب بالاتر از آب معمولی به نقطه جوش می‌رسد. لذا می‌تواند با کسب دمایی بسیار بالا در حدود ۳۲۰ درجه سیلیسوس به نقطه جوش نرسیده و به بخار تبدیل نگردد. آب تحت فشار داغ شده درون مدار بسته اولیه جریان می‌یابد و در یک مبدل حرارتی گرمای خود را به مدار دوم که در آن آب معمولی جریان دارد انتقال می‌دهد. آب به بخار با دما و فشار بالا تبدیل و به سمت توربین هدایت می‌گردد. تا این قسمت از فرآیند در ساختمان راکتور که اصلی‌ترین ساختمان هر نیروگاه محسوب می‌گردد، صورت می‌پذیرد. لازم به یادآوری است که آب مدار اولیه که درون راکتور و میله‌های سوخت در حال گردش است و آب و بخار آب درمدار دوم که باعث چرخش توربین‌ها می‌گردد کاملاً از یکدیگر مجزا می‌باشند (Peterson P.F, 2009).

براثر برخورد بخار داغ به پره‌های توربین، انرژی حرارتی آن به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌گردد. با چرخش محور توربین، محور ژنراتور که به آن متصل است، به گردش در می‌آید و انرژی الکتریکی تولید می‌شود. (Wood A.J, 2000) بخار آب پس از چرخاندن توربین‌ها در چگالنده خنک شده و به مایع تبدیل می‌گردد و دو مرتبه به مولد بخار برمی‌گردد. توربین، ژنراتور و چگالنده در ساختمان توربین که دومین ساختمان مهم و بزرگ هر نیروگاه محسوب می‌گردد، قرار دارند. سیستم چگالنده به عنوان مدار سوم در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت چگالنده یک منبع پر از لوله‌های آب می‌باشد که بخار در تماس با این لوله‌ها سرد شده و تبدیل به مایع می‌شود. آب درون لوله‌های منبع چگالنده توسط یک منبع آبی نظیر رودخانه یا دریا تأمین می‌گردد و یا از برج‌های خنک‌کن استفاده می‌گردد. (هوشمند،۱۳۸۰: ۲۶۶-۲۷۴) بدین

ترتیب هر نیروگاه هسته‌ای PWR شامل دو ساختمان اصلی و شاخص می‌باشند که عبارتند از ساختمان راکتور و ساختمان توربین که در ادامه به توضیح هریک پرداخته می‌شود.



شکل ۱. فرآیند تولید برق در ساختمان‌های راکتور و توربین در یک نیروگاه هسته‌ای با آب تحت فشار

۲-۱- ساختمان راکتور

ساختمان راکتور که به‌عنوان پوشش ایمنی برای راکتور نیز عمل می‌کند ساختمانی است که در آن فرآیند شکافت هسته‌ای و تولید بخار صورت می‌پذیرد و به عنوان اصلی‌ترین ساختمان هر نیروگاه هسته‌ای شناخته می‌شود. این ساختمان جهت مقاومت در برابرخطرات بیرونی تهدید کننده ایمنی راکتور نظیر برخورد هواپیما، نیروی ناشی از طوفان‌ها و سایر پدیده‌های طبیعی و نیزخطرات داخلی نظیر فشارهای زیاد تولید شده درون پوشش ایمنی به واسطه ترکیدگی و یا سوراخ شدن لوله‌ها و کاهش فشار خنک‌کننده اولیه و یا از دست رفتن خنک‌کننده در مدار اولیه (حادثه LOCA[۵]) ساخته می‌شود. پوشش ایمنی ساختمان راکتور در برگیرنده تمامی روش‌ها، تمهیدات و سیستم‌هایی برای جلوگیری از انتقال یا پخش مقادیر غیر قابل قبول مواد پرتوزا از مرزهای مشخص شده حتی در صورت بروز حادثه می‌باشد. در واقع این ساختمان به عنوان سازه‌ای است که ما را از ایمنی نشت مواد رادیو اکتیو به محیط زیست مطمئن می‌سازد. ساختمان راکتور اولین بار در سال۱۹۵۳ برای راکتور آزمایشگاه‌های انرژی اتمی Knolls در West Milton و به‌تدریج در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید برق بکار گرفته شد. (British Energy, 2006).

۲-۲- ساختمان توربین

ساختمان توربین به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین ساختمان‌ها در هر نیروگاه هسته‌ای مطرح است. این ساختمان محل استقرار و تکیه‌گاهی برای ژنراتور، توربین، چگالنده و لوازم کمکی آن‌ها ایجاد می‌نماید. این لوازم کمکی عبارتند از: سیستم خنک‌کننده و منبع هیدروژن، سیستم خنک‌کننده استاتور، سیستم آب‌بندی روغن، سیستم کنترل الکتروهیدرونیک، محرک ژنراتور و سیستم آب‌بند بخار که به مانند لوازم وابسته به توربین ژنراتور به عنوان مثال گرمکن آب تغذیه، پمپ‌های آب تغذیه، سیستم تمیز کننده چگالنده و غیره می‌باشد (U.S. DOA, 2002).

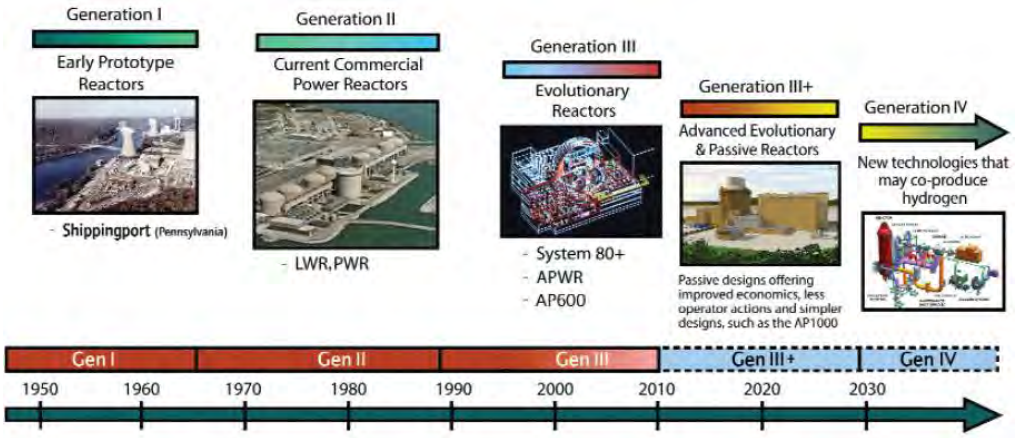
ساختمان توربین عموماً به فرم مکعب مستطیل در کنار ساختمان راکتور قرار می‌گیرد و محل قرار گیری آن نسبت به ساختمان راکتور به‌گونه‌ای است که فرآیند انتقال بخار و لوله کشی‌های مربوطه به صورت بهینه قرار گیرند و ایمنی ساختمان راکتور را حفظ کند.

۳. تقسیم‌بندی نیروگاه‌ها براساس نسل آن‌ها

نیروگاه‌های هسته‌ای به چهار نسل مطابق با شکل ۲ تقسیم می‌شوند که عبارتند از: (www.westinghousenuclear.com: 2013)

- نسل اول شامل اولین راکتورهای کوچک که نمونه‌های تکمیل شده آن‌ها در دهه ۱۹۵۰ با ظرفیت‌های زیر ۲۰۰MWe طراحی و ساخته شده‌اند و بسیاری از این راکتورها برچیده شده‌اند.
- نسل دوم شامل نیروگاه‌ها با راکتورهای بزرگتر با ظرفیت در حدود چند صد تا ۱۰۰۰ MWe که در بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۵ طراحی و ساخته شده‌اند. بسیاری از راکتورهای کنونی در حال بهره‌برداری از این نسل می‌باشند.
- نسل سوم شامل نیروگاه‌هایی با راکتورهایی که ساخت آن‌ها بعد ازسال۱۹۸۵به اتمام رسیده و الگوهای آماده‌ای برای پاسخگویی به تقاضاها و مصارف تجاری گردیده‌اند، می‌باشند.

- نسل بعلاوه سه (III+) شامل نیروگاه‌ها با راکتورهای جدید که به سیستم‌های پیشرفته مشهورند و در سال‌های اخیر در حال ساخت و راه‌اندازی و گسترش می‌باشند.



شکل ۲. تقسیم بندی نیروگاه‌ها براساس نسل آن‌ها (www.westinghousenuclear.com: 2013)

- نسل چهارم شامل نیروگاه‌ها با راکتورهایی هستند که اساساً با راکتورهای نسل‌های قبلی متفاوتند و طراحی و ایمنی آن‌ها ارتقاء یافته و اقتصادی‌تر نیز می‌باشند. با رویکرد فعلی انتظار گسترش آن‌ها تا سال ۲۰۳۰ یا بعدتر از آن می‌رود و امکان طرح‌های ابتکاری بسیاری را فراهم می‌نماید.

با توجه به تعدد نیروگاه‌های هسته‌ای در آمریکا فرآیند تغییرات نحوه چیدمان ساختمان راکتور و ساختمان توربین در نمونه‌های برجسته هر یک از نسل‌ها بررسی می‌گردد. نیروگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ خلاصه گردیده است. (World list of nuclear power plant, 2003: 41-67).

جدول ۱: نیروگاه‌های مورد بررسی در نسل‌های مختلف (ماخذ: نگارنده و خزانه، ۱۳۷۵ و U.S. Code of Federal Regulations, part 100)
*.W=Westinghouse, **.GE=General Electric

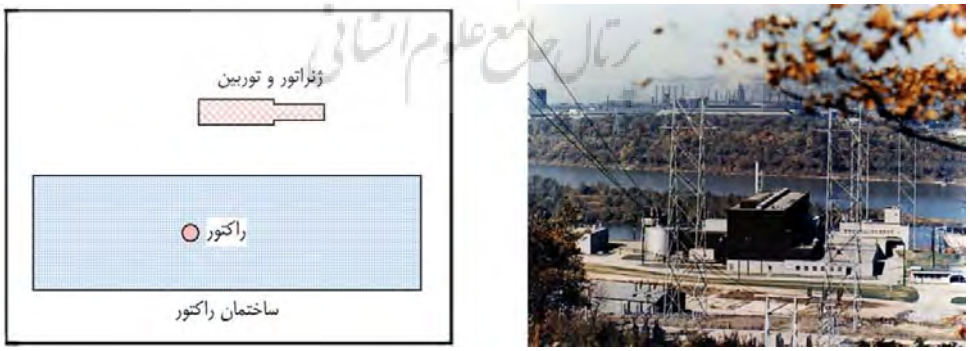
نسل نیروگاه	نیروگاه	ظرفیت الکتریکی (MWe)	نوع راکتور	شرکت سازنده راکتور	شروع ساخت	شروع بهره‌برداری
نسل اول	Shipping port	۶۰	PWR	W*	۱۹۵۴/۹	۱۹۵۷/۱۲
	Yankee Rowe	۱۶۷	PWR	W	۱۹۵۷/۱۰	۱۹۶۰/۸
	R.E. Ginna	۴۹۸	PWR	W	۱۹۶۶/۴	۱۹۶۹/۱۲
	Point Beach ۱	۴۸۵	PWR	W	۱۹۶۷/۷	۱۹۷۰/۱۲
	Point Beach ۲	۴۸۵	PWR	W	۱۹۶۸/۷	۱۹۷۲/۱۰
	Turkey point ۳	۶۹۳	PWR	W	۱۹۶۷/۴	۱۹۷۲/۱۱
	Turkey point ۴	۶۹۳	PWR	W	۱۹۶۷/۴	۱۹۷۳/۶
	Surry ۱	۷۸۱	PWR	W	۱۹۶۸/۶	۱۹۷۲/۱۲
	Surry ۲	۷۸۱	PWR	W	۱۹۶۸/۶	۱۹۷۳/۴
	Indian point ۲	۹۶۵	PWR	W	۱۹۶۶/۱۰	۱۹۷۳/۶
نسل دوم	Indian point ۳	۹۸۵	PWR	W	۱۹۶۸/۱۱	۱۹۷۶/۴
	Three Mile Island ۲	۷۹۲	PWR	GE**	۱۹۶۸/۵	۱۹۷۸/۱۲
	Beaver Valley ۱	۹۷۰	PWR	W	۱۹۷۰/۶	۱۹۷۶/۷
	Beaver Valley ۲	۹۲۰	PWR	W	۱۹۷۴/۵	۱۹۸۷/۸
	North Anna ۱	۹۲۵	PWR	W	۱۹۷۱/۲	۱۹۷۸/۴
	North Anna ۲	۹۱۷	PWR	W	۱۹۷۰/۱۱	۱۹۸۰/۸
	Salem ۱	۱۱۱۱	PWR	W	۱۹۶۸/۱	۱۹۷۶/۱۲
	Salem ۲	۱۱۲۹	PWR	W	۱۹۶۸/۱	۱۹۸۱/۶
	Diablo Canyon ۱	۱۰۸۷	PWR	W	۱۹۶۸/۸	۱۹۸۴/۱۱

	Diablo Canyon ۲	۱۰۸۷	PWR	W	۱۹۷۰/۱۲	۱۹۸۵/۱۰
	Watts Bar ۱	۱۱۲۱	PWR	W	۱۹۷۳	۱۹۹۶/۵
	South Texas ۱	۱۲۵۰	PWR	W	۱۹۷۵/۹	۱۹۸۸/۸
	South Texas ۲	۱۲۵۰	PWR	W	۱۹۷۵/۹	۱۹۸۹/۶
نسل سوم	Wolf Creek	۱۱۶۵	PWR	W	۱۹۷۷/۱	۱۹۸۵/۶
	Palo Verde ۱	۱۲۲۱	PWR	GE	۱۹۷۶/۵	۱۹۸۶/۱
	Palo Verde ۲	۱۲۲۱	PWR	GE	۱۹۷۶/۶	۱۹۸۶/۹
	Palo Verde ۳	۱۲۲۱	PWR	GE	۱۹۷۶/۶	۱۹۸۸/۱
	AP۶۰۰	۶۰۰	PWR	W	ساخته نشد	
نسل بعلاوه سه	AP۱۰۰۰	۱۰۰۰	PWR	W	درحال ساخت	

۳-۱- نیروگاه‌های نسل اول

نیروگاه‌های هسته‌ای نسل اول تولید برق توسط نخستین نمونه‌های راکتورها، طراحی و ساخته شده‌اند. اولین پروژه نیروگاه‌های نسل اول در امریکا، طراحی و ساخت نیروگاه هسته‌ای Shipping portبه قدرت MWe ۶۷ و قدرت حرارتی MW ۲۳۱ در Shipping port در ایالت پنسیلوانیا می‌باشد. کمیسیون انرژی اتمی آمریکا طراحی و ساخت این نیروگاه را به شرکت وستینگهاوس واگذار نمود. هدف از اجرای این طرح تولید انرژی برق، جمع‌آوری تجربه در زمینه سوخت تابش دیده، فیزیک راکتور، مسائل انتقال حرارت وآزمایش تجهیزات اصلی راکتور و نیروگاه بود. مدت بهره‌برداری از این نیروگاه در بین سال‌های ۱۹۵۷ الی ۱۹۷۴ یعنی به مدت ۱۷ سال بوده است. پس از ۶ سال بهره‌برداری آزمایشی از این نیروگاه قلب راکتور تعویض می‌شود و قدرت حرارتی آن به MW ۵۰۵ و قدرت الکتریکی آن به ۱۰۵MWe افزایش می‌یابد. بطور کلی کلیه ملاحظات ایمنی که امروزه جهت نیروگاه‌ها در جهان معمول است در ساخت این نیروگاه در نظر گرفته نشده است و تنها یک سیستم تزریق آب اضطراری، برای مقابله با حادثه قطع لوله‌های مدار اصلی آب پیش‌بینی شده است. این نیروگاه در ابتدا برای بارهای پایه استفاده می‌شد و اولین نیروگاه هسته‌ای برچیده شده در امریکا می‌باشد (www.nuclearstreet.com: 2013).

در این نیروگاه راکتور درون یک ساختمان با فرم مکعب مستطیل که در شکل ۳ با رنگ مشکی نمایان است، قرار می‌گیرد. لذا در اولین طراحی نیروگاه‌ها، ساختمان راکتور با مقطع استوانه - گنبدی شکل که در ساختمان نیروگاه‌های بعدی معمول می‌شود، وجود ندارد. تجهیزات توربین و ژنراتور نیز در فضای باز در کنار ساختمان راکتور و بدون پوشش ساختمانی قرار گرفته‌اند. چیدمان تجهیزات ژنراتور و توربین به صورت موازی نسبت به ساختمان راکتور و نزدیک به آن قرار گرفته‌اند.



شکل ۳. نیروگاه هسته‌ای Shipping port نمونه نسل اول نیروگاه‌ها (www.nuclearstreet.com: 2013)

۳-۲- نیروگاه‌های نسل دوم

نیروگاه‌های نسل دوم بر اساس ایده استفاده از راکتورهای تجاری قدرت، جهت تولید برق طراحی و ساخته شده‌اند. این نیروگاه‌ها در ابتدا به صورت یک واحد نیروگاهی مانند نیروگاه R.E.Ginna به قدرت MWe ۴۹۸ و در ادامه با ترکیب دو واحد نیروگاهی در کنار یکدیگر و یا دو واحد نیروگاهی به صورت مجزا ساخته

شدند. ساختمان توربین با فرم مکعب مستطیل در کنار ساختمان راکتور قرار دارد. (جدول ۳)

یکی از ابتداترین نیروگاه‌های دو واحدی نسل دوم، نیروگاه Point beach به قدرت ۴۸۵ MWe می‌باشد که درسال‌های ۷۲-۱۹۷۰ به بهره‌برداری رسید. این نیروگاه از آن جهت مورد توجه است که در آن ساختمان راکتور بالاخره شکل نهایی خود را پیدا می‌کند و به شکل استوانه‌ای با گنبد نیم‌کره تبدیل می‌گردد. دراین نیروگاه دو واحد راکتور در کنار هم شکل گرفته تا از برخی تجهیزات به صورت مشترک استفاده گردد و هزینه‌ها کاهش یابد. ساختمان توربین نیز به فرم مکعب مستطیل کشیده که هر دو توربین را در خود جای می‌دهد، در کنار دو ساختمان راکتور چیدمان گشته است (جدول ۳).

در همان زمان نیروگاه مشابه دیگری به نام Turkey Pointبه قدرت ۶۹۳ MWe درسال ۱۹۷۳ به بهره‌برداری می‌رسد، با این تفاوت که ساختمان توربین آن غیر مسقف بوده اما چیدمان آن نسبت به ساختمان راکتور مشابه نیروگاهPoint beach می‌باشد. (جدول ۳)

مشابه این نیروگاه‌ها، دو واحد نیروگاه Diablo Canyon به قدرت بالا در حدود ۱۰۸۷ MWe می‌باشدکه درسال‌های ۱۹۷۰-۱۹۶۸شروع به ساخت گردید و درسال-های ۸۵-۱۹۸۴ به بهره‌برداری رسید. دراین نیروگاه نیز دو واحد راکتور در کنار هم شکل گرفته‌اند. (شکل ۴) ساختمان توربین به صورت یک فرم مکعب مستطیل شکل یافته و نحوه چیدمان این ساختمان نسبت به ساختمان راکتور به‌گونه‌ای است که طول مستطیل در راستای ساختمان راکتور قرار دارند و لوله‌های بخار خروجی از ساختمان راکتور عمود بر طول مستطیل ساختمان توربین وارد آن می‌گردد (www.nrc.gov: 2013).

شکل ۴. نیروگاه هسته‌ای Diablo Canyon نمونه نسل دوم نیروگاه‌ها (www.nuclearstreet.com: 2013)

بزرگترین حادثه‌ای که در نیروگاه‌های هسته‌ای با راکتور آب تحت فشار در آمریکا رخ داده است مربوط به نیروگاه هسته‌ای واقع در جزیره سه مایلی[۶] در سال ۱۹۷۹ می‌باشد. این نیروگاه که به عنوان نیروگاه نسل دوم محسوب می‌شود، شامل دو ساختمان راکتور با مقطع استوانه‌ای شکل و دو ساختمان توربین به فرم مکعب مستطیل شکل می‌باشد. در هر دو واحد، ساختمان توربین به گونه‌ای نسبت به ساختمان راکتور قرار گرفته که صفحات عمود برمحور توربین ژنراتور با سازه راکتور تقاطع دارند (شکل ۵).

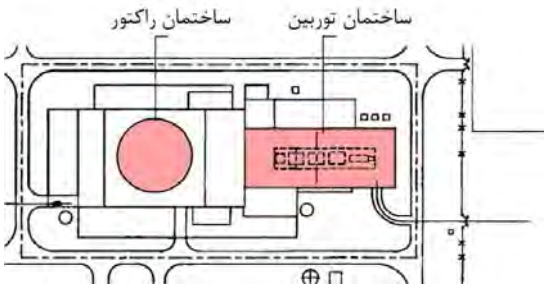
شکل ۵. نیروگاه هسته‌ای Three mile Island نمونه نسل دوم نیروگاه‌ها (www.nuclearstreet.com: 2013)

۳-۳- نیروگاه‌های نسل سوم

نیروگاه‌های هسته‌ای PWR نسل سوم معروف به نیروگاه‌های پیشرفته آب سبک به منظور تأمین نیازهای برق در جهان طراحی و توسعه یافته‌اند. در ساخت این راکتورها از تمامی درس‌های آموخته شده در بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای نسل‌های قبلی، بهره گرفته شده است. این راکتورها به‌گونه‌ای ایمن‌تر، اقتصادی‌تر و با سوخت بهینه‌تر نسبت به نیروگاه‌های قبلی طراحی شده‌اند. از اوایل دهه ۸۰ یک بازبینی اساسی نسبت به تکنولوژی پایه توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، موسسه‌ها و شرکت‌های تولید انرژی برق در آمریکا، روسیه و اروپا با هدف پایین آوردن احتمال آسیب به قلب راکتور به کمتر از 10^{-5}و برای سال‌های بعد از ۲۰۰۰ به کمتر 10^{-6} راکتور در سال انجام گرفت و این تحقیقات در سال ۱۹۸۵ با نامURD به چاپ رسید. (خزانه، ۱۳۷۵)

اصول کلی طراحی با توجه به این تحقیقات عبارتند از اجتناب از پیچیدگی، سهولت استفاده برای اپراتورها، رعایت دستورالعمل‌های بهره‌برداری و نگهداری، کاهش وابستگی به اقدام سریع اپراتور، به حداقل رساندن احتمال یک عامل پرمخاطره برای بروز حادثه و کاهش نتایج وخیم آن، حفاظت کافی علیه خرابکاری، از نظر دور داشتن عوامل غیر مطمئن در تحلیل ایمنی براساس احتمالات و در نظر گرفتن سیستم‌های محدود کننده که بتواند با فشار و درجه حرارت بالای یک حادثه بزرگ مقابله کند. از تحقیقات بعمل آمده مشخص گردید که ساختمان توربین ژنراتور می‌باید طوری قرار گیرد که هر صفحه عمود بر محور ژنراتور توربین با سازه ساختمان راکتور تقاطع نداشته باشد. به این ترتیب احتمال برخورد موشک‌وار پره‌های توربین به سازه ساختمان راکتور به حداقل برسد.

در نسل سوم نیروگاه‌های PWR در آمریکا دو تیپ راکتور یکی با نام سیستم +۸۰ که تجاری سازی گردید اما فروش و طراحی آن به صورت محدود ادامه یافت و دیگری AP600 توسط شرکت وستینگهاوس طراحی و مجوزهای لازم را در سال ۱۹۹۹ از NRC دریافت کرد.



شکل ۶. طرح پیشنهادی URD جهت چیدمان قرارگیری ساختمان‌های توربین و راکتور نسبت به یکدیگر (URD, 1999: 6,4-78)

سیستم +۸۰ یک ویرایش توسعه یافته از سیستم راکتور می‌باشد. طرح این سیستم توسط مشارکت دو شرکت ABBوCombustion Engineering در چهارچوب طرح راکتورهای آب سبک پیشرفته صورت پذیرفت. در این سیستم احتمال آسیب به قلب 6×10^{-7} راکتور در سال کاهش یافته است. ویژگی‌های این سیستم عبارتند از:

- ایمنی ذاتی در طراحی
- قدرت بالای تولید برق در حدود ۱۳۵۰MWe

سه واحد نیروگاهی به قدرت ۱۲۲۱ MWe در Palo Verdeدر ایالت آریزونا در آمریکا با این نوع سیستم در سال‌های ۸۸-۱۹۸۶ به بهره‌برداری رسید. نیروگاه هسته‌ای Palo Verde جزء نسل سوم نیروگاه‌ها و بزرگترین نیروگاه در آمریکا محسوب می‌شود و از سه واحد تشکیل یافته، هر واحد دارای یک ساختمان راکتور با مقطع استوانه‌ای و یک سالن توربین به فرم مکعب مستطیل که در راستای ساختمان راکتور قرارگرفته و احتمال برخورد موشک‌وار پره‌های توربین با ساختمان راکتور به حداقل رسیده است. (www.en.wikipedia.org: 2013)

شکل ۷. نیروگاه هسته‌ای Palo Verde نمونه نسل سوم نیروگاه‌ها (www.en.wikipedia.org: 2013)

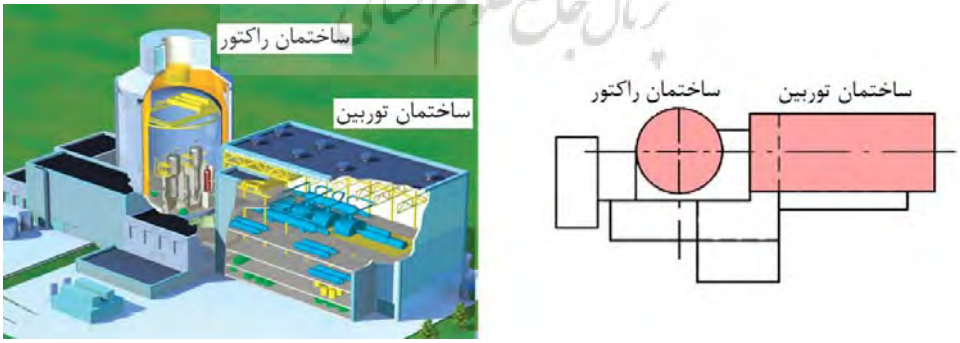
AP600 یک نیروگاه با راکتور آب تحت فشار پیشرفته با قدرت ۶۰۰ MWe تحت طراحی شرکت وستینگهاوس است که ساده‌تر و ایمن‌تر از نیروگاه‌های آب سبک مشابه تا آن زمان می‌باشد. این نیروگاه دارای طراحی مدولار و اکثر تجهیزات آن در کارخانه ساخته و در سایت با سرعت بالا مونتاژ می‌گردد و سبب کاهش قیمت تمام شده برق می‌گردد. ساختمان و مدار اولیه AP600 شبیه نیروگاه‌های متعارف می‌باشد، اما با تفاوت‌های جالب توجه که ایمنی و سادگی تعمیرات را ارتقاء می‌دهد.

در طراحی نیروگاه‌های نسل سوم از نوآوری‌ها و تغییرات بنیادی استفاده شده و بکارگیری هرچه بیشتر سیستم‌های غیرفعال[۷] بجای سیستم‌های فعال[۸]، بخصوص برای تاسیسات ایمنی، صورت گرفته است. در حقیقت بزرگترین تغییر ایجاد شده در راکتورهای نسل سوم، استفاده از سیستم‌های ایمنی غیر فعال می‌باشد. در راکتورهای پیشین بر روی عملکرد بهره‌بردار به‌عنوان تاثیرگذارترین عملکرد در رویارویی با شرایط و رخدادهای ناگهانی و غیرطبیعی بسیار حساب می‌شد. اما در راکتورهای پیشرفته از سیستم‌های غیرفعال و ذاتی استفاده می‌شود که نیازی به مداخله بهره‌بردار در مواقع خرابی نیست. سیستم غیر فعال، در مقابل سیستم فعال که نیاز به نیروی محرکه خارجی دارد، به سیستمی گفته می‌شود که در آن فرآیند مورد نظر بدون استفاده از نیروی محرکه خارجی نظیر موتور، پمپ و غیره انجام گیرد. در این سیستم از خواص فیزیکی داخل سیستم مثل گردش آب در اثر اختلاف درجه حرارت، شتاب ثقل زمین یا نیروی جاذبه، جابجایی طبیعی، مقاومت در برابر حرارت‌های بالا و جانمایی صحیح ساختمان‌ها نسبت به یکدیگر استفاده می‌شود.

۳-۴- نیرو گاه‌های نسل بعلاوه سه (+III)

هر چند در آمریکا بعد از سال ۱۹۹۶ تا کنون هیچ نیروگاهی ساخته و به بهره‌برداری نرسیده است اما شرکت‌های این کشور هم‌چنان به تحقیق، توسعه و طراحی سیستم‌های پیشرفته نیروگاهی برای فروش در همان کشور و یا سایر نقاط جهان پرداختند و نیروگاه AP1000 به عنوان یک نیروگاه پیشرفته آب سبک طراحی گردید. AP1000 یک ویرایش بزرگتر از AP600 است که آخرین تائیدیه‌های طراحی را در سال ۲۰۰۵ از کمیسیون نظام ایمنی امریکا گرفته است. (U.S. Department of Energy, 2003)

نیروگاه AP1000 براساس رسیدن به راه حلی بسیار منطقی و بهینه چه از نظر فنی و تکنیکی و چه از نظر اقتصادی طراحی گردیده است. طراحی این نیروگاه براساس تکنولوژی‌های تجربه و تائیدشده نیروگاه‌های قبلی PWR می‌باشد. این نیروگاه ویژگی‌های ایمنی بسیار بالایی دارد به‌گونه‌ای که در مواقع و حوادث بسیار خطرناک نیازی به عملکرد بهره‌بردار یا قطع جریان مستقیم جهت خاموش‌سازی و دفع گرمای باقیمانده نمی‌باشد. تمام ساختارها و ساختمان‌های این نیروگاه بالاترین حد اطمینان برای فرآیند اصلی که به آنها محول گردیده را دارند و در موقعیت‌های پرتوزایی به خوبی مقاومت می‌کنند. این نیروگاه ظاهر بیرونی خوبی از نظر معماری دارد و بسیار بادوام و اقتصادی می‌باشد. چیدمان ساختمان توربین با فرم مکعب مستطیل به صورت شعاعی در راستای ساختمان راکتور با مقطع استوانه‌ای قرار دارد.



شکل ۸. راست: سایت پلان ، چپ: دید هوایی نیروگاه هسته‌ای AP1000 نمونه نسل بعلاوه سه نیروگاه‌ها
(www.ap1000.westinghousenuclear.com : 2013)

۳-۵- نیروگاه‌های نسل چهارم

در سال‌های اخیر تحقیقات و مطالعات فراوانی بر روی نسل چهارم نیروگاه‌ها درکشورهای پیشرفته صورت می‌پذیرد و بنا به پیش‌بینی‌ها امکان ساخت این نیروگاه‌ها تا سال ۲۰۳۰ مهیا می‌گردد. (International Atomic Energy

(Agency, 2003) تـاکنون مـدرکی کـه جهـت قرارگیـری ساختمان‌های اصلی ایـن نـوع نیروگـاه را بیـان کنـد انتشـار نیافته است. لذا امکان مقایسه چیـدمان سـاختمان راکتـور و ساختمان توربین بـا نیروگـاه‌هـای قبلـی نمـی‌باشـد. بیشـتر تحقیق‌ها معطوف به طراحی راکتور این نیروگاه‌ها بوده اسـت و ویژگی آن‌ها نسبت به راکتورهای قبلـی تغییـرات اساسـی کـرده اسـت و ویژگـی‌هـای مهمـی نظیـر ایمنـی، اقتصـاد، جلوگیری از گسترش جنگ افزارهای اتمی، سوخت بهینـه و کاهش پسـمان را در طراحـی راکتورهـا درنظـر مـی‌گیرنـد. (U.S. Code of Federal Regulations, part 50)

۴. پرتابه‌های موشک‌وار در نیروگاه‌های هسته‌ای

ساختارها و تجهیزات مرتبط با ایمنی در ساختمان‌های نیروگاه، می‌باید به گونـه ای طراحـی گردنـد کـه در برابـر برخورد پرتاب‌های موشک‌وار محافظت گردند. این امر بدان دلیـل اسـت کـه برخـورد هـر نـوع پرتابـه موشـک‌وار بـا ساختارهای مرتبط با ایمنی نظیر ساختمان راکتور می‌تواند خطرات و رخدادهای شدید و غیر متعارفی را بوجود آورد.

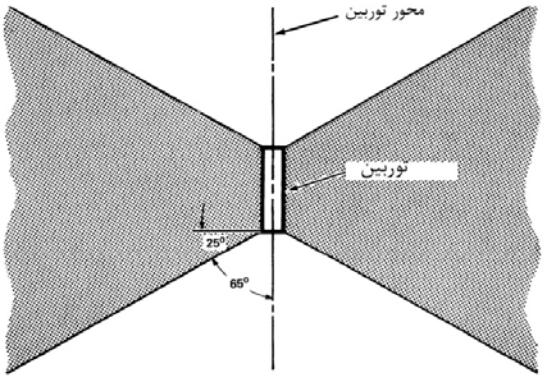
پرتابه‌های موشک‌وار در نیروگاه‌های هسـته‌ای بـه سـه دسته پرتابه‌های موشک‌وار حاصل از پدیـده‌هـای طبیعـی، پدیـده‌هـای محیطـی و پرتابـه‌هـای بـا سرمنشـاء خرابـی تجهیزات نیروگاهی تقسـیم‌بنـدی مـی‌شـوند. پرتابـه‌هـای طبیعی براثر باد و طوفان‌های شدید حاصل مـی‌گردنـد امـا پرتابه‌های محیطی براثر برخورد هواپیما حاصل مـی‌گردنـد. پرتابه‌های با سر منشاء خرابی تجهیـزات نیروگـاهی شـامل پرتاب شدن سوپاپ شیرهای بخار و سرپوش شـیرها براثـر خرابی در سیستم‌های سیال پر انرژی و پرتابه‌های پره‌هـای صدمه خورده توربین و خرابی دیگر وسایل دوار مـی‌باشـد. (Westinghouse, 1984) ایـن پرتابـه‌هـا در سـایزها، و وزن‌ها و سرعت‌های متفاوت حاصل می‌شـوند کـه شـدت و سرعت مهم ترین آنها در جدول ۲ بیان گردیده است.

جدول ۲: شدت و سرعت پرتابه های موشک‌وار در نیروگاه (Stevenson J.D, 1980)

پرتابه موشک‌وار		وزن (کیلوگرم)	منطقه تحت تاثیر (مترمربع)	سرعت (متر به ثانیه)	سرعت (کیلومتر به ساعت)	انرژی جنبشی (متر نیوتن)
سوپاپ شیر		۲۳	۰/۰۰۳	۲۷	۹۷	۸۵۵۵
سرپوش شیر		۴۵۴	۰/۰۹	۷۹	۲۸۴	۱۴۶۹۰۰۰
توربین سرعت پایین	سنگین	۳۷۲۰	۰/۵۸	۱۲۸	۴۶۱	۳۰۶۰۰۰۰
	متوسط	۱۸۶۰	۰/۳۶	۱۶۲	۵۸۳	۲۴۴۸۰۰۰
	سبک	۹۰	۰/۰۴	۲۴۴	۸۷۸	۲۷۲۰۰۰
توربین سرعت بالا	سنگین	۳۷۲۰	۰/۵۸	۱۹۸	۷۱۳	۷۳۱۶۸۰۰۰
	متوسط	۱۸۶۰	۰/۳۶	۲۳۵	۸۴۶	۵۱۲۷۲۰۰۰
	سبک	۹۰	۰/۰۴	۲۹۹	۱۰۷۶	۴۰۸۰۰۰۰

پرتابه‌های موشک‌وار بدنه‌ها و روزنه‌های ساختارها را مورد تهدید قرار مـی‌دهـد و در مـوارد خـاص مـی‌تواننـد صـدمات شدیدی را ایجاد نماید و موجب تخریب ساختارها و تجهیزات مرتبط با ایمنی گردد. با توجه به مقایسه اثر پرتابه‌ها در جدول می‌توان نیتجه‌گرفت که پرتابه‌های موشک‌وار قطعات سـنگین توربین حاصل از خرابی توربین سرعت بالا که با سـرعت ۱۹۸ متر به ثانیه (۷۱۳ کیلومتر به ساعت) رها می‌گـردد از انـرژی فوق‌العاده بالایی (۷۳۱۶۸۰۰۰ متر نیوتن) در مقایسه با سـایر پرتابه‌ها برخوردار بوده و لذا جانمایی توربین بـا لحـاظ کـردن امکان برخورد پرتابه‌هـای موشـک‌وار تـوربین بـا سـاختارها و تجهیزات مرتبط با ایمنی بسـیار اهمیـت دارد و مـی‌توانـد در جانمایی ساختمان توربین نسبت به سـاختمان راکتـور تـاثیر کلیدی داشته باشد.

یکی از کم هزینه ترین راه‌هـای حفاظـت از سـاختمان راکتور در برابر پرتابه‌های موشک‌وار توربین، انتخاب محل و جهت مناسب قرارگیری توربین نسبت به ساختمان راکتـور می‌باشد. در صورت خرابی توربین به هر دلیـل نقـص فنـی پرتابه‌های موشـک‌وار آن حـداکثر در بـازه بـین زاویـه ۲۵ درجه نسبت به محور عمود بر محور طولی توربین براساس شکل ۹ پرتـاب مـی‌گردنـد. (Lee k.: 2009, p.133) لـذا طراح معمار با جانمایی مناسـب تـوربین بـه گونـه ای کـه ساختمان راکتور در خارج بازه زاویه برخورد بین موشک‌وار پره‌های توربین قرار گیـرد، مـی‌توانـد از برخـورد پـره‌هـای توربین به ساختمان راکتور جلوگیری نماید.



شکل ۹. پرتابه‌های موشک‌وار توربین در بین بازه زاویه ۲۵ درجه نسبت به محور عمود بر محور طولی توربین رها می‌گردند.
(U.S. Nuclear Regulatory commission, 2012)

۵. بحث و تحلیل چیدمان ساختمان راکتور و توربین

بر اساس بررسی سایت پلان بیست و نه واحد نیروگاهی به عنوان نمونه های موردی مطرح ، چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین در نسل‌های مختلف نیروگاه‌های هسته‌ای که تمامی نسل‌های نیروگاه‌های آب سبک تحت فشار را شامل می‌شوند، طبق جدول ۳ برداشت و ترسیم گردیده است. با بررسی و تحلیل جدول مذکور، روند تغییر و تحول ساختمان راکتور و ساختمان توربین شامل فرم و نحوه چیدمان و قرارگیری آن‌ها نسبت به یکدیگر در نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها می‌توان نکات زیر را بیان نمود.

در نیروگاه‌های نسل اول، ساختمان مستقلی برای راکتور در نظر گرفته نشده و راکتور درون یک فرم مکعب مستطیل که فاقد پایداری ذاتی در برابر حوادث وخیم داخلی و خارجی می‌باشد، قرار داده شده و توربین و ژنراتور در فضای باز و بدون پوشش قرار دارند.

در نیروگاه‌های نسل دوم ساختمان راکتور به عنوان اصلی‌ترین ساختمان نیروگاه مورد توجه ویژه قرار گرفته است و فرم استوانه‌ای آن با گنبدی نیمکره که از نظر ساختاری و ذاتی پایداری خوبی در برابر حوادث داخلی و خارجی دارد، برای آن در نظر گرفته شده است. توربین، ژنراتور و ملحقات آن نیز درون یک سالن مکعب مستطیل با پوشش کامل قرار گرفته‌اند به‌گونه‌ای که طول مستطیل عمود بر راستای خروج لوله‌های بخار از ساختمان راکتور قرار دارد. در این نسل بنا به مسائل اقتصادی دو واحد راکتور در یک نیروگاه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تا از برخی تجهیزات به صورت مشترک استفاده گردد و هزینه‌ها کاهش یابد.

در نیروگاه‌های نسل سه ایمنی ذاتی ساختمان راکتور بالاتر می‌رود و از سیستم‌های غیر فعال جهت بالا بردن ایمنی ذاتی راکتور استفاده می‌نماید و احتمال آسیب به قلب راکتور بسیار کاهش می‌یابد. چیدمان ساختمان توربین نسبت به ساختمان راکتور اصلاح می‌شود و به طوری قرار می‌گیرد که طول مستطیل در راستای لوله‌های بخار قرار گیرد و در ضمن هر صفحه عمود بر محور ژنراتور توربین با سازه راکتور تقاطع ندارد و بدین ترتیب احتمال اصابت پرتابه‌های موشک‌وار پره‌های توربین به ساختمان راکتور کاهش می‌یابد. این چیدمان هم‌چنین در نیروگاه‌های نسل بعلاوه سه به عنوان جدیدترین و پیشرفته‌ترین نیروگاه‌های دنیا بکار گرفته می‌شود.

جدول ۳. چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین در نسل‌های مختلف نیروگاه‌های مورد بررسی (نگارنده)

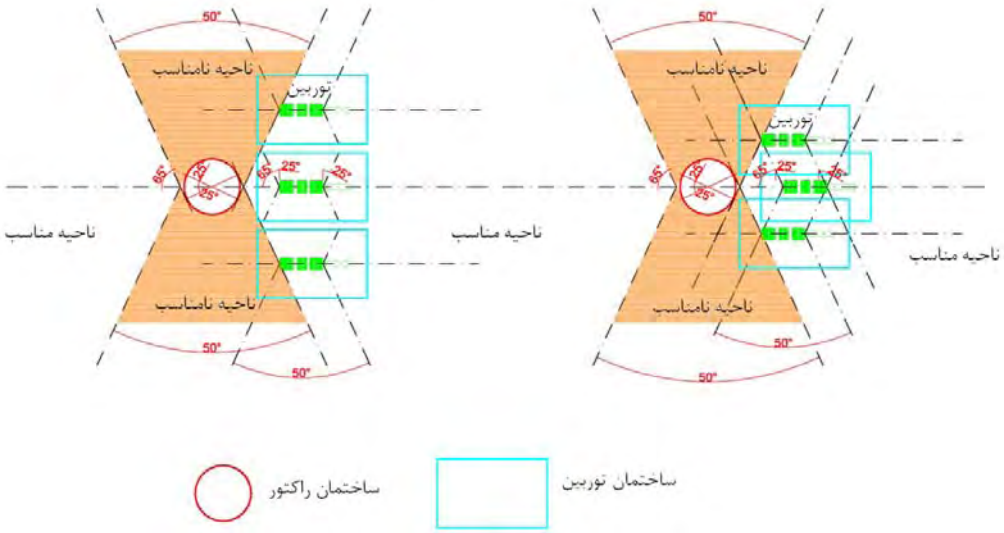
نسل نیروگاه	نیروگاه	ظرفیت الکتریکی (MWe)	شروع ساخت	شروع بهره-برداری	چیدمان ساختمان راکتور و ساختمان توربین
نسل اول	port Shipping	۶۰	۱۹۵۴/۹	۱۹۵۷/۱۲	
	Yankee Rowe	۱۶۷	/۱۰ ۱۹۵۷	۱۹۶۰/۸	
	R.E. Ginna	۴۹۸	۱۹۶۶/۴	۱۹۶۹/۱۲	
نسل دوم	۱ Point Beach	۴۸۵	۱۹۶۷/۷	۱۹۷۰/۱۲	
	۲ Point Beach	۴۸۵	۱۹۶۸/۷	۱۹۷۲/۱۰	
	Turkey point 3	۶۹۳	۱۹۶۷/۴	۱۹۷۲/۱۱	
	Turkey point 4	۶۹۳	۱۹۶۷/۴	۱۹۷۳/۶	
	۱Surry	۷۸۱	۱۹۶۸/۶	۱۹۷۲/۱۲	
	۲Surry	۷۸۱	۱۹۶۸/۶	۱۹۷۳/۴	

	Indian point 2	۹۶۵	۱۰/ ۱۹۶۶	۱۹۷۳/۶
	Indian point 3	۹۸۵	۱۱/ ۱۹۶۸	۱۹۷۶/۴
	Three Mile Island 2	۷۹۲	۱۹۶۸/۵	۱۹۷۸/۱۲
	Beaver Valley 1	۹۷۰	۱۹۷۰/۶	۱۹۷۶/۷
	Beaver Valley 2	۹۲۰	۱۹۷۴/۵	۱۹۸۷/۸
	۱North Anna	۹۲۵	۱۹۷۱/۲	۱۹۷۸/۴
	۲North Anna	۹۱۷	۱۱/ ۱۹۷۰	۱۹۸۰/۸
	Salem 1	۱۱۱۱	۱۹۶۸/۱	۱۹۷۶/۱۲
	Salem 2	۱۱۲۹	۱۹۶۸/۱	۱۹۸۱/۶
	Diablo Canyon 1	۱۰۸۷	۱۹۶۸/۸	۱۹۸۴/۱۱
	Diablo Canyon 2	۱۰۸۷	۱۲/ ۱۹۷۰	۱۹۸۵/۱۰
	Watts bar	۱۱۲۱	۱۹۷۳	۱۹۹۶/۵
	South Texas 1	۱۲۵۰	۱۹۷۵/۹	۱۹۸۸/۸
نسل سوم	South Texas 2	۱۲۵۰	۱۹۷۵/۹	۱۹۸۹/۶
	Wolf Creek	۱۱۶۵	۱۹۷۷/۱	۱۹۸۵/۶
	Palo Verde 1	۱۲۲۱	۱۹۷۶/۵	۱۹۸۶/۱
	Palo Verde 2	۱۲۲۱	۱۹۷۶/۶	۱۹۸۶/۹
	Palo Verde 3	۱۲۲۱	۱۹۷۶/۶	۱۹۸۸/۱
نسل بعلاوه سه	AP1000	۱۰۰۰		

۵-۱- ارائه الگوی مناسب چیدمان ساختمان راکتور و توربین

با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها، چیدمان ساختمان توربین نسبت به ساختمان راکتور، تحت تاثیر عوامل مؤثر متعددی نظیر بهینه کردن میزان لوله‌کشی‌های آب تغذیه و بخار اصلی و حفاظت از ساختمان راکتور در برابر پرتابه‌های موشک‌وار توربین می‌باشد. برای بهینه کردن میزان لوله‌کشی‌های آب تغذیه و بخار اصلی از ساختمان راکتور به توربین می باید در طراحی فاصله ابتدای توربین نسبت به ساختمان راکتور به حداقل برسد. در ضمن ااگر به هر دلیل نقص افنی پره‌های توربین از محور توربین جدا گردند می‌توانند با سرعت پرتابی بالای خود به عنوان یک پرتابه موشک‌وار عامل تهدیدکننده ایمنی ساختمان راکتور و نیروگاه باشند.

یکپارچگی روتور توربین احتمال تولید پرتابه‌های موشک‌وار توربین را کاهش می‌دهد و نیز جهت‌گیری مطلوب و مناسب محور توربین ژنراتور نیز می‌تواند پتانسیل بالقوه برخورد موشک‌وار پرتابه‌ها نسبت به سازه‌ها و تجهیزات مرتبط با ایمنی نظیر ساختمان راکتور را از بین ببرد. لذا ساختمان توربین می‌باید طوری قرار گیرد که هر صفحه عمود بر محور توربین و در بازه زاویه ۲۵ درجه نسبت به محور عمود بر محور طولی توربین با سازه ساختمان راکتور تقاطع نداشته باشد و بدین ترتیب احتمال برخورد موشک‌وار پره‌های توربین به سازه ساختمان راکتور به حداقل برسد. شکل ۱۰، نحوه چیدمان‌های مناسب و نامناسب ساختمان‌های راکتور و توربین را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. چیدمان‌های مناسب و نا مناسب ساختمان‌های راکتور و توربین (نگارنده)

۶. نتیجه‌گیری

در تشریح نسل‌های مختلف نیروگاه‌های PWR و با بررسی دو ساختمان اصلی راکتور و توربین ژنراتور مشخص می‌گردد که در روند توسعه این نیروگاه‌ها مسئله ایمنی به عنوان اساسی‌ترین موضوع در طی زمان مورد توجه قرار گرفته است و فرم و چیدمان این دو ساختمان را تحت تاثیر قرار داده است.

در نسل اول نیروگاه‌ها راکتور درون یک ساختمان با فرم مکعب مستطیل که فاقد پایداری ذاتی در برابر حوادث وخیم داخلی و خارجی می‌باشد، قرار می‌گرفته است. ساختمان راکتور در نیروگاه‌های نسل دوم و بعد از آن شکل کنونی خود یعنی استوانه‌ای بتنی با سقف گنبدی نیم‌کره را پیدا می‌کند. فرم استوانه‌ای با گنبدی نیمکره از نظر ذاتی پایداری سازه‌ای خوبی نسبت به سایر فرم‌های معماری در برابر حوادث داخلی و خارجی دارد.

توربین، ژنراتور و تجهیزات وابسته به آن نیز در نسل اول بصورت روباز در کنار ساختمان راکتور قرار دارد و در نسل‌های بعدی درون یک ساختمان مکعب مستطیل با پوشش کامل قرار می‌گیرند.

با ترسیم چیدمان دو ساختمان راکتور و توربین در نمونه‌های موردی و با تجزیه و تحلیل الگوی مناسب چیدمان این دو ساختمان نسبت به یکدیگر، مشخص می‌گردد که چیدمان ساختمان‌های راکتور و توربین به منظور بالا بردن ایمنی و کارکرد نیروگاه به صورت مداوم همواره در نسل‌های مختلف نیروگاه‌ها بهبود و تکامل یافته است. بطوریکه در نیروگاه Yankee Rowe از نسل اول و تمامی نیروگاه‌های دوم ساختمان مکعب مستطیل شکل توربین عمود بر راستای خروج لوله‌های بخار از ساختمان راکتور قرار می‌گیرد. ولیکن در نیروگاه‌های نسل سه به منظور بالا بردن ایمنی نیروگاه چیدمان ساختمان توربین نسبت به ساختمان راکتور اصلاح می‌شود و طوری قرار می‌گیرد که طول مستطیل ساختمان راکتور در راستای خروج لوله‌های بخار قرار گیرد و در ضمن هر صفحه عمود بر محور توربین ژنراتور با سازه ساختمان راکتور تقاطع ندارد. بدین ترتیب با ارتقای طراحی نیروگاه، احتمال اصابت پرتابه‌های موشک‌وار پره‌های توربین به ساختمان راکتور کاهش می‌یابد و ایمنی نیروگاه افزایش می‌یابد.

به منظور کاهش هزینه‌های طراحی و کاهش ریسک در نیروگاه‌ها اغلب نیروگاه‌های راکتور آب سبک تحت فشار در دنیا بر اساس طراحی تا حدودی یکسان شکل می‌یابند. لذا ویژگی‌های کلیدی در طراحی نیروگاه‌ها شامل چیدمان مناسب ساختمان‌ها همواره مد نظر قرار گرفته است و با توجه به پیچیدگی ساختمان‌های نیروگاه، شناخت ایده‌های کلی چیدمان ساختمان‌های اصلی نظیر ساختمان راکتور و توربین بسیار حائز اهمیت می‌باشد و می‌تواند کمک شایان توجهی به بالا بردن دانش فنی طراحی و ایمنی نیروگاه‌های کشورمان بنماید.

پی نوشت

1. Billion kilowatt-hours
2. Pressurized Water Reactor

۳. Westinghouse یکی از بزرگترین شرکت‌های طراح و سازنده نیروگاه‌های آب سبک تحت فشار در دنیا می‌باشد.

۴. ضوابط و الزامات نظام ایمنی جهت طراحی راکتورهای آب سبک پیشرفته با نـام Utility Requirement Document (URD) در سـال ۱۹۸۵ در سه جلد تدوین گردید.

5. Loss Of Coolant Accident
6. Three mile Island

۷. systems Passiveشامل سیستم‌های ایمنی است که به صورت خودکار و بدون نیاز به برق در حوادث به کار می‌افتند.

۸. Active systems شامل سیستم‌های ایمنی است که به وسیله انرژی برق در حوادث به کار می‌افتند.

فهرست منابع

۱. خزانه، رضا (۱۳۷۵). راکتورهای آب تحت فشار، انتشارات سازمان انرژی ایران.

۲. هوشمند، رحمت‌اله (۱۳۸۰). تولید برق در نیروگاه‌ها، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، صص. ۲۶۶-۲۷۴.

- British Energy (2006). How a PWR power station works, British Energy Group.
- DOE/NE-0088, the history of Nuclear Energy, U.S Department of energy, Office of Nuclear energy, Science and technology.
- Dubrovsky VB, Levdansky PA, Neshumov FS (1979). Construction of Nuclear Power Plant, Mir publishers, Moscow, p. 134.
- Goswami DY, Kreith F (2008). Energy conversion, CRC press, USA, pp. 16-8-16-9.
- International Atomic Energy Agency (2003). Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series, No. 2, Vienna, IAEA.
- Lee K, Lee J (2013). A new design concept for offshore nuclear power plants with enhanced safety features, Nuclear Engineering and Design 254, pp. 129–141, Available at: www.elsevier.com/locate/nucengdes.
- NRC. General design criteria for nuclear power plants, U.S. Code of Federal Regulations, Energy, Title 10, Appendix A to Part 50, Available at: www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-appa.html (Oct. 2015).
- Peterson PF (2009). Nuclear Energy: Future Directions, University of California, Berkeley.
- Stevenson JD (1980). Structural analysis and design of nuclear plant facilities, Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structure Division of ASCE, NY, pp. 86-88.
- URD (1999). Advanced light water reactor utility requirements document, Volume II, ALWR evolutionary plant, revision 8, Chapter 6, Electric Power Research Institute, pp. 6.4-80 to 87 and Figure 6.C.2-1.
- U.S. Code of Federal Regulations, Energy, Title 10, Part 100.
- U.S. Department of Energy (2003). Nuclear Power 2010-Overview, Office of Nuclear Energy Science and Technology.
- U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (2002). A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, Report.
- U.S. Nuclear Regulatory commission (2012). Protection against turbine missiles, Regulatory guide RG 1.115, Revision 2, available at: http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections (Oct. 2015)
- Westinghouse (1984). The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant, Pittsburgh, PA, pp. 183-191.
- Wood AJ, Wollenberg BF (1996). Power generation, Operation, and control, John Wiley & Sons, Inc., NY, Second edition, pp. 328-329.
- World List of Nuclear Power Plants (2003). Nuclear News 46, No. 3, pp. 41-67.
- http://www.nrc.gov (Feb. 2013).
- http://google.maps.com (May 2013).
- http://nuclearstreet.com/nuclear-plants/ (Feb. 2013).
- http://www.westinghousenuclear.com/index.html (May. 2013).
- http://ap1000.westinghousenuclear.com/index.html (May. 2013).
- http://www.nrc.gov/reactors/operating/list-power-reactor-units.html (May. 2013).
- http://www.nei.org/resourceandstats/nuclear_statistics/usnuclearpowerplants (Mar. 2013).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Shippingport_Reactor (Feb. 2013).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Palo_Verde_Nuclear_Generating_Station (Feb. 2013).