



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي
كلية العلوم الدقيقة
قسم الفيزياء

رقم الترتيب:.....
رقم التسلسل:.....

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة
تخصص: فيزياء تطبيقية إشعاعات وطاقة

من إعداد الطالبة: طريلي ثورية
الموضوع

دراسة الخصائص الهيدروليكية لمفاعل الماء المغلي BWR
باستعمال محاكي الوكالة الدولية للطاقة النووية

نوقشت يوم: 2019/06/20

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيسا
مناقشا
مؤطرا

أستاذ مساعد -أ-
أستاذ محاضر -أ-
أستاذ مساعد -أ-

حاج عمار محمد علي
عطية محمد الهادي
لتيم فتحي

الموسم الجامعي: 2019/2018

التهنئة

بفضل الله والحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

أهدي تخرجي

إلى النور الذي أنار دربى والسراج الذي لا يطفى نوره أبداً، والذي بذل جهد السنين من أجل أن أعتلي

سلام النجاح، أطل الله في عمره ومدّه بصحة والعافية

"أبي العزيز"

وإلى من أخص الله الجنة تحت قدميها وغمرتني بالحب والحنان، وإلى بسملة الحياة وسر الوجود، إلى من كان

دعائها سر نجاحي، وحنانها بلسم جراحي، أطل الله في عمرها

"أمي الحبيبة"

إلى من ساندني وآثرني في دربي ووقفوا معي

"أخواني وأخواتي"

إلى من ولدتهم لي حياة

"صديقاتي"

ولا أملك سوى بضع كلمات لعلها تعبر عن شكري وامتناني لكم يا من كنتم لي خير سند

افتخر بوجودكم بجانبني دائماً .

تورية



شكر وعرفان

الحمد لله الذي خصني برعايته وحفظه وستره وأمدني بعونه ووفقني في إتمام هذا العمل المتواضع على أحسن وجه والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين

أتوجه بالشكر الجزيل إلى من شرفني بإشرافه على المذكرة، الأستاذ "تيم فتحي" لتوجيهاته العلمية ونصائحه القيمة التي لا تقدر بثمن والتي ساهمت بشمل كبير في إتمام واستكمال هذا العمل. كما أتوجه بالشكر الخاص إلى اللجنة المناقشة الأستاذ الفاضل "حاج عمار محمد علي" والأستاذ الكريم "عطية محمد الهادي"

وأخيراً أتقدم بجزيل شكري إلى كل من مدوا لي يد العون والمساعدة، وإلى الزميلات وإلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد.

تورية



فهرس المحتويات

I.....	الإهداء
II	شكر و عرفان.
III	فهرس المحتويات
V	فهرس الأشكال
VII.....	فهرس الجداول
VIII	قائمة الاختصارات
2	مقدمة العامة:

الفصل الأول: عموميات حول تصاميم المفاعلات

5	I-1- مقدمة:
5	I-2- المفاعلات النووية الحالية:
6	I-3- مفاعلات الماء الخفيف ($LWRs$):
7	I-3-1- مفاعلات الماء المضغوط ($PWRs$):
11	I-3-2- مفاعلات الماء المغلي ($BWRs$):
14	I-3-3- قضبان الوقود والتحكم في $LWRs$:
15	I-4-3- مفاعلات معيارية صغيرة $SMRs$:
16	I-5-3- التحكم في LWR :
17	I-4- مفاعلات الماء الثقيل ($HWRs$):
18	I-5- مفاعلات الجرافيت:
19	I-6- المفاعلات المبردة بالغاز:
20	I-7- مفاعلات النيوترونات السريعة ($FNRs$):
20	I-8- المفاعلات المولد السريع بالمعدن السائل ($LMF - BRs$):
22	I-9- خلاصة:

الفصل الثاني: نقل الحرارة الأساسية

24	II-1- مقدمة:
24	II-2- مصدر الحرارة:
25	II-2-1- نقل الحرارة داخل قضيب الوقود:
28	II-2-2- نقل الحرارة إلى المبرد:

39	3-II- توزيعات درجة الحرارة الأساسية:
30	4-II- مفاعل الماء المغلي:
30	II-4-1- توزيع درجة الحرارة داخل مفاعل الماء المغلي:
31	II-4-2- توزيع جودة الكتلة والفراغ:
33	II-5- تدفق الحرارة الحرجة:
34	II-6- خلاصة:

الفصل الثالث: النتائج والمناقشة

36	III-1- مقدمة:
36	III-2- برنامج IAEA Generic BWR Simulator:
37	III-2-1- قائمة شاشات عرض المحاكاة BWR:
38	III-2-2- مبدأ عمل المحاكاة BWR:
39	III-3- النتائج:
39	III-3-1- تغير طاقة المفاعل بدلالة الزمن:
40	III-3-2- تغير الطاقة الحرارية بدلالة الزمن:
41	III-3-3- تغير درجة حرارة الوقود بدلالة الزمن:
42	III-3-4- تغير تدفق مياه التغذية بدلالة الزمن:
43	III-3-5- تغير معدل التدفق الأساسي بدلالة الزمن:
44	III-3-6- تغير درجة حرارة سائل التبريد بدلالة الزمن:
45	III-3-7- تغير درجة الحرارة في قبة المفاعل بدلالة الزمن:
46	III-3-8- تغير الضغط الأساسي (ضغط القلب) في المفاعل بدلالة الزمن:
47	III-3-9- تغير ضغط البخار في قبة المفاعل بدلالة الزمن:
48	III-3-10- تغير جودة سائل التبريد عند مخرج بدلالة الزمن:
49	III-3-11- تغير مستوى الماء مفاعل بدلالة الزمن:
49	III-4- خلاصة:
51	الخاتمة عامة:
53	الملحق A: البيانات BWR
56	الملحق B: النتائج
61	قائمة المراجع

فهرس الأشكال

ترتيب الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
الفصل الأول		
(1-I)	رسم تخطيطي لمحطة طاقة نووية	06
(2-I)	مخططات مفاعل الماء المغلي BWR، مفاعل الماء المضغوط PWR	07
(3-I)	رسم تخطيطي نموذجي لـ PWR	08
(4-I)	المواضع الداخلية لمفاعل PWR نموذجية	09
(5-I)	نظام المبرد PWR	10
(6-I)	رسم تخطيطي لمفاعل BWR نموذجي	11
(7-I)	رسم تخطيطي لأنظمة الإمداد بالبخر والمبرد BWR	12
(8-I)	وعاء مفاعل نموذجي BWR	13
(9-I)	عنصر الوقود ومجموعة وقود PWR و BWR	14
(10-I)	المقاطع العرضية لتجمعات الوقود PWR (يسار) و BWR (يمين)	15
(11-I)	مفاعل NuScale (يسار) و Westinghouse (يمين) من SMRs	16
(12-I)	رسم تخطيطي لمفاعل كاندو الثقيل	18
(13-I)	رسم تخطيطي لمفاعل تشرنوبيل RBMK للماء المغلي	19
(14-I)	رسم تخطيطي لمفاعل الغاز المتقدم النموذجي	20
(15-I)	مفاعل مولد سريع معدن سائل LMFB	21
(16-I)	مفاعلين من نوع تجمع ومولد السريع من نوع حلقة السائل	21
الفصل الثاني		
(1-II)	رسم تخطيطي للمقطع العرضي لكريات الوقود وقضيب الوقود	24
(2-II)	الشكل العام لتوزيع درجة الحرارة العرضية داخل قضيب الوقود	27
(3-II)	رسم مفاعل أسطواناني	29
(4-II)	توزيع درجة حرارة المبرد المحورية داخل مفاعل أسطواناني	30
(5-II)	توزيع درجة حرارة سائل التبريد المحوري بسبب الغليان	31

33	العلاقة بين تدفق الحرارة Q من الارتفاع داخل قلب مفاعل الماء المغلي ودرجة حرارة سائل التبريد، جودة الكتلة والتفاعلية	(6-II)
الفصل الثالث		
37	نظرة عامة على محطة BWR	(1-III)
38	توضح صورة قائمة شاشات عرض المحاكاة BWR	(2-III)
39	منحنى طاقة المفاعل بدلالة الزمن	(3-III)
40	منحنى الطاقة الحرارية في قلب مفاعل بدلالة الزمن	(4-III)
41	منحنى درجة حرارة الوقود بدلالة الزمن	(5-III)
42	منحنى تدفق مياه التغذية بدلالة الزمن	(6-III)
43	منحنى معدل التدفق الأساسي بدلالة الزمن	(7-III)
44	منحنى درجة حرارة سائل التبريد بدلالة الزمن	(8-III)
45	منحنى درجة الحرارة في قبة المفاعل بدلالة الزمن	(9-III)
46	منحنى ضغط الأساسي (ضغط القلب) مفاعل بدلالة الزمن	(10-III)
47	منحنى ضغط في قبة المفاعل بدلالة الزمن	(11-III)
48	منحنى جودة سائل التبريد عند مخرج بدلالة الزمن	(12-III)
49	منحنى مستوى الماء مفاعل بدلالة الزمن	(13-III)

فهرس الجداول

ترتيب الجدول	عنوان الجدول	الصفحة
الفصل الأول		
(1-I)	بعض بيانات محطات الطاقة النووية النموذجية لمفاعلات الجيل الثاني	05
الملحق 02		
(1-B)	تغيرات درجات الحرارة	56
(2-B)	تغير التدفق الأساسي ومياه التغذية في مفاعل	57
(3-B)	تغيرات الضغط والطاقة الحرارية	58
(4-B)	طاقة مفاعل وجودة الكتلة ومنسوب الماء	59

قائمة الاختصارات

الرمز	معناه
LWR	مفاعل الماء الخفيف
BWR	مفاعل الماء المغلي
PWR	مفاعل الماء المضغوط
HWR	مفاعل الماء الثقيل
SMR	مفاعل معيارية صغيرة
RBMK	مفاعل تشرنوبيل للماء المغلي
AGR	مفاعل الغاز المتقدمة
HTGR	مفاعل المبرد بالغاز عالي الحرارة
FNR	مفاعل النيوترونات السريعة
LMFBR	مفاعل المولد السريع للمعادن السائل
IAEA	الوكالة الدولية للطاقة النووية
NPP	محطة الطاقة النووية

المقدمة العامة

مقدمة العامة:

لقد استخدمت تقنية الطاقة النووية المنطلقة من انشطار نوى بعض العناصر الثقيلة في أربعينيات القرن الماضي في الأغراض العسكرية أثناء الحرب العالمية الثانية. ولكن في بداية الخمسينيات وبعد انتهاء الحرب انتبه العالم إلى الاستخدام السلمي للانشطار النووي وبالتحديد في توليد الطاقة الكهربائية حيث أنشئت مفاعلات الطاقة لأغراض توليد الكهرباء فكانت أول محطة نووية لتوليد الكهرباء لأغراض تجارية في أوبننسك في روسيا سنة 1954 ثم تلتها بريطانيا في محطة كالدروهل سنة 1956 وبعد ذلك كان مفاعل شبنجبورت لتوليد الكهرباء في نهاية سنة 1957 ثم استمرت هذه الدول ولحقت بها أخرى في تطوير المفاعلات النووية في توليد الطاقة الكهربائية واستخدامها بصور متزايدة [1]. والآن أصبح العالم ينتج كهرباء من الطاقة النووية بما يعادل مجموع الطاقة الكهربائية التي تم إنتاجها من جميع المصادر في سنة 1960.

الطاقة النووية الآن تولد أكثر من سدس الكهرباء في العالم بواسطة 440 مفاعل قوى في 31 بلداً. وهناك حوالي 17 بلداً تعتمد على الطاقة النووية في توليد أكثر من ربع حاجتها من الكهرباء وتعتبر كمصدر للكهرباء الأسرع نمواً بين مصادر الطاقة الرئيسية الأخرى وتزداد كفاءة هذه المفاعلات وأمانها يوماً بعد يوم. ومن خلال النقاش بين مؤيدي توليد الكهرباء من الطاقة النووية والمعارضين لها بالمقارنة مع غيرها من المصادر وعلاقتها بالأسلحة النووية أصبح من غير الممكن تجاهل الطاقة النووية كمصدر أكبر وضروري لتأمين التوازن بين الطلب المتزايد على الطاقة وبين المتاح منها [1]. أصبحت المفاعلات النووية في منتصف الخمسينيات من القرن العشرين مصادر طاقة هامة جداً لتوليد التيار الكهربائي والانتفاع بها في مجالات متعددة كالأبحاث وغيرها [2].

كان هناك طلب متزايد على المتخصصين النوويين المؤهلين، مما أدى بالوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) إلى إنشاء برامج محاكاة لمحطات الطاقة النووية (NPP) لتدريس العلوم والتكنولوجيا النووية [3]. كان من اختراع الدكتور بهارات شيرالكار خبير الهيدروليكية الحرارية في مفاعلات الماء المغلي لمساعدة الدول الأعضاء في الوكالة في مساعيها لتطوير الطاقة النووية، وكان الهدف من هذا البرنامج هو توفير مجموعة متنوعة من المفاعلات النووية، من أكثر هذه المفاعلات استعمالاً هو مفاعل الماء المغلي (BWR). ولدراسة خصائصها التشغيلية واستجابتها للاضطرابات وحالات الحوادث عملت الوكالة الدولية للطاقة الذرية على توفير وتطوير برامج المحاكاة (BWR) وما يرتبط بها من مواد تدريبية وورش العمل والدورات التدريبية [2].

تم تطوير جهاز محاكاة مفاعل الماء المغلي العام (BWR) للوكالة الدولية للطاقة الذرية ينتج 1300MWe من الطاقة الكهربائية من خلال شركة CTI، مع مضخات إعادة تدوير داخلية ومحركات قضيب التحكم في الحركة الدقيقة. تعمل هذه البرامج على أجهزة الكمبيوتر الشخصية (PC)، تقتصر على توفير

خصائص الاستجابة العامة لأنواع مختارة من أنظمة مفاعلات الطاقة وأنه لا يتم استخدامها لأغراض خاصة. ويتم توفيرها لجمهور واسع من الموظفين التقنيين وغير التقنيين كأداة تعليمية تمهيدية. والأعضاء المهتمين بتطوير الهندسة النووية [3].

يتم اللجوء لاستعمال المحاكى في دراسة الخصائص الهيدرولحرارية لمحطة طاقة نووية (NPP) نظراً لصعوبة إجراء مثل هكذا قياسات باستعمال محطة حقيقية. كما أنه يمكننا من تطبيق المعارف النظرية للفيزياء الطاقوية.

يهدف البحث إلى دراسة الخصائص الهيدرولحرارية لواحد من أكثر المفاعلات استعمالاً وهو مفاعل الماء المغلي (BWR) وذلك باستعمال محاكي الوكالة الدولية للطاقة النووية (IAEA).

تطرقنا في هذا العمل إلى ثلاث فصول وهي كالتالي:

حيث تكلمنا في الفصل الأول عن عموميات حول تصاميم المفاعلات النووية ونقدم بعض التفاصيل المهمة عن أهم أنواع المفاعلات التي استخدمت في توليد الطاقة الكهربائية، كما نقوم بشرح مبدأ عملها ونوعية الوقود المستخدم في كل منها.

في الفصل الثاني تطرقنا لدراسة كيفية إنتاج الحرارة في مفاعل نووي، بحيث يتم تحليل عمليات نقل الحرارة داخل قلب المفاعل. نبدأ هذه الدراسة بقضيب وقود وحيد ثم نتوسع تدريجياً لنشمل كل قلب المفاعل والوعاء الذي يحتويه.

كما تناولنا في الفصل الثالث دراسة الخصائص الهيدرولحرارية لمفاعل الماء المغلي عن طريق عرض، تحليل وتفسير النتائج المتحصل عليها باستعمال محاكي الوكالة الدولية للطاقة النووية، وذلك بقياس تغيرات الحرارة، الضغط، التدفق، مستوى الماء ونوعية المائع في نموذج من هذا المفاعل.

وأخيراً نختم هذه المذكرة بخاتمة عامة نقدم فيها حوصلة عن النتائج المتحصل عليها في هذا العمل

الفصل الأول

عموميات حول تصاميم
المفاعلات

1-I- مقدمة:

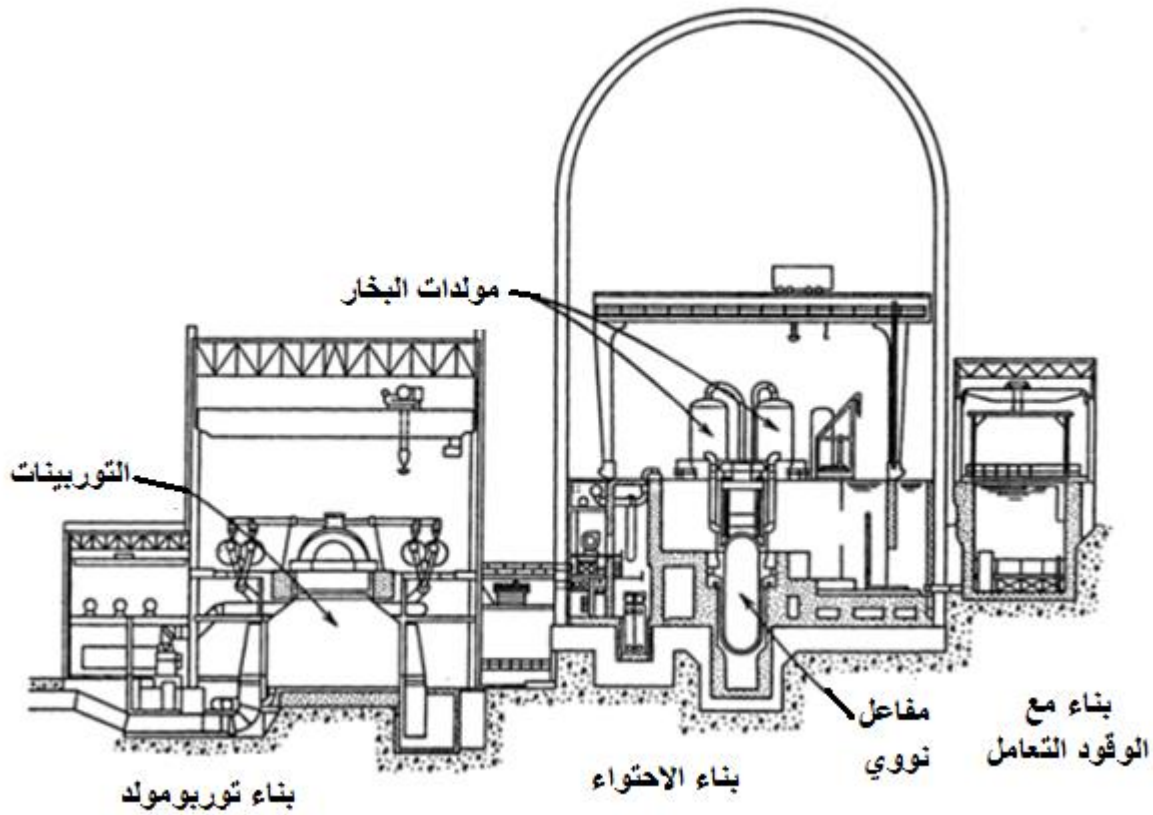
مفاعلات من الجيل الأول هي المفاعلات الأولية المبكرة المصممة والمبنية في 1950s وأوائل 1960s . أما مفاعلات الجيل الثاني فهي تلك المصممة والمنجزة في 1970s و 1980s، أما مفاعلات الجيل الثالث فقد تم تطويرها أواخر التسعينيات أي بين 2000s و 2010s وهي لذلك قليلة العدد ويمكن وصفها بأنها LWR المتقدمة. بناء على ذلك سيكون التركيز على مفاعلات الجيل الثاني وهذه التصاميم المستخدمة في المفاعلات المولدة للطاقة الكهربائية قيد التشغيل اليوم [4].

الجدول (1-I): بعض بيانات محطات الطاقة النووية النموذجية لمفاعلات الجيل الثاني [5،6].

نوع المفاعل	PWR (LWR)	BWR (LWR)	CANDU (HWR)	LMFBR (FNR)
الانتاج الكهربائي (MW)	1150-1300	1200	500	1000
الكفاءة (%)	33-34	33	31	39
وقود	U_2O	U_2O	U_2O	U_2O, P_uO_2
المبرد الأساسي	H_2O	H_2O	D_2O	Na
وسيط	H_2O	H_2O	D_2O	None
ضغط المبرد (atm)	155	72	89	14
مدخل التبريد (°C)	296-300	269	249	380
مخرج التبريد (°C)	328-333	286	293	552
معدل التدفق ($10^6 kg/hr$)	65	47	24	50
درجة الحرارة الوقود العظمى (°C)	1788-2021	1829	1500	2000

2-I- المفاعلات النووية الحالية:

يبرز الجدول (1-I) بيانات نموذجية عن بعض الأنواع الأساسية من مفاعلات الجيل الثاني، وتختلف هذه المفاعلات في المقام الأول من حيث الوقود النووي المستخدم، وهذا يميز LWR_S من HWR_S و FBR_S .



الشكل (1-I): رسم تخطيطي لمحطة طاقة نووية [5].

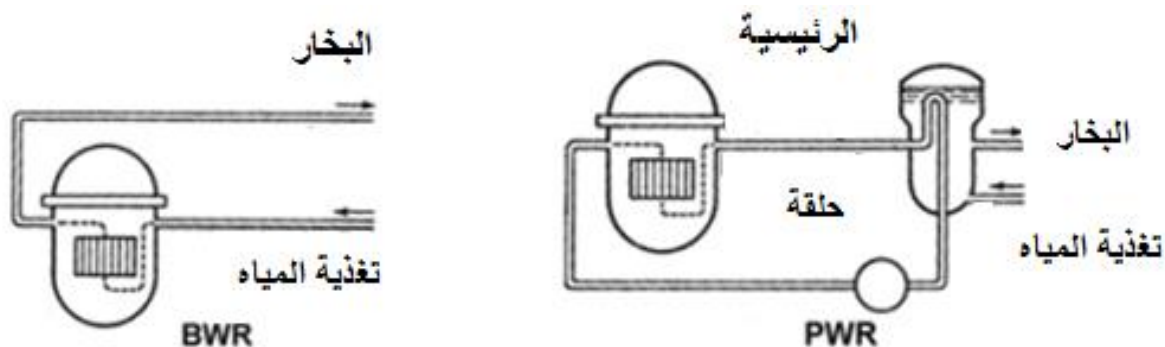
3-I- مفاعلات الماء الخفيف (LWR_s):

الجزء الأكبر من المفاعلات النووية المستخدمة لإنتاج الطاقة حول العالم تنتمي إلى الطبقة المعروفة باسم مفاعلات الماء الخفيف (LWR_s)، أي التي تستخدم الماء الخفيف (على عكس الماء الثقيل) كمهدئ ومبرد أساسي لكي تكون مكتفية ذاتياً من حيث التدفق النيوتروني. المفاعلات التي تولد الطاقة من وقود اليورانيوم الطبيعي تستخدم المياه الثقيلة كمهدئ من أجل الحفاظ على تدفق النيوترونات (يعمل مفاعل الماء الثقيل الكندي CANDU على أساس هذا الموضوع). لكن مفاعلات LWR_s تحتاج إلى وقود اليورانيوم المخصب من أجل أن تكون مكتفية ذاتياً. لأن الماء الخفيف يمتص النيوترونات ويبطئها فهو أقل كفاءة كمسؤول عن الماء الثقيل أو الجرافيت [7].

الماء له العديد من المزايا منها أنه غير مكلف وتقنية تبريده معروفة ومختبرة. كما أن لديه قدرة حرارية عالية ولزوجة منخفضة بحيث يمكن إزالة الحرارة مع انخفاض معدلات التدفق وانخفاض الضغط نسبياً [8]. غالباً ما يتم إضافة السموم القابلة للحرق التي تمتص النيوترونات إلى المبرد الأساسي (الماء) لتوفير بعض

السيطرة الإضافية على التفاعل مع مرور الوقت. والأهم من ذلك في معظم تصاميم (LWR_S) يؤدي غليان الماء داخل القلب إلى انخفاض في التفاعل ويعمل كآلية لإيقاف التشغيل التلقائي للمفاعل.

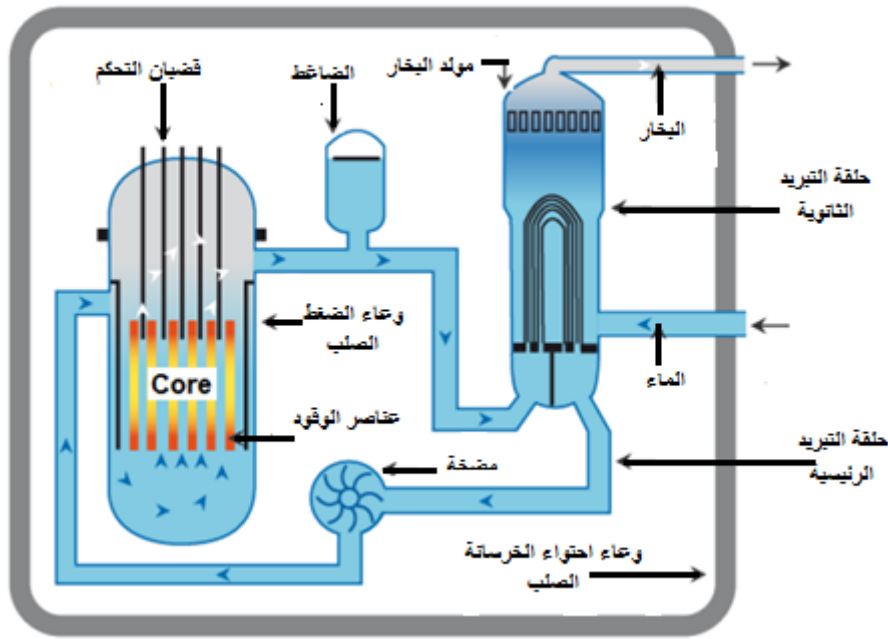
تم تطوير أنواع مختلفة من مفاعلات الماء الخفيف في العقود الماضية. ويمكن تقسيمها إلى نوعين رئيسيين، مفاعلات الماء المضغوط (PWR_S) ومفاعلات الماء المغلي (BWR_S) الموضحة في القسمين الآتيين.



الشكل (2-I): مخططات مفاعل الماء المغلي BWR، مفاعل الماء المضغوط PWR [5].

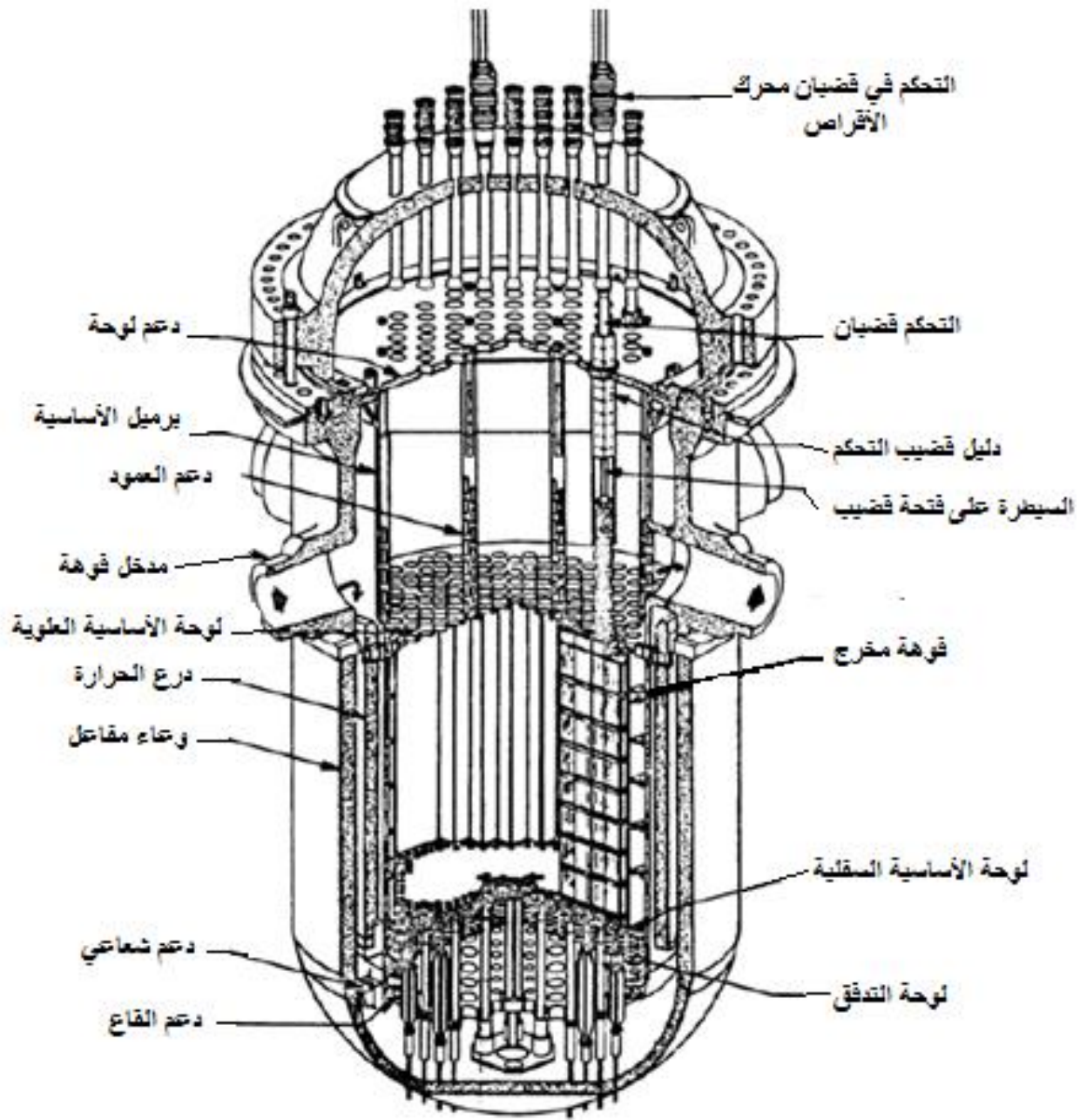
I-3-1- مفاعلات الماء المضغوط (PWR_S)

تُعرف غالبية مفاعلات الماء الخفيف (LWR_S) العاملة في العالم بأنه مفاعلات الماء المضغوط (PWR_S) لأن الماء يستخدم لإزالة الحرارة من القلب ويتم ضغط حلقة التبريد الأساسية من أجل كبح الغليان. لا تتحقق الكفاءة الحرارية الديناميكية الكبيرة إلا من خلال وجود نظام تبريد أولي يعمل عند درجة حرارة عالية، وهذه درجات الحرارة العالية ستؤدي إلى الغليان ما لم يتم الضغط على حلقة المبرد الأولية. البديل سيكون السماح بالغليان وإزالة معظم الحرارة من القلب في شكل حرارة كامنة [9].

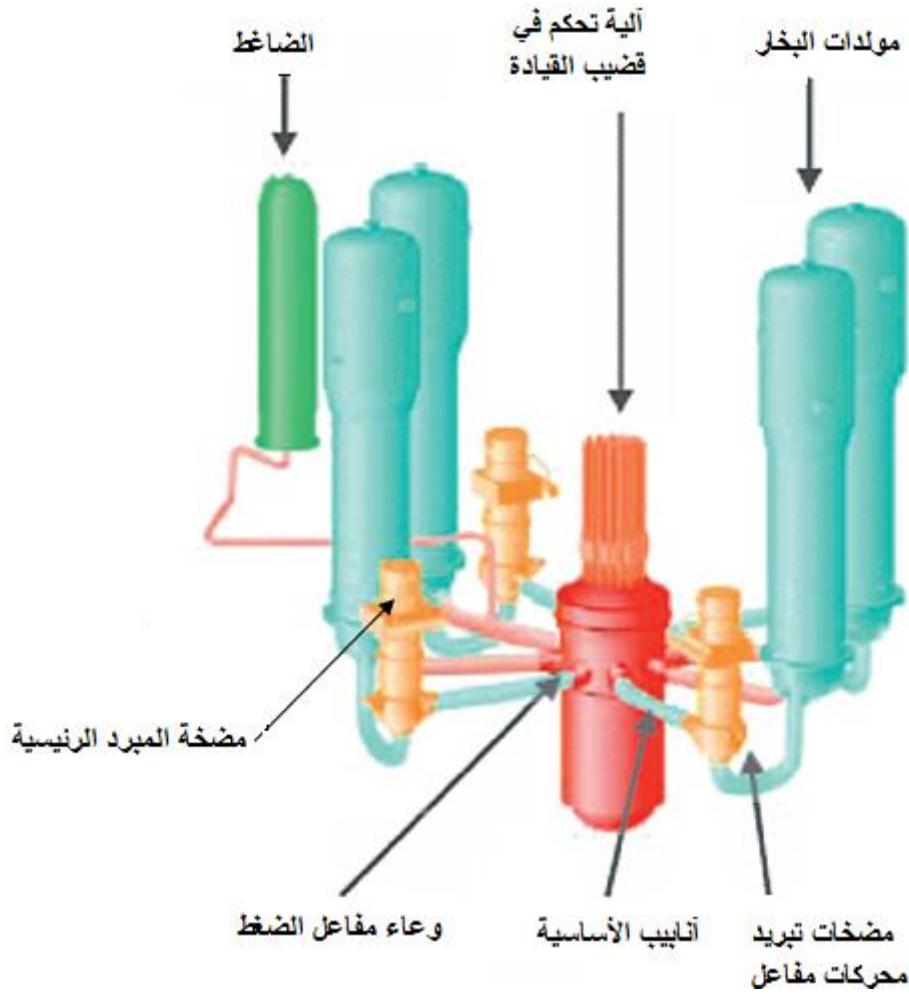


الشكل (3-I): رسم تخطيطي نموذجي لـ PWR [10].

يوضح الشكل (3-I) مخطط PWR النموذجي ويحتوي على وعاء مثل المقطع العرضي في الشكل (4-I) المجهز بنظام تبريد أولي الشكل (5-I) [11]. كل هذا موجود في مبنى احتواء. وتبلغ درجة حرارة مدخل ومخرج سائل التبريد الأساسي حوالي 300°C و 330°C على التوالي ولكن مع حرارة الماء العالية يكون هذا الفرق في درجة الحرارة كافياً لنقل الحرارة عند معدلات تدفق مياه بمعدل يقارب $65 \times \frac{10^6 \text{ kg}}{\text{hr}}$. لتجنب الغليان في درجات الحرارة عند الضغط 155 atm في حلقة المبرد الرئيسية يتم الحفاظ عليه عن طريق الضاغط الشكل (5-I) الواردة في هيكل الاحتواء. يجعل الضغط العالي المفاعل مدمجاً وذو كثافة عالية. فإن الضغط المرتفع هو أيضاً مسؤول عن الحوادث، وبالتالي يتم تأمين حلقة التبريد الأساسية هذه داخل مبنى احتواء ثقيل وقوي. تعمل حلقة تبريد ثانوية بضغط منخفض وتكون أقل عرضة للتلوث الإشعاعي بالتواصل حراري مع الحلقة الأولية عن طريق المبادل الحراري ومولد البخار الشكل (5-I) داخل مبنى الاحتواء. فالبخار الناتج عن ذلك يستخدم في تشغيل التوربينات البخارية والمولدات الكهربائية [12].



الشكل (4-I): المواضع الداخلية لمفاعل PWR نموذجية [13].

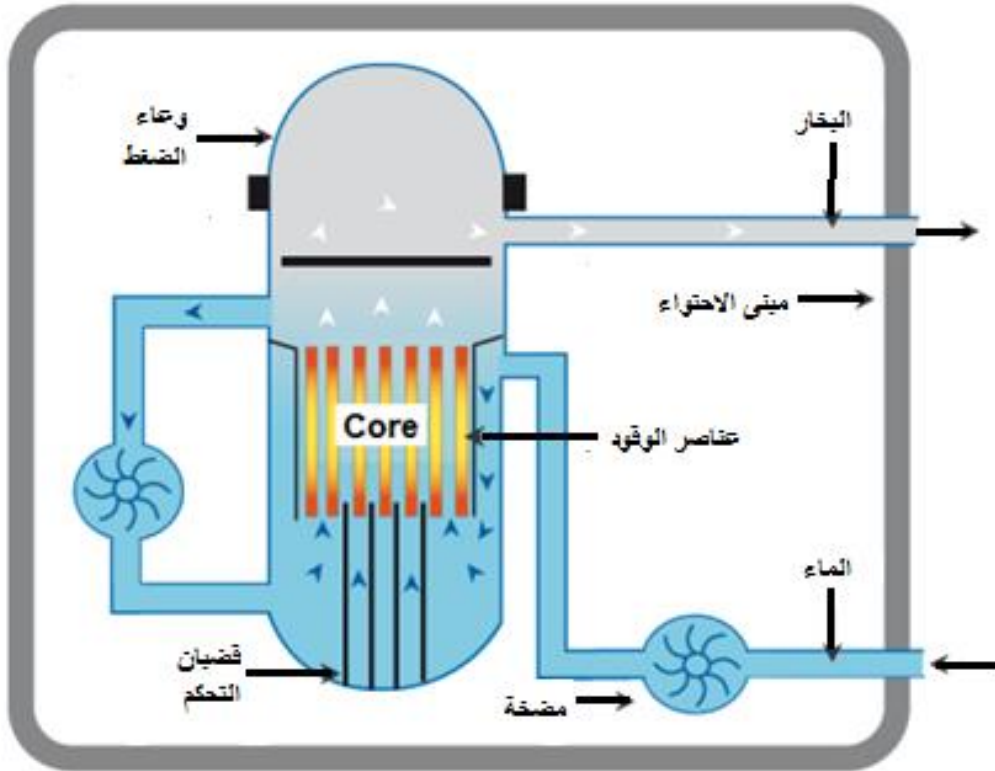


الشكل (5-1): نظام المبرد PWR.

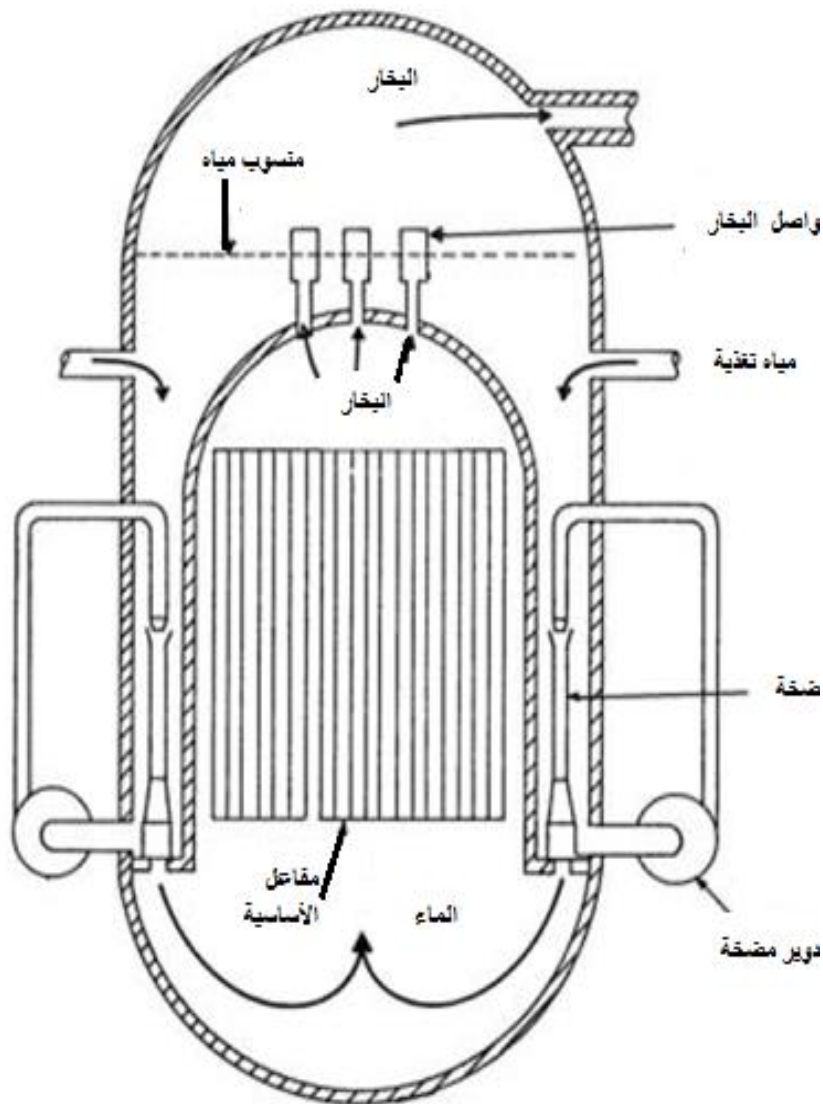
في حين أن نظام الحلقة المبرد المزدوج ينطوي على عدم الكفاءة الحرارية وبعض المعدات المضافة، فإنه يتميز بامتصاص مياه التبريد ذات الضغط المرتفع (الذي يحتوي النشاط الإشعاعي) داخل مبنى الاحتواء ويحتوي المبنى أيضاً على معدات أمان واسعة.

I-2-3- مفاعلات الماء المغلي (BWR_S):

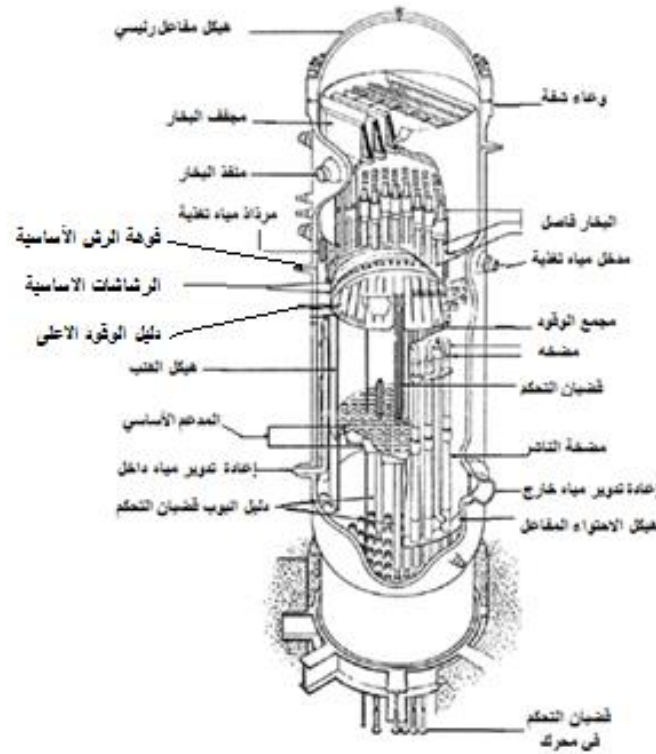
الغرض الكامن وراء استعمال مفاعل الماء المغلي هو تجنب الضغوط العالية التي توجد في PWR_S (والمخاطر المرتبطة بها) عن طريق السماح بغليان الماء الأساسي من خلال قلب المفاعل كما هو موضح في التخطيط النموذجي الشكل (6-I).



الشكل (6-I): رسم تخطيطي لمفاعل BWR نموذجي [10].



الشكل (7-I): رسم تخطيطي لأنظمة الإمداد بالبخار والمبرد BWR [13].



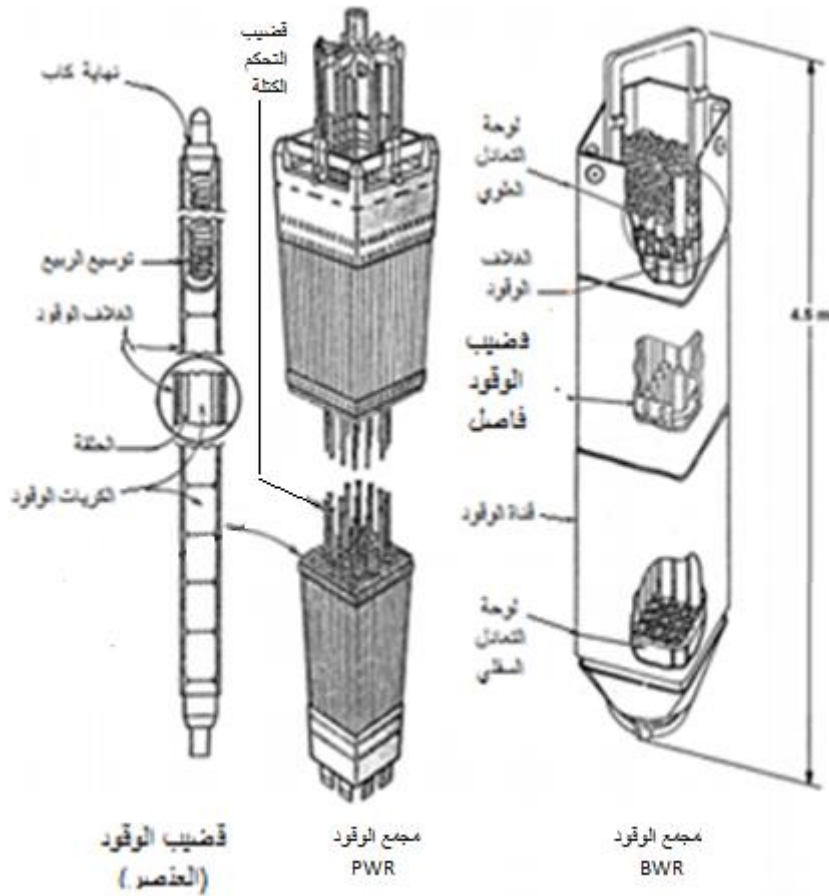
الشكل (8-I): وعاء مفاعل نموذجي BWR [13].

من أجل تجنب الضغوط العالية في حلقة سائل التبريد الأولية في مفاعل الماء المغلي BWR. يتم تغذية البخار الناتج مباشر إلى التوربينات كما في الشكل (7-I) وبالتالي القضاء على حلقة المبرد الثانوية. فيقلل هذا التصميم من حجم بنية المفاعل وتكلفته، كما هو الشأن عند PWR لأن الانقطاع في حلقة سائل التبريد الأولية لن تؤدي إلى ارتفاع الضغط داخل هذا الاحتواء الثانوي [14]، يظهر الشكل (8-I) تفاصيل من قلب مفاعل BWR.

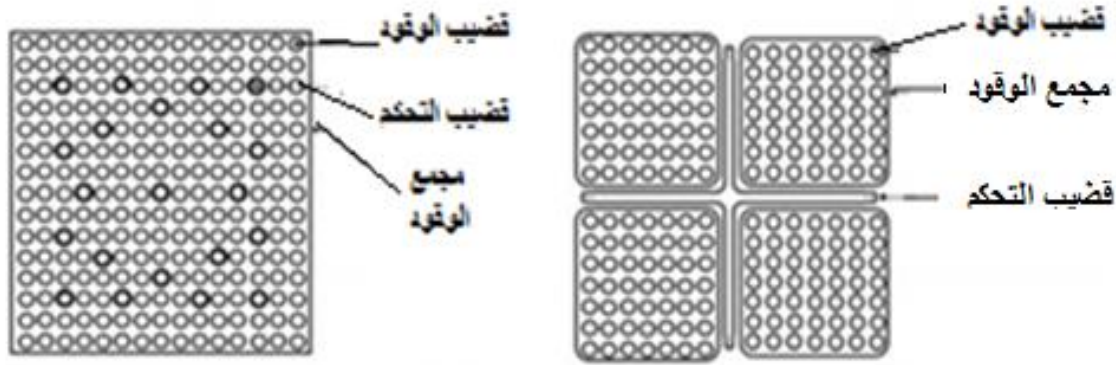
ابتكرت جنرال إلكتريك تصميم بنية احتواء ثانوي لـ BWR_S بحيث تسمح في حالة انقطاع حلقة التبريد الأساسية بتوجيه البخار نحو الأسفل. من خلال أنابيب في جزء كبير من الماء (يعرف باسم تجمع قمع) حيث يتم تكثيفها. هذا من شأنه أن يقلل من تراكم ضغط البخار داخل الاحتواء الثانوي [15]. يؤدي التخلص من حلقات التبريد الثانوية أو الوسيطة. إلى تحقيق الكفاءة الحرارية للوحدة، ولكنه يعني أيضاً زيادة تراكم النشاط الإشعاعي في التوربينات. الميزات الأخرى في BWR تشتمل على تأثير خليط البخار / الماء على دور الوسيط الذي يلعبه المبرد.

I-3-3- قضبان الوقود والتحكم في LWR_s :

يتشكل وقود ثاني أكسيد اليورانيوم في PWR أو BWR في شكل حبيبات أسطوانية معبأة في أنابيب الزركاليوم التي يبلغ طولها 3.5cm وتُعرف بقضبان الوقود الشكل (9-I). جدران أنابيب الوقود معروفة باسم الغلاف في حالة مفاعل PWR نموذجي فإن قطر الكريات يكون حوالي 0.97 cm والقضبان الوقود قطرها يقدر بـ 1.07 cm. أما في حالة BWR نموذجي فإن الأقطار المقابلة هي 1.24 cm و 1.43 cm على التوالي. عادة ما يحتوي القلب على 55 000 و 47 000 قضيب وقود وهكذا تتضمن الأبعاد الأساسية للمفاعل الأسطواني (الطول والقطر) حوالي 3.6 m و 4.4 m على PWR و BWR على التوالي [16].



الشكل (9-I): عنصر الوقود ومجموعة وقود PWR [12] و BWR [13].



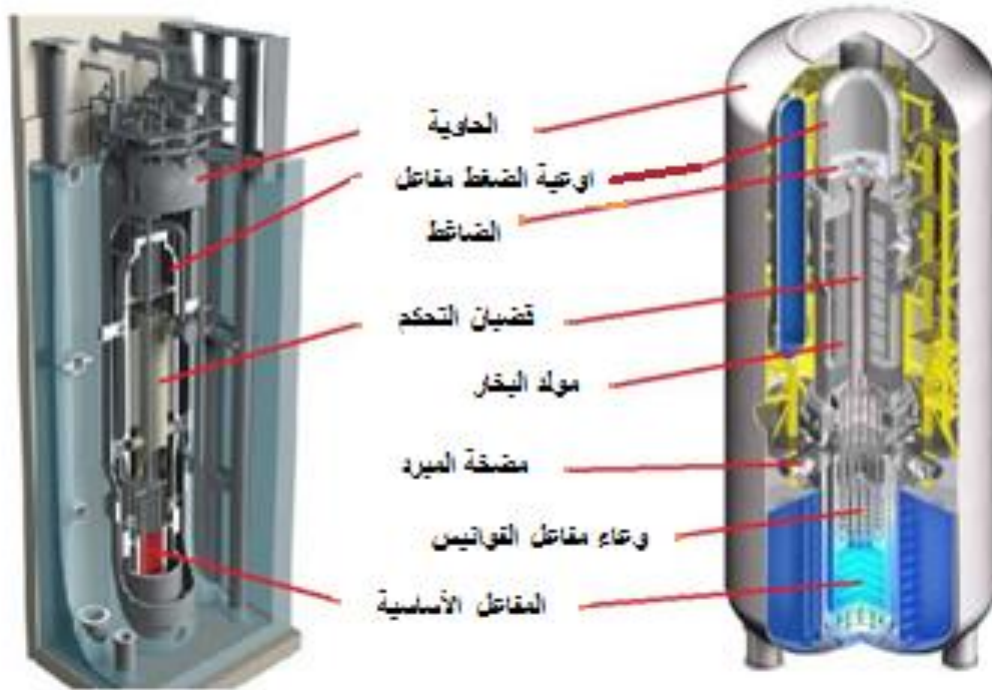
الشكل (I-10): المقاطع العرضية لتجمعات الوقود PWR (يسار) و BWR (يمين).

يتم ترتيب قضبان الوقود في مجموعات الوقود أو حزم الوقود كما هو موضح في الشكل (I-9). في PWR يتكون الترتيب النموذجي في مجمع الوقود من خلية مربعة المقطع (الشكل I-10 يسار) تحتوي حوالي 200 قضيب وقود متساوية ومتباعدة تتخللها حوالي 20 قناة دائرية للتحكم بالقضيب، يتدفق المبرد في الخلية في الفراغات بين هذه العناصر. هناك حوالي 200 من هذه المجمعات مرتبة [17]. يتكون القلب BWR أيضاً من خلايا (الشكل I-10 يمين) تحتوي كل منها على قضبان وقود 64 مرتبة في قناة مربعة يتدفق خلالها المبرد. يتم تجميع أربعة من هذه الخلايا بينهم شفرة تحكم صليبية الشكل. هناك حوالي 180 من هذه المجموعات من أربع مجموعات في جوهر BWR.

قضبان الوقود وقضبان التحكم والمبرد وقنوات التبريد وما إلى ذلك في المفاعل عادة ما يتم ترتيبها في الخلايا الشبكية التي تتكرر عبر تقاطع القلب. وبالتالي هناك عدة مقاييس بنيوية أو مادية داخل القلب، وتصبح هذه المقاييس المختلفة مسببة لعدم التجانس وتكون بذلك مهمة في بعض الحسابات الأكثر تفصيلاً لتدفق النيوترونات داخل المفاعل.

I-3-4- مفاعلات معيارية صغيرة SMR_s :

المفاعلات المعيارية الصغيرة (SMR_s) هي مفاعلات مياه ضغط تقليدية مصممة ليتم تصنيعها في مصنع ويتم نقلها ككل إلى موقع تشغيلها. وهذا من شأنه أن يسمح ببناء أسرع ومرونة في نشر المفاعل والتخلص النهائي منه في الشكل (I-11). مفاعل Westinghouse SMR الذي يولد 225 MW من الكهرباء. يحيط وعاء الاحتواء البالغ طوله 27m بالمفاعل الذي يبلغ طوله 24.7m ، ويحتوي على قلب مع 89 مجموعة وقود ذات تخصيب يقدر بـ $U^{235} > 5\%$. كما يظهر في الشكل أيضاً NuScale SMR الذي يقوم بتوليد 45 MW من الكهرباء، وبه وعاء الاحتواء الذي يبلغ طوله 24.3m والمزود بوعاء مفاعل يبلغ طوله 19.8m. مصممة لكي يكون سهل الاستخدام وكذلك لسرعة إنشائه. غير أن الانخفاض في الكفاءة يقابله زيادة في فترة البدء والإغلاق [18].



الشكل (11-I): مفاعل NuScale (يسار) ومفاعل Westinghouse (يمين) من SMRs.

I-3-5- التحكم في LWR:

إن الحاجة إلى الحفاظ على رقابة مشددة على تشغيل المفاعل النووي أمر بديهي. لوحظ أن التحكم أصبح أسهل بكثير في الواقع، لأنه عملي من قبل النيوترونات المتأخرة التي تمدد زمن الاستجابة النيوتروني لقلب المفاعل. إذا كان عدد النيوترونات يتألف من نيوترونات سريعة فقط، فإن الحسابات توضح أن نظام التحكم في المفاعلات يجب أن يستجيب في أجزاء من الثانية للحفاظ على السيطرة. إن وجود النيوترونات المتأخرة يسمح بأوقات استجابة تقدر بعشرات أو مئات الثواني من أجل الحفاظ على السيطرة. والنتيجة الطبيعية هي الحفاظ بصفة دائمة على عدد النيوترونات السريعة في المفاعل دون المستوى الحرج في جميع أقسام قلب المفاعل وطوال تاريخ تحميل الوقود. وذلك بسبب النيوترونات المتأخرة التي يتم استخدامها للوصول إلى الحرجة ويتم التلاعب بها لزيادة أو خفض مستوى الطاقة [18].

الأجهزة الميكانيكية الأولية المستخدمة في التحكم هي قضبان التحكم التي يتم إدخالها في قنوات مخصصة داخل القلب. وتكون مصنوعة من مادة تمتص النيوترونات وعند إدخالها يقل التفاعل في القلب. المواد المستخدمة تشمل البورون والكاديوم وكما هو موضح في الشكل (9-I)، عادة ما تكون قضبان التحكم مدفوعة بالمحركات من فوق، وفي بعض الأحيان يتم إدخال قضيب التحكم الكامل في ظل ظروف الطوارئ أو خلال عملية سكرام أو مراقبة دورية.

بالإضافة إلى قضبان التحكم يتم استخدام عدة طرق أخرى لضبط مستوى الطاقة للمفاعل للتعويض عن شيخوخة الوقود وموازنة الطاقة المنتجة في مناطق مختلفة من القلب. إستراتيجية أخرى هي حل السموم الماصة أو القابلة للحرق مثل حمض البور داخل المبرد.

I-4- مفاعلات الماء الثقيل (HWR_s):

مفاعل الماء الثقيل (HWR) هو مفاعل حراري بديل يستخدم اليورانيوم الطبيعي بدلاً من اليورانيوم المخصب. والماء الثقيل (D_2O) بدلاً من الماء الخفيف كمهدئ. الممثل الرئيسي لهذه الفئة من المفاعلات هو مفاعل كاندو الذي يوجد منه حوالي 48 في مجال التشغيل التجاري في جميع أنحاء العالم. استخدام وقود اليورانيوم الطبيعي يجنب نفقات عملية التخصيب. (D_2O) بدلاً من الماء الخفيف كمهدئ.

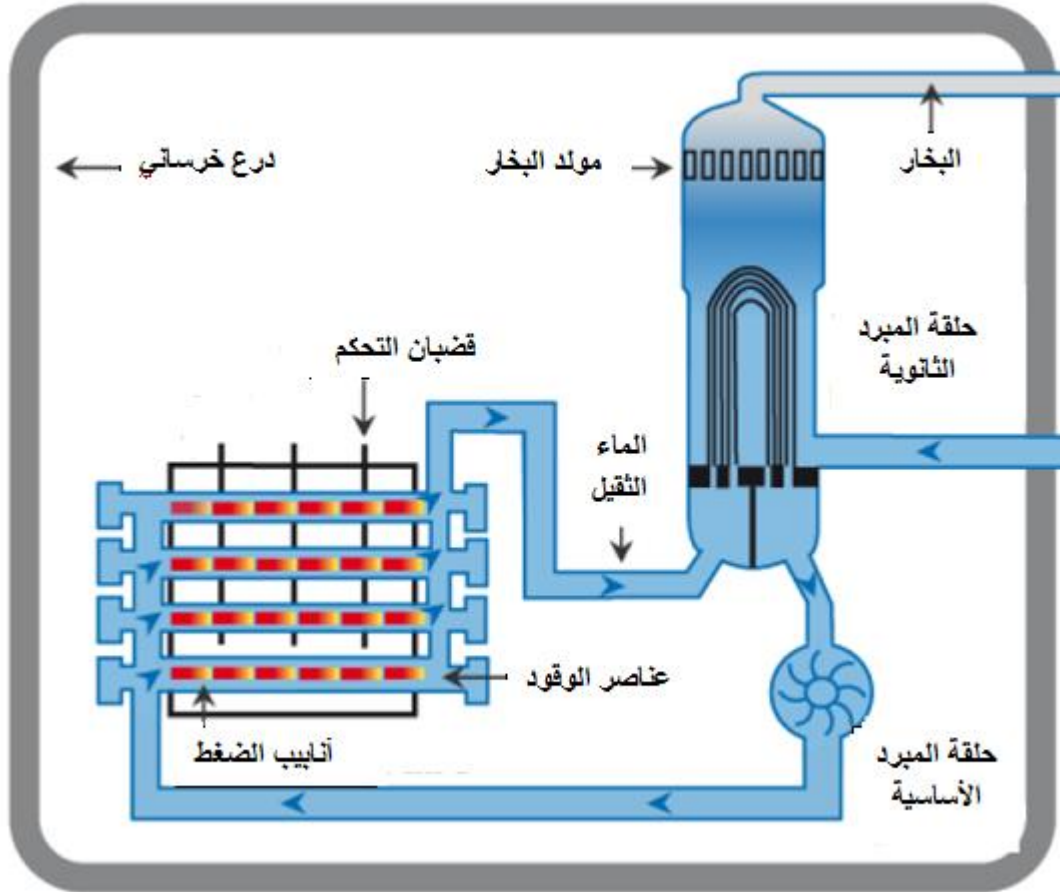
واحدة من السمات الفريدة لمفاعل كاندو هي تقنية إعادة التزود بالوقود المستخدمة. كما هو مبين في الشكل (I-12)، يتم احتواء الوقود في أنابيب أفقية وتزويدها بالوقود بشكل مستمر بدلاً من عملية الدفعات المستخدمة في LWR_s . تعمل آلات التزود بالوقود داخل الاحتواء الثانوي على دفع حزم وقود اليورانيوم الطبيعي إلى القلب وإزالة حزم الوقود المستهلك في الجانب الآخر من المفاعل. المبرد بدلاً من احتوائه في وعاء ضغط أولي كما هو الحال في LWR_s ، يتدفق الماء خلال القلب في أنابيب الضغط الأفقي المحيطة بقنوات الوقود التي يوجد منها 380 – 480 في مفاعل كاندو [8].

يبلغ حجم حزم الوقود الأسطوانية التي يتم دفعها عبر القلب في قنوات الوقود حوالي 10cm وقطره 50cm. وهي تتكون من حزمة من أنابيب الوقود محاطة بالزركاليوم 30-40 ويكون الوقود في شكل كرية. في النموذج قديم كانت هناك اثنتا عشرة حزمة وقود مصفوفة في كل قناة. يتدفق سائل التبريد من الماء الخفيف عبر أنابيب الضغط العالي المحيطة بقناة الوقود. كل التجمع الأنبوبي موجود في خزان الضغط المنخفض المعروف باسم calandria [14]. هناك حاجة لتدفق ثاني أكسيد الكربون الموصل بين المبرد بالماء الخفيف ومبرد الماء الثقيل لمنع سائل التبريد الساخن من غلي الوسيط.

هناك حاجة إلى وسيط الماء الثقيل مع وقود اليورانيوم الطبيعي لأن الماء الثقيل يمتص جزءاً أصغر من النيوترونات (لأن جزيء الديوتيريوم الأثقل يحتاج إلى مزيد من التصادمات لإبطاء النيوترونات وصولاً إلى الطاقات الحرارية) ويسمح بسلسلة تفاعل مستدامة. وبالتالي يحتاج مفاعل كاندو إلى سماكة أكبر للمبرد بين حزم الوقود. هذا يعني قلب مفاعل أكبر نسبياً.

واحدة من إيجابيات مفاعل كاندو هو أن البخار الناتج عن غليان المبرد قد يسبب زيادة في التفاعل، مما يزيد من البخار. كما أن السمات الأخرى للتصميم تؤدي إلى تحسين الأمان الأساسي لأن وقود اليورانيوم الطبيعي ليس حرجاً في مبرد الماء الخفيف.

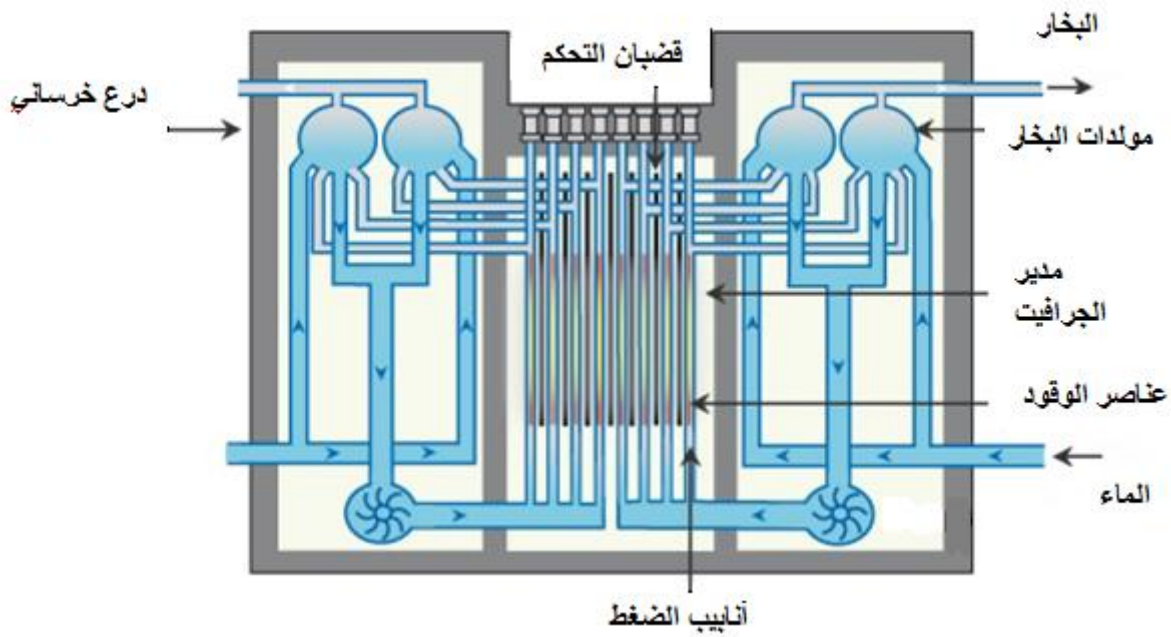
يحتوي مفاعل كاندو أيضًا على عدد من ميزات الأمان النشطة زيادة عن قضبان التحكم العادية، يتم تثبيت قضبان التحكم الطارئة للإغلاق فوق القلب بواسطة المغناطيس الكهربائي وتسقط في القلب إذا لزم الأمر. يقوم نظام أمان آخر عالي الضغط بحقن نيوترون امتصاص في calandria في حالة الطوارئ.



الشكل (I-12): رسم تخطيطي لمفاعل كاندو الثقيل.

I-5- مفاعلات الجرافيت:

هي نوع من مفاعلات BWRs، معروفة بالأحرف الأولى RBMK واحدة من التصاميم الروسية القديمة سيئة السمعة بسبب كارثة. يظهر بطريقة تخطيطية في الشكل (I-13). لا يزال هناك أكثر من 10 في إطار الخدمة في جميع أنحاء العالم حالياً، على الرغم من إجراء تعديلات كبيرة منذ وقوع الكارثة [17]. تعمل باليورانيوم المخصب، أما وسيط التفاعل في هذه المفاعلات فهو الجرافيت كما تستخدم الماء كمبرد وله عيب شديد هو أن الغليان الإضافي داخل القلب لا يؤدي بالضرورة إلى انخفاض في التفاعل. وبدلاً من ذلك يمكن أن تزيد التفاعلية نتيجة لفقدان سائل التبريد وقد يكون هذا عاملاً في حدوث حادثة تشيرنوبيل.

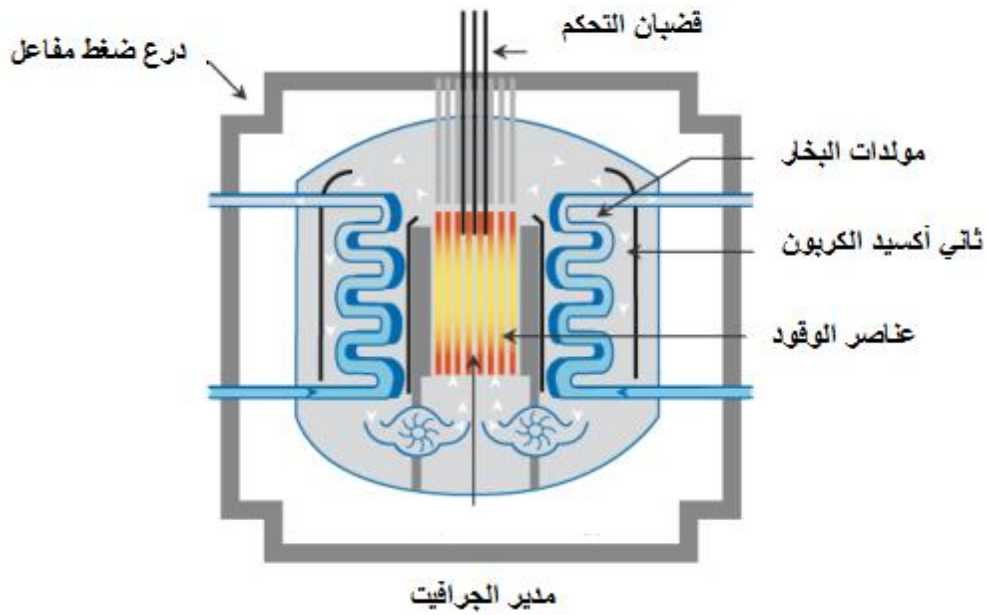


الشكل (I-13): رسم تخطيطي لمفاعل تشرنوبيل RBMK للماء المغلي.

I-6- المفاعلات المبردة بالغاز:

هناك حوالي 17 من هذه المفاعلات يعملون في المجال التجاري (معظمهم في المملكة المتحدة)، وهي مفاعلات يتم تبريدها بواسطة CO_2 أما المهدئ فهو من الجرافيت. تستخدم الإصدارات الحديثة لمفاعلات الغاز اليورانيوم الطبيعي على الرغم من أن هذا يتطلب نوى كبيرة. تستخدم مفاعلات الغاز المتقدمة (AGR) اليورانيوم المخصب كوقود يظهر تصميمهم في الشكل (I-1) [10،19]. يتدفق ثاني أكسيد الكربون من خلال القنوات في وسيط الجرافيت. هذه القنوات تتخللها قنوات قضبان التحكم ويحيط القلب بأكمله بدرع حراري، يتم وضع المبادلات الحرارية / أنابيب المولدات البخارية لنقل الحرارة إلى دائرة سائل تبريد الماء الثانوي مع قلب في بنية الاحتواء الأولية.

هناك تصميم مقترح للمفاعل المبرد بالغاز عالي الحرارة (HTGR) الذي يستخدم الهيليوم عالي الضغط كمبرد [5]. يحتوي هذا التصميم على دورة وقود مختلفة تمامًا مع تحميل مبدئي لكربيد اليورانيوم عالي التخصيب جنبًا إلى جنب مع أكسيد الثوريوم أو كربيد والوسيط يكون من الجرافيت. يتميز التصميم بميل إلى استخدام كفاءة أكثر لليورانيوم على الرغم من أنه سيتم استخدامه لتوليد الطاقة.



الشكل (14-I): رسم تخطيطي لمفاعل الغاز المتقدم النموذجي.

7-I- مفاعلات النيوترونات السريعة (FNR_s):

يشار إلى المفاعل النيوتروني السريع بالتسمية (FNR) وينتمي إلى فئة واسعة من المفاعلات تعتمد على النيوترونات السريعة وحدها للحفاظ على سلسلة التفاعل، وبالتالي لا يوجد وسيط. يمكن أن توفر أنواع الوقود المختلفة التفاعل المطلوب ذاتياً، وغالباً ما يتم تغذيتها بالبلوتونيوم أو خليط من اليورانيوم والبلوتونيوم. بما أن هناك مخزوناً كبيراً من اليورانيوم عالي التخصيب الذي تم إنتاجه للأغراض العسكرية، يضاف هذا أحياناً إلى وقود المفاعلات السريعة [9].

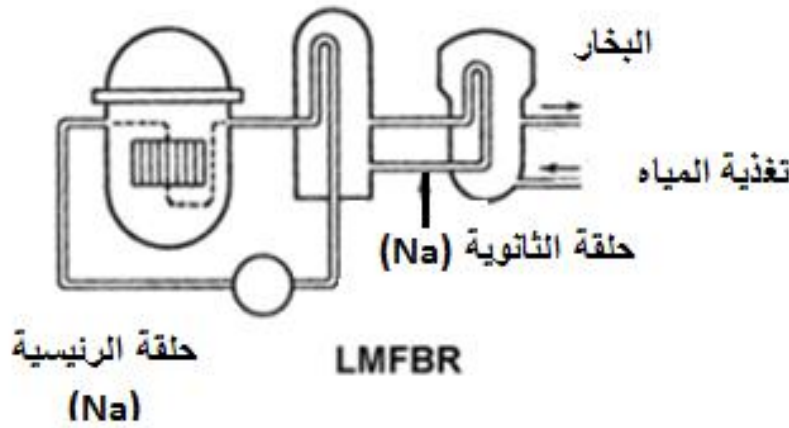
غالباً ما يكون قلب المفاعل السريع محاطاً بغطاء من U^{238} خصبة ينتج فيها التدفق النيوتروني من القلب المركزي أو ينتج بلوتونيوم إضافي. في المفاعلات السريعة المولدة حالياً (FBR_s) يتم إنتاج معظم Pu^{239} في هذا الغطاء.

8-I- المفاعلات المولد السريع بالمعدن السائل ($LMF - BR_s$):

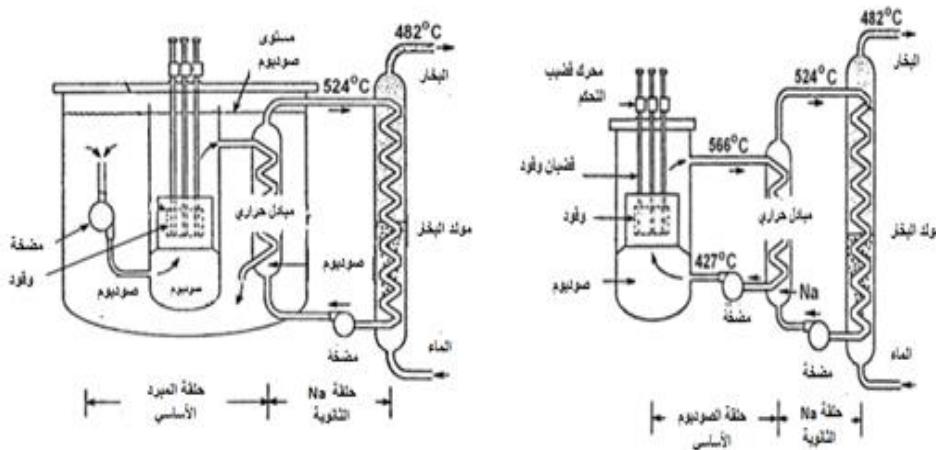
هناك حوالي 20 من $LMFBR_s$ في العالم تنتج الكهرباء حالياً وقد تم طرح العديد من المقترحات الأخرى. ونظراً لأن كثافة الطاقة أعلى بكثير من LWR_s ، لقد تم تبريد FBR_s التي تم بناؤها بالمعدن السائل لأن تأثير وسيط الماء غير مرغوب فيه والمعادن السائلة لها تأثير معتدل منخفض. المعادن السائلة لديها ميزة أن موصليتها الحرارية عالية، ويمكن تشغيلها في ضغوط منخفضة. هذا يجنب المخاطر المرتبطة بالضغط العالية في المفاعلات المبردة بالماء. على الرغم من ذلك هناك قضايا سلامة كبيرة مرتبطة بـ FBR_s والتي حدثت من نشرها حتى الآن.

لقد أستخدم الصوديوم كمبرد أولية في $LMFBR_s$ لعدة أسباب [6]. أولاً يحتوي الصوديوم على موصلية حرارية عالية مما يجعله سائل تبريد جيد على الرغم من أن سعته الحرارية تبلغ حوالي ثلث الماء. عادة ما تكون حلقة التبريد الرئيسية عند درجات حرارة مرتفعة من $295^{\circ}C - 545^{\circ}C$ من أجل تحقيق الكفاءة الحرارية العالية، لكن الضغط الذي يتطلبه منخفض (0.1 MPa) لأن درجات الحرارة $883^{\circ}C$ هذه أدنى بكثير من نقطة غليان الصوديوم عند الضغوط العادية. وبالتالي فإن معظم $LMFBR_s$ لها حلقة تبريد أساسية وضغط أعلى قليلاً من الغلاف الجوي.

خسارة النيوترون بسبب التباطؤ محدودة. كما أن الصوديوم يصبح مشعاً عند قصفه بالنيوترونات ومنه يجب حصر حلقة المبرد الأولية في نظام الاحتواء وإزالة الحرارة عن طريق المبادل الحراري وحلقة المبرد الثانوية [8]. تستخدم هذه الحلقة الثانوية أيضاً صوديوم سائلاً، ولكنها لا تحتوي على النشاط الإشعاعي لسائل التبريد الأساسي. كما أن لها مزايا أمان كبيرة.



الشكل (15-I): مفاعل مولد سريع معدن سائل LMFBR [5].



الشكل (16-I): مفاعلين من نوع تجمع ومولد السريع من نوع حلقة السائل.

I-9- خلاصة:

تطرقنا في هذا الفصل إلى عموميات حول بعض مفاعلات النوية وخصائصها وأهميتها، فقدمنا بعض التفاصيل المهمة عن أهم المفاعلات التي تم استخدامها في توليد الطاقة الكهربائية كما تطرقنا أيضا إلى كيفية عملها، كما عرضنا أنواع الوقود التي اعتمد عليها كل مفاعل، في الفصل الموالي سنقوم بدراسة شاملة حول إنتاج الحرارة في مفاعل نووي.

الفصل الثاني

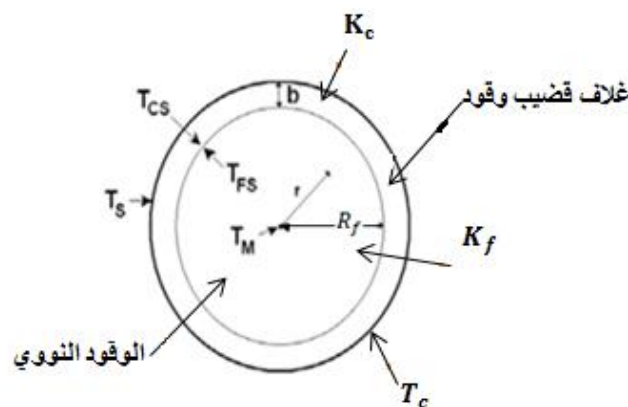
نقل الحرارة الأساسية

II-1- مقدمة:

لدراسة كيفية إنتاج الحرارة في مفاعل نووي يتم تحليل عمليات نقل الحرارة داخل قلب مفاعل يعمل بشكل طبيعي من خلال تهيئة ظروف عمل معينة في القلب أثناء عملية إنتاج الطاقة. نبدأ هذه الدراسة بقضيب وقود وحيد ثم نتوسع تدريجياً إلى كامل القلب، للحصول على تحليل أكثر تفصيلاً [20].

II-2- مصدر الحرارة:

يتم إنتاج الحرارة داخل مفاعل نووي كنتيجة للانشطار. الطاقة المنطلقة تظهر في البداية كطاقة حركية لنواتج الانشطار من النيوترونات الانشطارية وأشعة غاما. تتحرر طاقة إضافية عندما تتحلل نواتج الانشطار لاحقاً. ثم يتم تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية نتيجة لتصادمات نواتج الانشطار والنيوترونات النشطة وأشعة غاما مع بقية الجزيئات في قلب المفاعل. أغلبية هذه الطاقة أي حوالي 80 % تُستمد من الطاقة الحركية لنواتج الانشطار. وتساهم النيوترونات الانشطارية وأشعة غاما بحوالي 6 % أخرى من إنتاج الحرارة الفورية [21]. هذه الطاقة الفورية تسمى الإطلاق السريع للحرارة لتمييزه عن إطلاق الحرارة المتأخر المتولد عن تحلل متعدد لنواتج الانشطار. حرارة الانحلال الإشعاعي هذه كبيرة وتساهم بحوالي 14 % من الطاقة في المفاعل الحراري. نواتج الانشطار لا تنتج الحرارة فقط أثناء التشغيل العادي للمفاعل ولكنها تستمر بإطلاق الحرارة لفترة من الزمن بعد إغلاق المفاعل. بحيث ينخفض إنتاج الحرارة إلى 6.5 % بعد ثانية واحدة وبعد دقيقة واحدة 3.3 % وبعد ساعة واحدة 1.4 % وبعد يوم واحد 0.55 % وبعد عام واحد حوالي 0.023 %.



الشكل (II-1): رسم تخطيطي للمقطع العرضي لكريات الوقود وقضيب الوقود [22].

بما أن كل الحرارة المتولدة سواء كانت سريعة أو متأخرة فهي تتناسب مع تدفق النيوترونات، وبالتالي فإن معدل إنتاج الحرارة يتناسب طردياً مع تدفق النيوترون. على مقياس كرية الوقود الفردية، يمكن اعتبار توزيع تدفق النيوترونات متجانساً لأن متوسط المسار الحر للنيوترونات كبير مقارنة بأبعاد قضبان الوقود. فإن معدل الانشطار يؤول إلى أول تقدير تقريبي، يمكن اعتبار معدل إنتاج الحرارة متجانساً في كرية الوقود.

وبالتالي فإن العنصر الأول من التحليل الذي يليه يركز على كيفية انتقال الحرارة من قضيب الوقود الفردي إلى المبرد المحيط.

إن تدفق النيوترونات يختلف اختلافاً كبيراً من قضيب وقود إلى آخر داخل قلب المفاعل. بناءً على ذلك التحليل التالي يركز على كيفية اختلاف انتقال الحرارة من نقطة إلى أخرى داخل قلب المفاعل.

II-2-1- نقل الحرارة داخل قضيب الوقود:

لدراسة نقل الحرارة داخل قضيب الوقود الفردي. يتم رسم المقطع العرضي لكروية الوقود في الشكل (1-II). حيث نصف قطر دائرة كروية الوقود والتوصيل الحراري يتم الإشارة إليهما بـ R_f و K_f على الترتيب وسمك غلاف القضيب والموصلية الحرارية بـ b و K_c . درجات الحرارة في مركز قضيب الوقود والسطح الخارجي لكروية الوقود والسطح الداخلي للغلاف كروية وعند السطح الخارجي لقضيب الوقود يرمز إليها بـ T_M ، T_{FS} و T_{CS} على التوالي. يفترض وجود فجوة صغيرة أو مقاومة للاتصال $T_{CS} \neq T_{FS}$. وسيفترض أيضاً أن تدرجات درجات الحرارة في الاتجاه المحوري صغيرة مقارنة بتدرجات الاتجاه العرضي، وبالتالي يحدث التدفق الحراري الأولي في المستوى العرضي في (1-II) بناءً على ذلك فإن معدل إنتاج الحرارة لكل وحدة طول قضيب الوقود يرمز لها Q ويتم توزيعه بشكل منتظم على المقطع العرضي للقضيب عندئذ في حالة تشغيل مستقر، تتدفق الحرارة إلى الخارج (لكل وحدة المساحة) من خلال الموقع العرضي r وبالتالي تصبح معادلة التوصيل الحراري [12].

$$\frac{Qr}{2\pi R_f^2} = -K \frac{\partial T}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (1-II)$$

حيث $T(r)$ هو توزيع درجة الحرارة و k هي الموصلية الحرارية المحلية (K_c أو K_f). تكاملها على كروية الوقود في المجال $0 < r < R_f$ ويترتب على ذلك:

$$T(r) = T_M - r^2 \frac{Q}{4\pi R_f^2 K_f} \quad \dots\dots\dots (2-II)$$

حيث تم تطبيق الشرط $T = T_M$ عند $r = 0$. وبالتالي فإن درجة الحرارة على سطح كروية الوقود هي:

$$T_{FS} = T_M - \frac{Q}{4\pi K_f} \quad \dots\dots\dots (3-II)$$

كمثال نموذجي لاحظ أنه مع قيمة نموذجية لـ Q التي تبلغ قيمتها $Q = 500 \text{ W / cm}$ وموصلية حرارية لـ UO_2 $K_f = 0.03 \text{ W / cm K}$ ، يصبح فارق درجة الحرارة بين سطح ووسط الوقود 1400 درجة مئوية كبير جداً.

بافتراض أن الفجوة الصغيرة أو مقاومة الاتصال بين الوقود والغلاف يؤدي إلى معامل انتقال الحرارة h^* حيث:

$$k_f \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r=R_f \text{ in Fuel}} = k_c \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r=R_f \text{ in cladding}} = -h^* \{T_{FS} - T_{CS}\} \quad \dots\dots\dots (4-II)$$

ومنه تصبح:

$$T_{CS} = T_M - \frac{Q}{4\pi K_f} - \frac{Q}{2\pi R_f h^*} \quad \dots\dots\dots (5-II)$$

تكامل المعادلة (II-1) في الغلاف ($R_f < r < R_f + b$) يؤدي إلى:

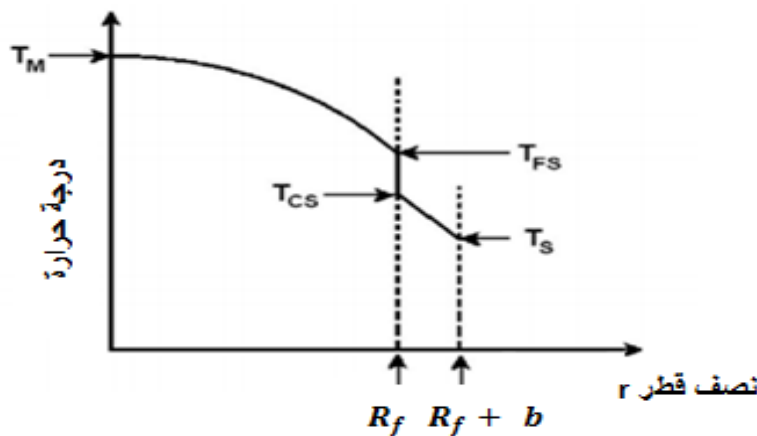
$$T(r) = C - r^2 \frac{Q}{4\pi R_f^2 K_c} \quad \dots\dots\dots (6-II)$$

حيث C هو ثابت التكامل.

نطبق الشرط $T = T_{CS}$ في $r = R_f$ ينتج قيمة لـ C، وفي الأخير يتم الحصول على درجة حرارة سطح قضيب الوقود كما يلي:

$$T_s = T_M - \left[\frac{1}{K_f} + \frac{2}{h^* R_f} + \frac{\left\{ -1 + \left(1 + \frac{b}{R_f}\right)^2 \right\}}{K_c} \right] \frac{Q}{4\pi} \quad \dots\dots\dots (7-II)$$

الاختلافات في درجات الحرارة المعتادة في LWR، داخل كرية الوقود إلى الغلاف الداخلي وعبر الغلاف إلى سطح الخارجي للغلاف والجزء الأكبر من المبرد قد تبلغ 200°K ، 80°K و 15°K على التوالي. يتم التحكم في الفرق في درجة الحرارة بين الماء ومركز كرية الوقود، تصل درجة حرارة الوقود حوالي 1400°K . وباختصار فإن التوزيع العرضي لدرجة الحرارة في قضيب الوقود يتم إعطاؤه بالمعادلات (2-II)، (3-II)، (5-II)، (6-II)، (7-II) والشكل العامل لهذا التوزيع موضح في الشكل (2-II). [20]



الشكل (II-2): الشكل العام لتوزيع درجة الحرارة العرضية داخل قضيب الوقود.

بما أن الهدف هو استخراج الحرارة من الوقود فمن المستحسن الحفاظ عليها، معدل إنتاج حراري Q كبير باستخدام تدفق نيوتروني كبير نسبياً. وبالتالي فإن كثافة طاقة كبيرة مرغوب فيها لعدة أسباب، فهو يقلل أولاً من حجم قلب المفاعل لمستوى إنتاج طاقة معين مما يقلل من تكلفة القلب وتكلفة بقية البنية التي تحتوي على القلب، ثانياً تؤدي الاختلافات العالية في درجة الحرارة عبر القلب إلى زيادة الكفاءة الحرارية في التوربينات المدفوعة بواسطة المبرد.

لكن Q العالي تعني درجة حرارة المفاعل عالية. هذا ما يحد من عوامل التصميم فإن أقصى درجة حرارة في الوقود T_M يجب أن تكون أقل من درجة حرارة الانصهار أي درجة الحرارة القصوى للغلاف T_{CS} . مع هذا فإن درجة حرارة الجدار T_S تكون مقيدة بحدود غليان سائل التبريد لأن اختلافات درجة الحرارة تتناسب مع Q [23]. تقليل اختلافات درجة الحرارة من خلال تقليل حجم كريات (أو قضبان) الوقود R_f . ولتحقيق الطاقة المطلوبة من المفاعل يجب زيادة عدد قضبان الوقود مما يزيد من تكلفة القلب. للتوصل إلى حل وسط يكون فيه عدد قضبان الوقود محدوداً والمحافظة على اختلافات درجة الحرارة يجب إدراج بعض التأثيرات الثانوية التي تأخذ بعين الاعتبار في تحليل قضيب الوقود:

* تدفق النيوترون في مركز قضيب الوقود أقل إلى حد ما من نصف قطره الأكبر R_f . هذا يساعد على توزيع درجة الحرارة في الوقود.

* يؤدي تصنيع الوقود UO_2 إلى فجوات صغيرة تقلل من التوصيل الحراري وتزيد من فروق درجة الحرارة.

* تميل الفجوة إلى زيادة في الغلاف مما يسبب في انخفاض في h^* وهذا ما يزيد في درجة حرارة الوقود [21]

* تزداد الموصلية الحرارية للوقود مع درجة الحرارة.

* يتم إطلاق غازات عن طريق التفاعلات النووية في الوقود مما يزيد في الضغط داخل قضبان الوقود.

* يزداد إطلاق الغاز مع درجة الحرارة ومنه يوجد قيد تصميمي للسيطرة على الضغط العالي في قضبان الوقود، هذا القيد أكثر شدة من القيد بأن تكون T_M أقل من درجة حرارة انصهار الوقود.

II-2-2- نقل الحرارة إلى المبرد:

لنقل الحرارة إلى المبرد من أجل توزيع درجة الحرارة في قلب المفاعل يتم إعطاء تدفق الحرارة $\dot{q}$ من قضيب الوقود إلى المبرد لكل وحدة مساحة سطح قضيب الوقود بواسطة $\frac{Q}{p}$ حيث P هو محيط المقطع العرضي لقضيب الوقود [22]. أسهل طريقة لربط الاختلافات في درجة الحرارة في سائل التبريد إلى تدفق الحرارة هي عن طريق تحديد معامل نقل الحرارة h .

$$\dot{q} = \frac{Q}{p} = h(T_s - T_c) \quad \dots\dots\dots (8-II)$$

حيث يكون T_s و T_c على التوالي هما درجة الحرارة المحلية لسطح خلية الوقود ودرجة حرارة سائل التبريد المحلي بعيداً عن هذا السطح. ومع هذا فإن المعامل h هو دالة معقدة لخصائص نقل المبرد وهندسة قناة المبرد.

للتعبير عن هذه الدالة يتم إدخال معامل نقل حرارة Nu يعرف hD_h/K_L حيث D_h هو القطر الهيدروليكي لقناة التبريد و K_L هي الموصلية الحرارية للمبرد ولتدفق القناة Re بواسطة

$$Re = \frac{\rho_L U D_h}{\mu_L}$$

حيث U هو متوسط سرعة سائل المبرد و ρ_L و μ_L هما كثافة ولزوجة المبرد. يتم تعريف P_r بواسطة العلاقة التالية:

$$P_r = \frac{\mu_L C_p}{K_L}$$

حيث C_p هي الحرارة النوعية للمبرد. يتبين أن Nu هي دالة لكل من Re و P_r تتغير هذه العلاقة اعتماداً على ما إذا كان P_r كبيراً أو صغيراً و تدفق القناة صفحياً أم مضطرباً. العلاقات العامة هي على الشكل:

$$Nu = C P_r^{C_1} Re^{C_2}$$

حيث C و C_1 و C_2 هي ثوابت [24]. للتبسيط تكون h ثابتة في حالة عدم وجود الغليان كما تكون متجانسة طوال قلب المفاعل.

والخطوة التالية هي تقسيم تدفق سائل التبريد عبر قلب المفاعل إلى معدل تدفق للحجم $\dot{V}$ مرتبط بكل قضيب وقود فردي. وهذا يتدفق من خلال القلب ويستقبل الحرارة من قضيب الوقود بمعدل Q_{dz} لطول العنصر dz . ونتيجة ارتفاع درجة الحرارة المبرد على هذا الطول هو dT حيث

$$Q = \frac{dT}{dz} \rho_L \dot{V}_{cp} \quad \dots\dots\dots (9-II)$$

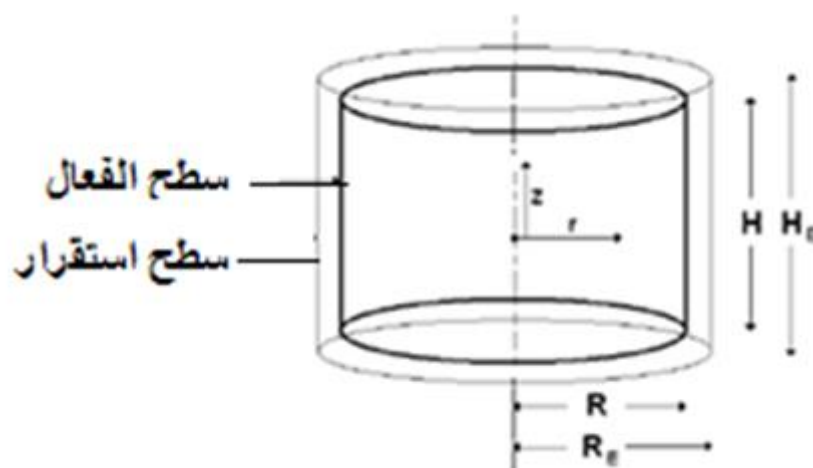
من أجل الحصول على توزيع درجة الحرارة على طول قناة التبريد من الضروري مكاملة العلاقة (9-II) للقيام بذلك نحتاج إلى تغيير Q مع z وهذا يتناسب تقريباً مع اختلاف تدفق النيوترون مع z . يختلف توزيع التدفق النيوتروني أيضاً مع الموقع العرضي r داخل قلب المفاعل، كما يعتمد على مدى إدخال قضيب التحكم [23].

3-II- توزيعات درجة الحرارة الأساسية:

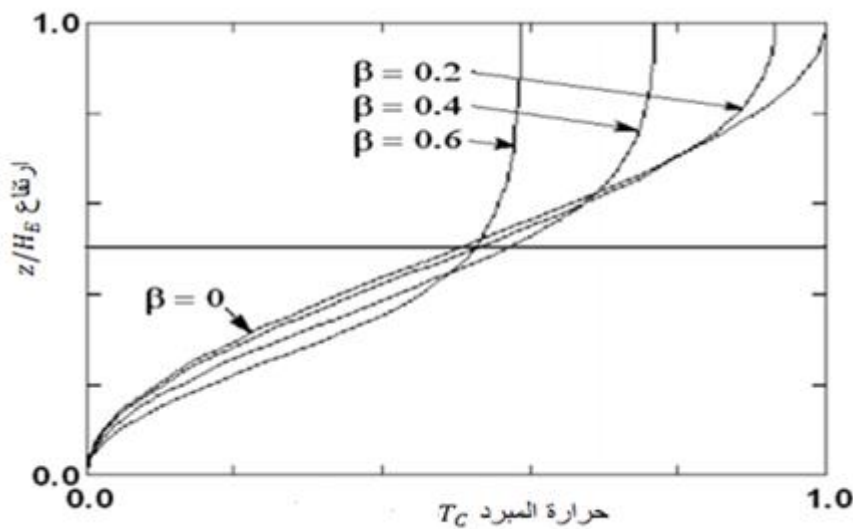
لتوزيع درجة الحرارة في قلب المفاعل، نفترض مفاعل أسطواني متجانس بدون عاكس وبدون إدخال قضبان التحكم. تدفق النيوترونات له الصيغة $Q \propto \phi$ ، وبالتالي سيتم إعطاء Q بواسطة:

$$Q = Q_M \cos\left(\frac{\pi z}{H_E}\right) J_0\left(\frac{2.405r}{R_E}\right) \quad \dots\dots\dots (10-II)$$

حيث يكون الثابت Q_M هو القيمة القصوى في مركز قلب المفاعل. لاحظ للاستخدام في المستقبل أن متوسط تدفق الحرارة سيكون عندئذٍ حوالي $0.4Q_M$.



الشكل (3-II): رسم مفاعل إسطواني.



الشكل (4-II): توزيع درجة حرارة المبرد المحورية داخل مفاعل إسطواني.

الخطوط الصلبة: $\beta = 0$ هو مفاعل متجانس وخطوط $\beta = 0.2, 0.4$ و $\beta = 0.6$ هي لإدخالات مختلفة لقضبان التحكم المقابلة لتدفق النيوترون (بالنسبة لحالة $H_E / R_E = 2.0$ و $L_2 / R_E = 0.36$)، مع استبدال المعادلة (10-II) في المعادلة (9-II) وبالتكامل تصبح درجة حرارة المبرد T_C داخل قلب المفاعل [22].

$$T_C = T_{CI} + \frac{Q_{MH_E}}{\pi \rho_L \dot{V}_{cp}} J_0\left(\frac{2.405r}{R_E}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\pi z}{H_E}\right) \right] \dots\dots\dots (11-II)$$

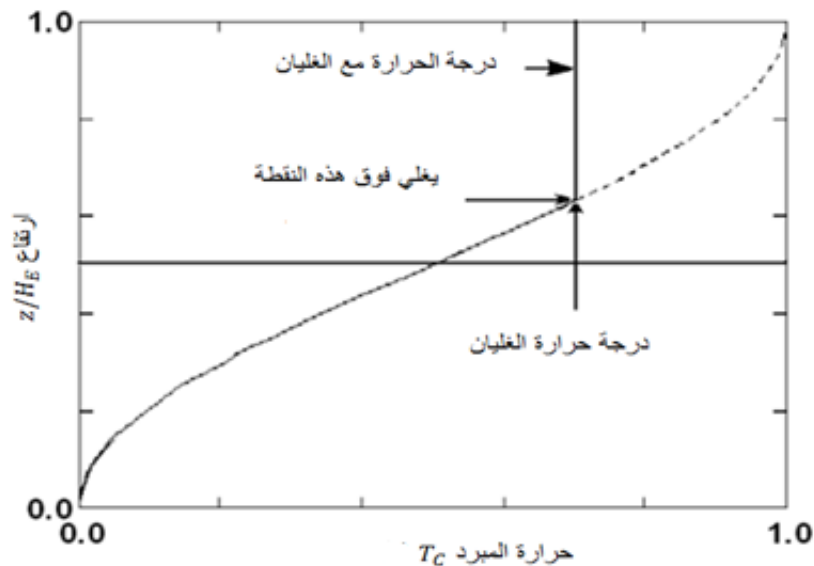
حيث T_{CI} هي درجة حرارة مدخل المبرد. يظهر شكل توزيع درجة الحرارة هذا على طول خط مركز قلب المفاعل ($r=0$) المسمى $\beta = 0$ في الشكل (3-II). ويمكن إجراء عمليات دمج مماثلة بسهولة لتوزيعات تدفق النيوترونات في مختلف إدراجات قضبان التحكم، كما تم إدراج ثلاثة أمثلة أيضا في الشكل (3-II). لاحظ أن ارتفاع درجة الحرارة في الجزء العلوي من القلب ينخفض بسبب انخفاض إنتاج الحرارة في ذلك الجزء من المفاعل. من المهم التأكيد على أنه حتى في حالة عدم الغليان فإن هذه الحسابات الخاصة بتوزيع درجة الحرارة المحوري تكون فقط ذات صلاحية محدودة للغاية.

4-II- مفاعل الماء المغلي:

4-II-1- توزيع درجة الحرارة داخل مفاعل الماء المغلي:

إذا وصلت درجة حرارة سائل التبريد إلى نقطة الغليان قبل قمة المفاعل فإن كل الحرارة المتولدة تقريباً ستدخل في الحرارة الكامنة لإنتاج البخار، وستظل درجة الحرارة أعلى من ارتفاع نقطة الغليان ثابتة تقريباً كما هو موضح في الشكل (5-II) (التكليف من الشكل 4-II). ويرجع ذلك إلى تغير صغير في الضغط وبالتالي يصبح المائع متعدد الأطوار عند نفس درجة الحرارة والضغط بينما تزداد جودة تدفق البخار x مع الارتفاع.

سيستمر هذا الثبات النسبي للضغط ودرجة الحرارة حتى يتبخر كل السائل. إذا تم الوصول إلى تدفق الحرارة الحرج وغليان الماء سترتفع درجة حرارة قضيب الوقود بسرعة وقد يحدث الانهيار [21].



الشكل (II-5): توزيع درجة حرارة سائل التبريد المحوري بسبب الغليان

فوق النقطة التي يبدأ عندها الغليان نفرض أنه لم يصل إلى تدفق الحرارة الحرج، فإن كل تدفق الحرارة من قضبان الوقود Q يتم تحويله إلى حرارة كامنة يكون صحيحاً تقريباً. فإن معدل الزيادة في جودة الكتلة $d\mathcal{K}/dz$ في تدفق سائل التبريد سيتم إعطاؤه بواسطة:

$$\frac{d\mathcal{K}}{dz} = \frac{Q}{\dot{m}\mathcal{E}} \quad \dots\dots\dots (12-II)$$

حيث $\dot{m}$ هو معدل تدفق الكتلة لكل قضيب وقود (يساوي $\dot{V}\rho_L$ تحت نقطة الغليان) و $\mathcal{E}$ هي الحرارة الكامنة للسائل المبرد [20]. وبما أن درجة الحرارة والضغط لا يتغيران بشكل كبير فوق نقطة الغليان فإن الحرارة الكامنة $\mathcal{E}$ ثابتة أيضاً نسبياً يمكن كتابة المعادلة (II-12) في الشكل:

$$\mathcal{K} = \frac{1}{\dot{m}\mathcal{E}} \int_{z_B}^z Q dz \quad \dots\dots\dots (13-II)$$

حيث z_B هو الارتفاع الذي يبدأ عنده الغليان وتكون جودة الكتلة هي صفر. إن معدل الزيادة جودة الكتلة يتناقص مع معدل تدفق الكتلة $\dot{m}$ ويزداد مع تدفق الحرارة Q .

II-4-2- توزيع جودة الكتلة والفراغ:

الغليان في قنوات التدفق يغير من خصائص السائل وهذا بدوره سيغير تدفق الحرارة. فإنه من الضروري إجراء حسابات للنيوترونات والتدفق متعدد الأطوار من أجل تحديد تدفق الحرارة وظروف التدفق على مرحلتين بشكل صحيح في منطقة الغليان. يجب أن يأخذ في الاعتبار أن الحل يبدأ بشكل تكراري من توزيع تدفق الحرارة

الذي يحدث في غياب الغليان كما هو مبين في الشكل (6-II) [24]. هذا من شأنه أن ينطوي على درجة حرارة سائل التبريد التي يمثلها الخط الصلب على يسار موقع الغليان في الرسم البياني الثاني.

من المفترض أنه عندما يصل هذا إلى درجة حرارة البخار المشبع عند ضغط سائل التبريد، يبدأ الغليان وتبقى درجة الحرارة بعد ذلك عند درجة حرارة البخار المشبع (بما أن الضغط يتناقص مع الارتفاع بسبب مزيج من انخفاض الضغط الهيدروستاتي وانخفاض الضغط الاحتكاكي قد تنخفض درجة حرارة البخار المشبع قليلاً كما هو موضح في الشكل (6-II)). في الوقت الحاضر سيتم افتراض أن تدفق الحرارة الحرج (CHF) لا يتم الوصول إليه في قلب المفاعل، وإلا فإن درجة الحرارة سوف تبدأ في الارتفاع بشكل كبير كما رسمها الخط المتقطع في الرسم البياني الثاني من الشكل (6-II).

الخطوة التالية هي مكاملة تدفق الحرارة باستخدام المعادلة التالية للحصول على جودة الكتلة كدالة للارتفاع كما هو موضح في الرسم البياني الثالث من الشكل (6-II)

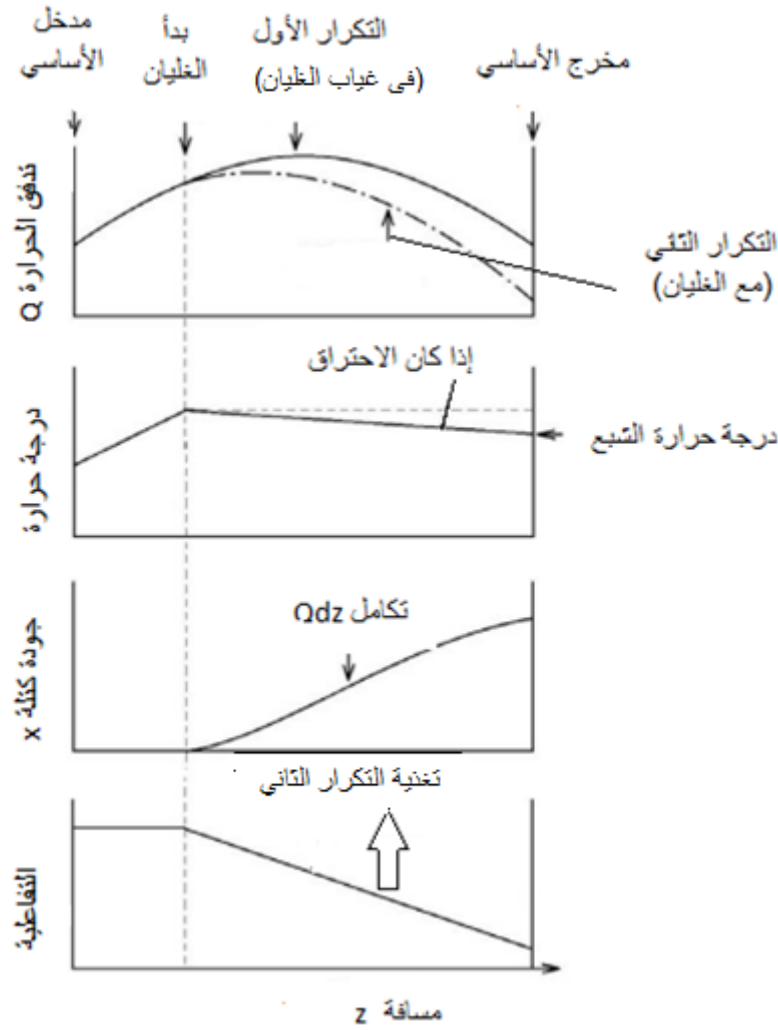
$$P=2RQ_{\alpha v}N_f \dots\dots\dots (14-II)$$

حيث P الطاقة الحرارية المولدة من القلب و N_f هو عدد قضبان الوقود من نفس ارتفاع المفاعل و $Q_{\alpha v}$ متوسط تدفق الحرارة لكل وحدة طول قضيب الوقود في متوسط حجم المفاعل.

نلاحظ أن جودة الكتلة α ستبدأ عند الصفر عند النقطة الغليان وأن المنحدر ما بعد تلك النقطة سوف يختلف مثل تدفق الحرارة Q. وبعدها استخلاص الكسر الفراغ α من تدفق مرحلتين مع معرفة جودة الكتلة α هذه خطوة أكثر تعقيداً. العلاقة بين α و N_f تضمن سرعة المرحلتين وقد تكون مختلفة تماماً، من الضروري حساب الكسر الفراغي لأن الكسر الفراغي يغير خصائص الاعتدال للمبرد [21]. سوف تنخفض التفاعلات المحلية مع زيادة α وبالتالي ستأخذ الشكل النوعي المرسوم في أدنى رسم بياني في الشكل (6-II).

لكن هذا التغير في التفاعل يعني أن تدفق الحرارة سيكون مختلفاً عن الذي تم افتراضه في بداية الحساب. لذلك يحتاج التكرار الثاني إلى البدء بتدفق حراري معدل، يتم تحديده باستخدام التفاعل الجديد والمصحح. سيؤدي ذلك إلى انخفاض تدفق الحرارة فوق نقطة بداية الغليان وتكرار عدة مرات حتى الوصول إلى حالة متقاربة.

إن التدفق على مرحلتين يغير معامل انتقال الحرارة h، الذي يتحكم في تدفق الحرارة من قضبان الوقود إلى المبرد. تحت هذه الظروف ستتغير العلاقة بين N_u و R_e و P_r وهذا سيغير درجة الحرارة في قضيب الوقود. هذا التعقيد يحتاج أيضاً إلى أن يؤخذ في الاعتبار في الحساب أعلاه [23].



الشكل (II-6): العلاقة بين تدفق الحرارة Q من الارتفاع داخل قلب مفاعل الماء المغلي ودرجة حرارة سائل التبريد، جودة الكتلة والتفاعلية.

II-5- تدفق الحرارة الحرجة:

من المفترض أنه لم يتم الوصول إلى ظروف التدفق الحرجي الحرجة ودرجات الحرارة داخل المفاعل. في الواقع يتم الاهتمام بالحفاظ على درجة حرارة أقل من تلك درجات الحرارة أثناء التشغيل العادي لمفاعل الماء المغلي. بما أن الحادث المفترض في PWR أو BWR أو أي مفاعل آخر فإن مبرد سائل التبريد قد يؤدي إلى تحسين الغليان، يجب إجراء تحليلات مماثلة لتلك الموضحة في الأقسام السابقة للتنبؤ بتطور مشاكل الحادث. إذا كان الاحتراق والحرارة الحرجة شروط تحدث في بعض الارتفاع داخل الأساسية هذا من شأنه يزيد من تعديل الشروط الموضحة [22].

سوف ترتفع درجة حرارة سائل التبريد ودرجة حرارة الوقود أعلى من موقع الارتفاع بسرعة كما أن جودة الكتلة للمبرد سوف تقترب من الوحدة. ولكن هذا من شأنه أن يؤدي إلى انخفاض آخر في التفاعلية وبالتالي

في توليد الحرارة المحلية داخل الوقود. في حالة وقوع حادث فقدان المبردات أو LOCA، فإن انخفاضاً في معدل تدفق سائل التبريد m سيؤدي إلى تحسين معدل الزيادة في جودة الكتلة (كما هو موضح في المعادلة (14-II)) من شأنه أن يعزز من حدوث الإرهاق. بسبب احتمالية تلف قضيب الوقود والانهيار. في مثل هكذا مشاكل من المهم جداً أن نكون قادرين على التنبؤ بتطور مثل هذا الحدث. إن الوصف أعلاه لكيفية المضي قدماً في هذا الحساب لا يؤدي إلا إلى الإشارة إلى حساب التدفق المعقد متعدد الأطوار الذي ينطوي على ذلك [24].

II-6- خلاصة:

خلال هذا الفصل تناولنا كيفية إنتاج الحرارة في مفاعل نووي، وبيننا أن مصدر الحرارة ناتج من التفاعلات الانشطارية التي تحدث داخل قلب المفاعل. ثم تطرقنا إلى دراسة نقل الحرارة داخل قضيب الوقود وحيد ثم توسعنا تدريجياً إلى كامل القلب فوجدنا أن الاختلافات العالية في درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة الكفاءة الحرارية وهي تتناسب مع Q وتكون هذه الاختلافات مقيدة بين درجة الانصهار الوقود ودرجة غليان المبرد، وبعدها عرجنا إلى توزيعات درجة الحرارة الأساسية في قلب مفاعل.

الفصل الثالث

النتائج والمناقشة

III-1- مقدمة:

في هذا الفصل سنقوم بعرض النتائج وتحليلها والتي تم الحصول عليه باستعمال محاكي الوكالة الدولية للطاقة النووية لمفاعل ماء مغلي تقليدي، حيث تم التركيز على الخصائص الهيدروحرارية لمفاعل BWR.

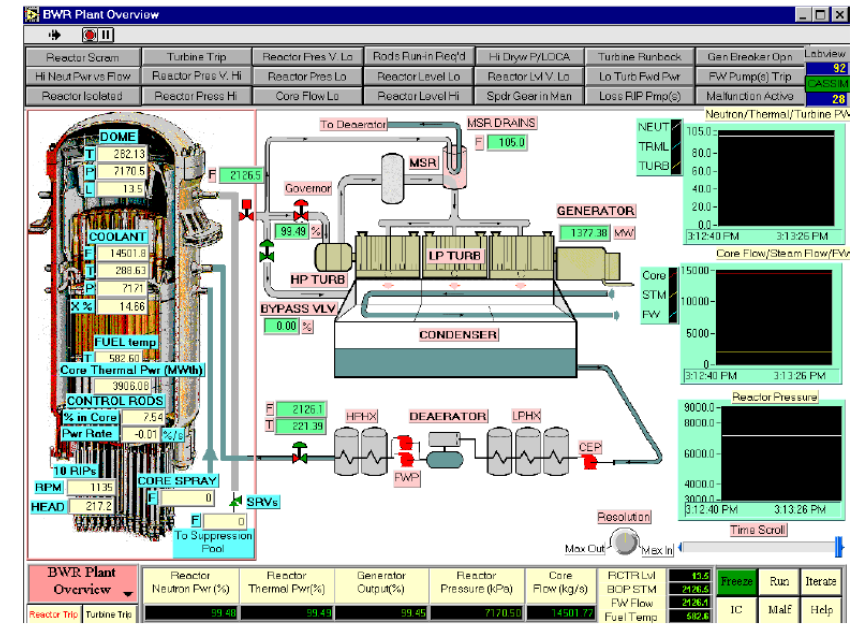
III-2- برنامج IAEA Generic BWR Simulator:

لقد طورت شركة CTI (Cassiopeia Technologies Inc) الكندية في 2008-2009 مفاعل الماء المغلي BWR المزودة بمحاكاة أنظمة السلامة لتلبية أهداف الوكالة الدولية للطاقة الذرية المتمثلة في التدريب والتعليم في مجال التكنولوجيا النووية. تعمل الوكالة الدولية للطاقة الذرية على تطوير ونشر مجموعة من أجهزة المحاكاة الأساسية القائمة على جهاز الكمبيوتر بما في ذلك تنظيم الدورات التدريبية [25، 26].

توفر أجهزة المحاكاة هذه تدريباً فعالاً على التصميمات الفيزيائية والهندسية لأنواع المفاعلات المختلفة. تعمل أجهزة المحاكاة على أجهزة الكمبيوتر الشخصية (PC) ويتم توفيرها للمهنيين التقنيين والطلاب والمدرسين كأداة تعليمية تمهيدية. يمكن لأعضاء هيئة التدريس المهتمين بتطوير دورات الهندسة النووية في جميع أنحاء العالم أن يجدوا في محاكيات الوكالة أدوات عملية فعالة.

إن الغرض من محاكاة NPP لمفاعل الماء المغلي الذي تبلغ قدرته 1300 MW هو تعليمي أي توفير أداة تعليمية لأساتذة الجامعات لتدريس مواضيع في الطاقة النووية. قد يجد العلماء النوويون في الصناعة النووية أن هذه المحاكاة مفيدة في توسيع فهمهم لديناميكيات BWR NPP، للعمل بشكل أساسي في الوقت الفعلي والحصول على استجابة ديناميكية مع الدقة الكافية لتوفير استجابات محطة BWR أثناء العمليات العادية وحالات الحوادث [3].

يتم التفاعل بين المستخدم والمحاكي أثناء تشغيل منشأة BWR عبر مجموعة من شاشات العرض ولوحة المفاتيح وأجهزة التحكم. تمثل مراقبة المعلومات وضوابط تشغيل المصنع بطريقة متطابقة تقريباً على جهاز المحاكاة. كان التركيز في تطوير نماذج المحاكاة على إعطاء المستوى المطلوب من الواقعية للمستخدم. وهذا يعني أن تكون قادرة على عرض جميع معلومات المصنع المهمة لتشغيل الوحدة، بما في ذلك المعلومات التي تميز أنظمة التحكم والحماية الرئيسية. المحاكي الحالي قادر على الاستجابة لظروف التشغيل العادية وكذلك للعديد من الأعطال.

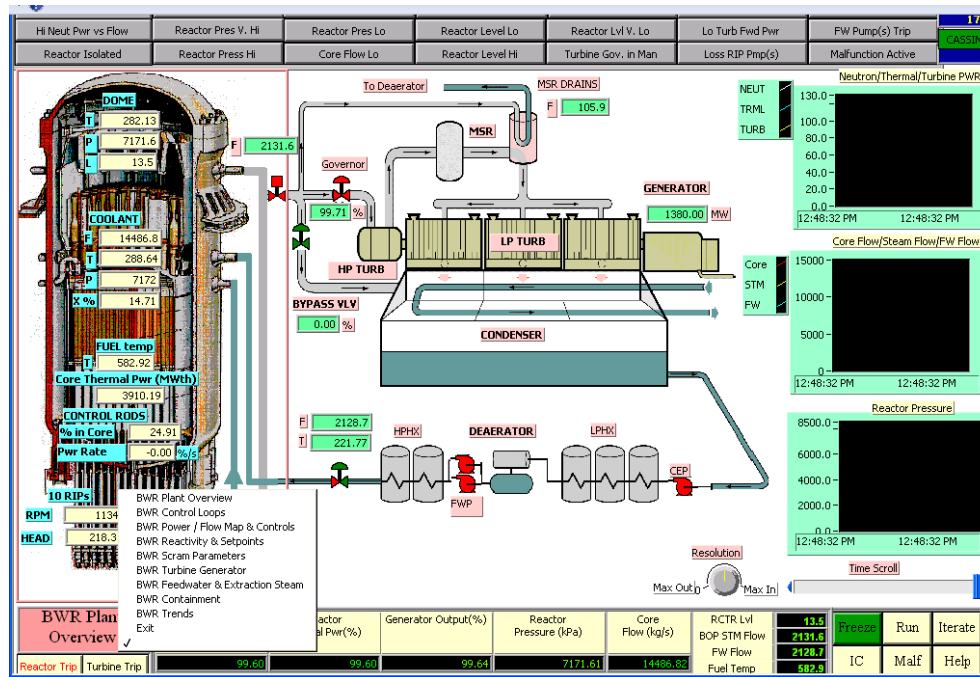


الشكل (1-III): نظرة عامة على محطة BWR

1-2-III- قائمة شاشات عرض المحاكاة BWR:

يحتوي جهاز محاكاة BWR على تسع شاشات عرض تفاعلية تغطي نظرة عامة على المنشأة:

- (1) نظرة عامة على المنشأة BWR.
- (2) دوائر التحكم BWR.
- (3) القدرة / خريطة التدفق والتحكم BWR.
- (4) التفاعلية ونقاط الضبط BWR.
- (5) معلمات سكرام BWR.
- (6) مولد التوربينات BWR.
- (7) تغذية المياه واستخراج البخار BWR.
- (8) الحاوية BWR.
- (9) اتجاهات BWR.



الشكل (2-III): توضيح صورة قائمة شاشات عرض المحاكاة BWR

III-2-2- مبدأ عمل المحاكاة BWR:

يفترض أن المستخدم على دراية بالخصائص الرئيسية لمحطات الطاقة النووية الحرارية التي يتم تبريدها بالماء، وكذلك فهم الميزات الخاصة بـ BWR وهذا باتباع الخطوات التالية:

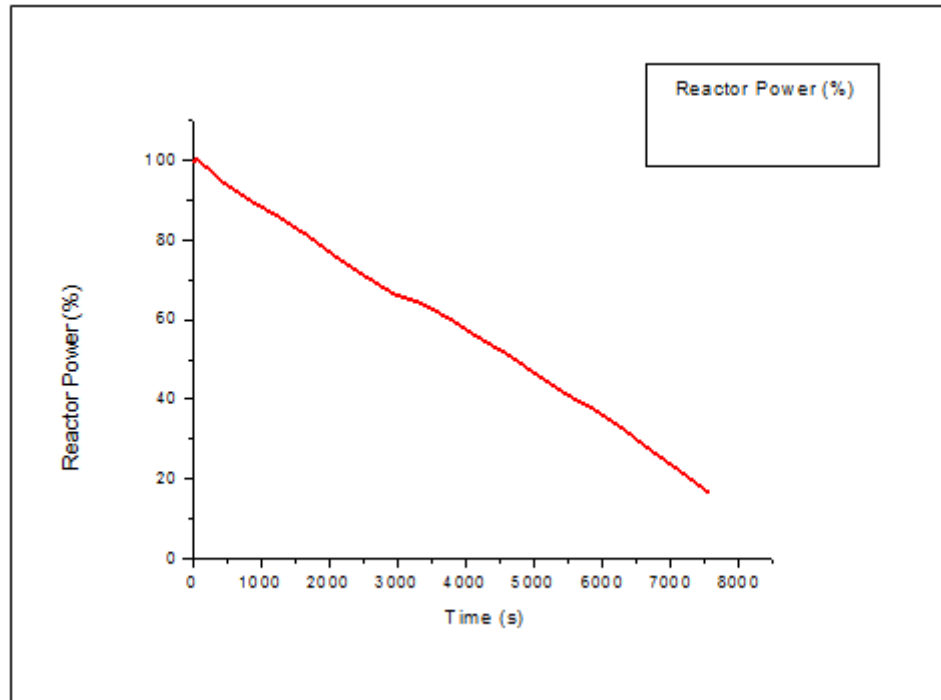
- يحدد البرنامج 'BWR' للتنفيذ - الملف القابل للتنفيذ هو BWR.exe
- النقر في أي مكان على شاشة "BWR simulator"
- انقر فوق "موافق" "تحميل كامل الطاقة IC؟"
- سيعرض جهاز المحاكاة شاشة "نظرة عامة على المنشأة" مع جميع المعلومات التي تمت تهيئتها بالنسبة لـ 100% من الطاقة الكاملة.
- في أسفل الزاوية اليمنى، انقر فوق "تشغيل" لبدء تشغيل جهاز المحاكاة.

نظرًا لحقيقة أن الإصدار BWR Simulator يشتمل على ذاكرة تخزين مؤقتة مكثفة للاحتفاظ بسجل الاتجاهات، يلزم بعض الوقت لتهيئة البيانات عند تحميل جهاز المحاكاة لأول مرة. لتسريع هذه العملية، يوصى بعد أن يتم تحميل المحاكاة لأول مرة وعرض "شاشة نظرة عامة على المنشأة"، أولاً "RUN" المحاكاة لبضع ثوان، ثم "LOAD 100% IC؟" مرة أخرى، قبل التشغيل جهاز محاكاة.

III-3- النتائج:

لدراسة الخصائص الهيدروحرارية لمفاعل BWR أثناء عملية تشغيل عادي، قمنا باختيار عملية تشغيل فإطفاء للمفاعل في الظروف العادية باختيار نسبة تناقص للطاقة تقدر بـ 5% ومتابعة التغيرات الهيدروحرارية الحادثة في مختلف أجزاء المفاعل كالحرارة والضغط وتدفق المياه.

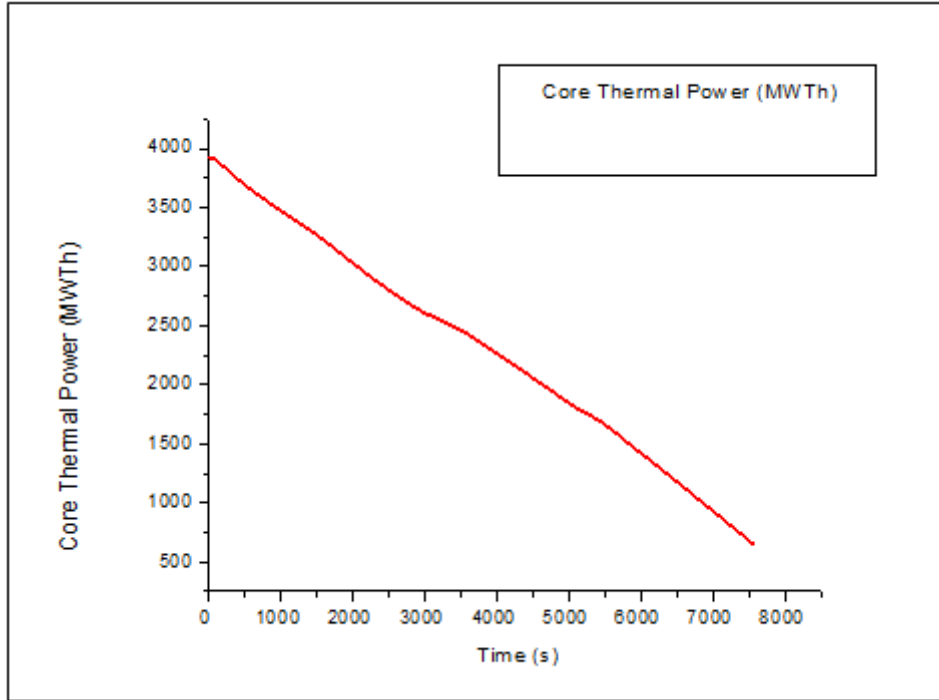
III-3-1- تغير طاقة المفاعل بدلالة الزمن:



الشكل (III-3): منحنى طاقة المفاعل بدلالة الزمن

وهي التي نعتمد عليها في دراستنا هذه ونلاحظ هنا أن الطاقة تتناقص بالفعل من 100 % إلى حوالي 16% أنظر الشكل (III-3) هذا التناقص مرتبط بالتناقص في الطاقة الحرارية الموضحة في الفقرة القادمة.

III-3-2- تغير الطاقة الحرارية بدلالة الزمن:

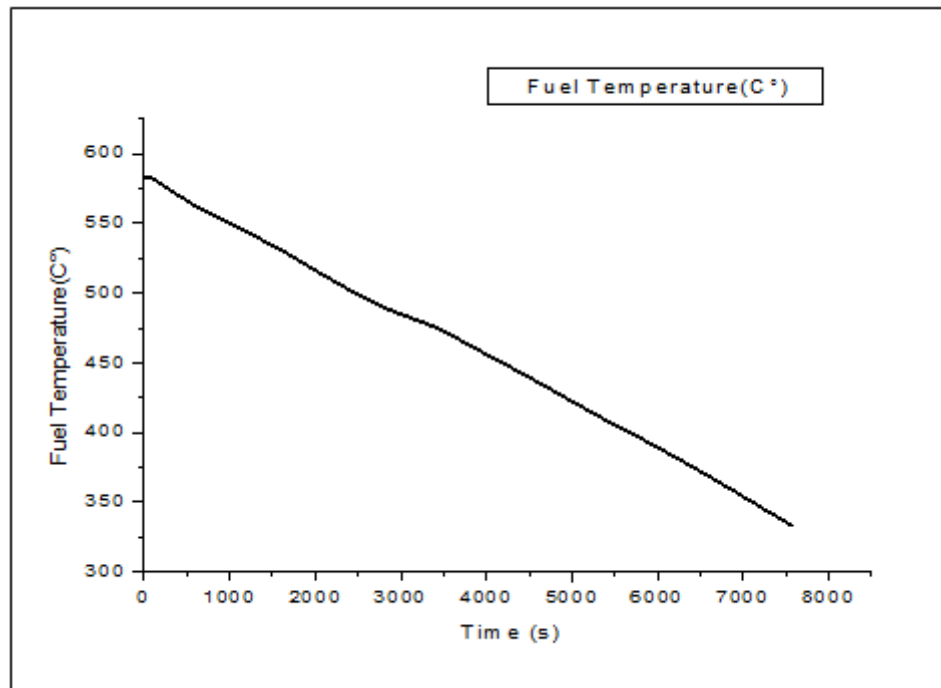


الشكل (III-4): منحنى الطاقة الحرارية مفاعل بدلالة الزمن

الطاقة الصادرة في المفاعل هي الطاقة الحرارية المنتجة في القلب المفاعل، الشكل (III-4) يمثل منحنى الطاقة الحرارية في المفاعل بدلالة الزمن حيث نلاحظ أن القيمة الابتدائية هي نفسها القيمة العظمى التي يمكن لهذا المفاعل إنتاجها والتي تقدر بـ 3900 MWth (تقابلها 100% في المنحنى) (III-3) وذلك حسب طاقة المفاعل والتدفق بداخله ونلاحظ انخفاض في الطاقة الحرارية إلى أدنى قيمة 646 MWth والتي يكون عندها المفاعل شبه متوقف.

إن هذه الطاقة هي المسؤولة عن إنتاج الكهرباء فيما بعد أي بعد تحويلها لطاقة كهربائية عن طريق مولدات البخار والتوربينات و ذلك يعتمد على حسب كفاءة الأجهزة (3900MWth $\leftarrow$ 1300 MWe) [33.1%] أي الطاقة الكهربائية المنتجة تنعدم عند (215.57MWth $\rightarrow$ 646,72 Mwe $\sim$).

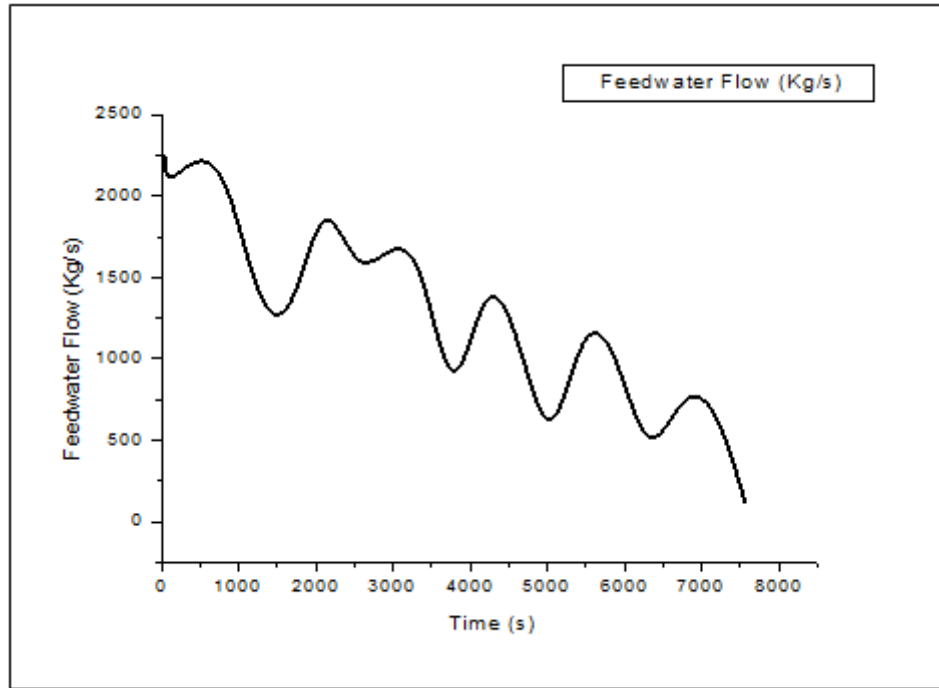
III-3-3- تغير درجة حرارة الوقود بدلالة الزمن:



الشكل (III-5): منحنى درجة حرارة الوقود بدلالة الزمن

الشكل (III-5) يمثل منحنى درجة حرارة الوقود بدلالة الزمن، وحيث أن التفاعلات النووية داخل الوقود والحرارة الناتجة عنه هي مصدر الطاقة الحرارية فإن عملية إطفاء المفاعل أي تناقص الطاقة الحرارية هي في الأصل تناقص في درجة حرارة الوقود، حيث نلاحظ أن أعلى قيمة لدرجة حرارة الوقود تكون 584.28°C ثم تأخذ في التناقص إلى أن تصل إلى أدنى قيمة وقدرها 333.58°C عند 7500 s ودرجة الحرارة هذه ناتجة عن النشاط الإشعاعي لمكونات الوقود التي تستمر في الانحلال بينما تتوقف عمليات الانشطار المسؤولة عن القدر الأكبر من الحرارة المنتجة.

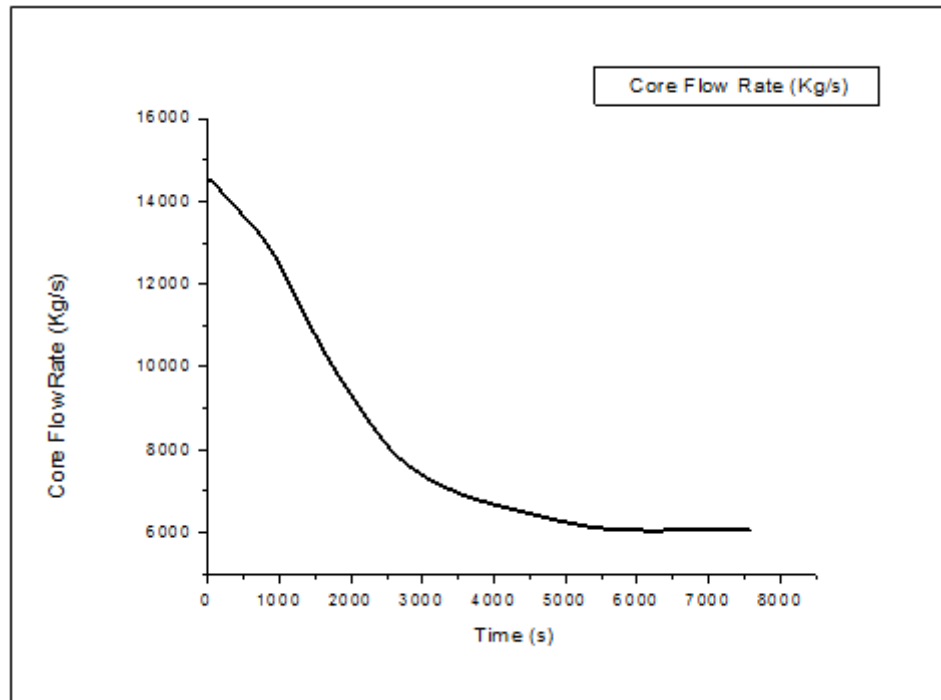
III-3-4- تغير تدفق مياه التغذية بدلالة الزمن:



الشكل (III-6): منحنى تدفق مياه التغذية بدلالة الزمن

مع انخفاض طاقة المفاعل فإن مياه التغذية تتناقص بشكل كبير تدريجي متناسب مع حرارة قلب المفاعل فمن قيمة تقدر بـ 2250 Kg/s عند طاقة (100%) تنخفض إلى حوالي 375 Kg/s . وتعمل هذه المياه على الحفاظ على الحرارة والضغط داخل المفاعل بشكل متوازن، هذا التناقص يأخذ شكل جيبي سعته تقدر بحوالي 500 Kg/s . هذا التذبذب راجع للفعل ورد الفعل بين الحرارة والضغط ونوعية المياه في المفاعل. في الأخير يؤول التدفق إلى الصفر (المفاعل متوقف) عند توقف التفاعلات تماما.

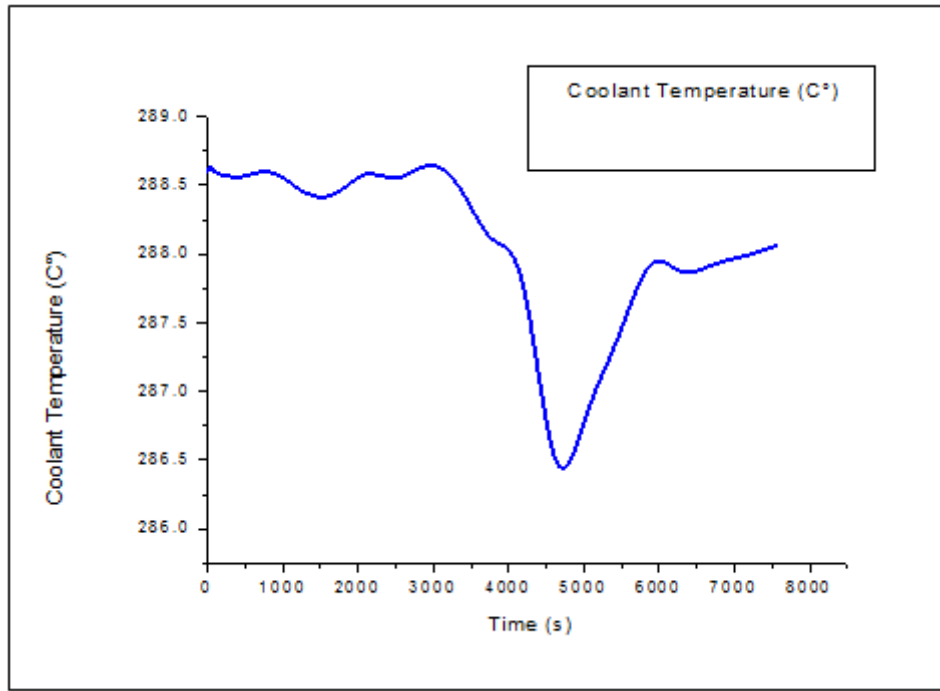
III-3-5- تغير معدل التدفق الأساسي بدلالة الزمن:



الشكل (III-7): منحنى معدل التدفق الأساسي بدلالة الزمن

الشكل (III-7) يمثل منحنى معدل التدفق الأساسي نلاحظ أن القيمة الابتدائية هي أعلى قيمة لمعدل التدفق حوالي 14500 Kg/s وهذا بسبب درجة حرارة الوقود ونلاحظ تناقص في معدل التدفق عن 5500s إلى أن يصل أدنى قيمة 6500 Kg/s . وهي تمثل التدفق الكلي في المفاعل ونلاحظ هنا أنه يتناقص بشكل تدريجي (أسي) وهذا متناسب بشكل كبير مع طاقة المفاعل وكما يبدو فهو يعمل بشكل جيد.

III-3-6- تغير درجة حرارة سائل التبريد بدلالة الزمن:

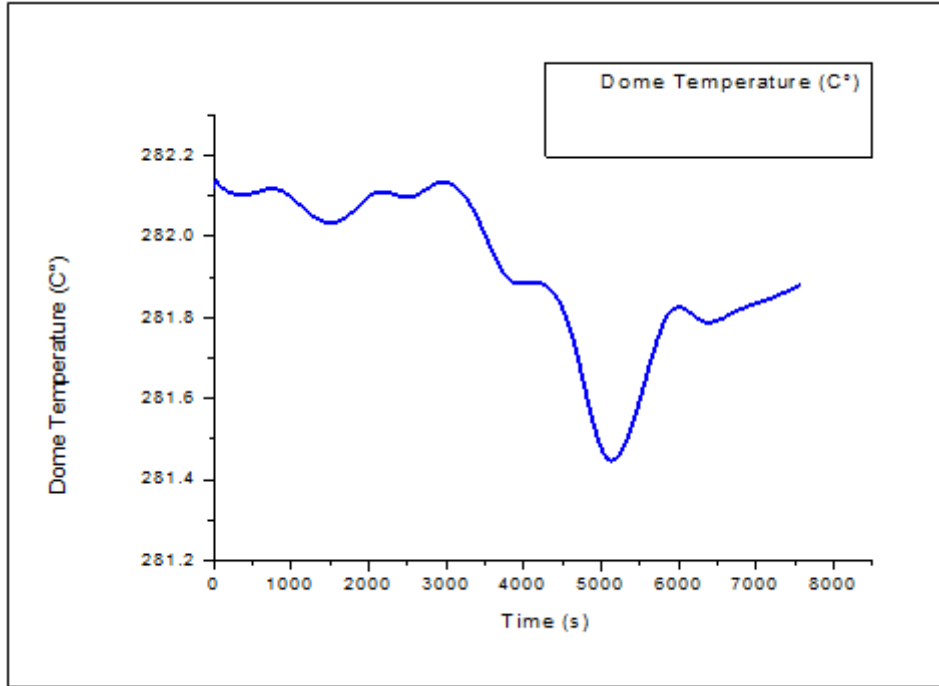


الشكل (III-8): منحنى درجة حرارة سائل التبريد بدلالة الزمن

الشكل (III-8) الذي يمثل منحنى درجة حرارة سائل التبريد بدلالة الزمن ومن خلال الشكل نلاحظ أن أعلى القيمة لدرجة الحرارة السائل هي القيمة الابتدائية ومقدارها بالتقريب 288.75 C° وتأخذ هذه القيمة في الارتياح والنقصان بدلالة الزمن وذلك حسب درجة حرارة الوقود والتدفق الحاصل بداخل مفاعل مما يجعل القيمة الابتدائية هي العظمى حيث نلاحظ انخفاض في درجة حرارة السائل عند 5000 s وهذا ما يدل على نقص درجة حرارة المفاعل حيث تصل درجة الحرارة حوالي 7030 KPa وهذه تعتبر القيمة الدنيا لدرجة حرارة والتي تكون عندها درجة حرارة مفاعل أقل قيمة. من خلال المنحنى نستنتج أن القيمة المتوسطة لدرجة حرارة سائل التبريد في حدود 7120 KPa .

درجة حرارة سائل التبريد مرتبطة بدرجة حرارة الوقود ومياه التغذية ونلاحظ أنها ثابتة تقريبا في حدود 288.5 C° لكنها تنخفض بشكل مفاجئ. لتصل أدنى مستوياتها 286.5 C° عند زمن 4600 s . وهذه القيمة توافق طاقة تقدر بـ 50% .

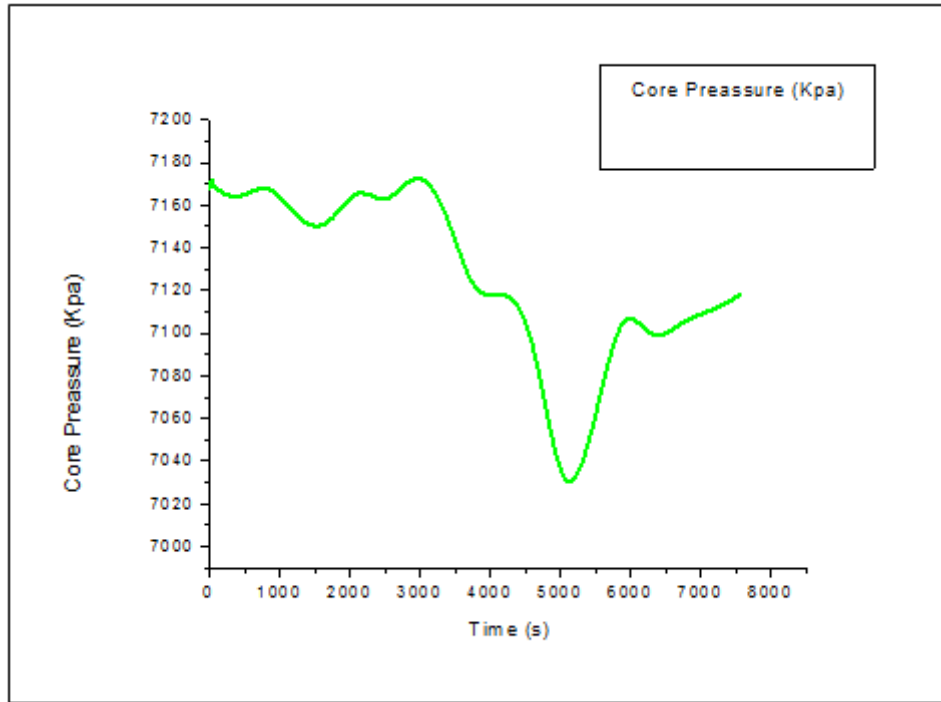
III-3-7- تغير درجة الحرارة في قبة المفاعل بدلالة الزمن:



الشكل (III-9): منحنى درجة الحرارة في قبة المفاعل بدلالة الزمن

وهي مرتبطة بدرجة حرارة السائل حيث نلاحظ تقريبا نفس الشكل مع فرق يقدر بحوالي 6°C . الشكل (III-9) يمثل منحنى درجة الحرارة في قبة المفاعل بدلالة الزمن حيث يعبر عن درجة حرارة البخار ومن خلال الشكل نرى أن القيمة الأعظمية لدرجة حرارة البخار هي القيمة الابتدائية والتي قيمتها بالتقريب 282.4°C وتأخذ هذه القيمة في الارتياح والنقصان بدلالة الزمن وذلك حسب طاقة المفاعل والتدفق الحاصل بداخله حيث قمنا بتشغيل المفاعل وردنا التدفق سنلاحظ انخفاض في درجة الحرارة وهذا ما يجعل القيمة الابتدائية هي العظمى ونلاحظ انخفاض كبير جدا في درجة الحرارة عند 5000 s وذلك لزيادة طاقة المفاعل حيث تصل درجة حرارة إلى 281.5°C وهذه تعتبر القيمة الدنيا لدرجة الحرارة والتي يكون عندها المفاعل يعمل بكل قدرته وتدفقه. ومن المنحنى نستنتج درجة حرارة متوسطة للبخار يجب أن تكون في حدود 281.9°C .

III-3-8- تغير الضغط الأساسي (ضغط القلب) في المفاعل بدلالة الزمن:

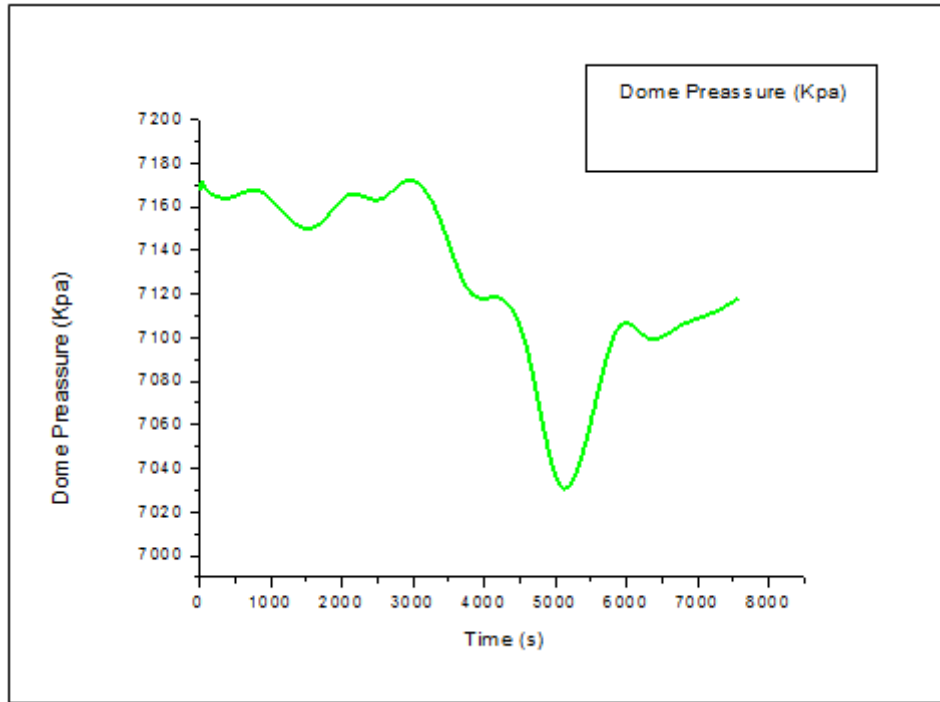


الشكل (III-10): منحنى ضغط الأساسي (ضغط القلب) مفاعل بدلالة الزمن

كما نلاحظ فإن شكل منحنى الضغط يأخذ نفس شكل منحنى حرارة سائل التبريد وهذا طبيعي فهو مستقر تقريبا مع اهتزازات خفيفة في قيمة تقدر بـ 7160 KPa ثم تنخفض إلى أدنى قيمة لها وهي 7030KPa عند 5100s وطاقة تقدر بـ 40%. أي بتأخر طفيف عن درجة الحرارة.

من خلال الشكل (III-10) الذي يتعلق بالضغط الأساسي بدلالة الزمن حيث يعبر هذا المنحنى عن الضغط الكلي الحادث داخل المفاعل بدلالة الزمن ومن خلال الشكل نرى أن القيمة الأعظمية للضغط (هي القيمة الابتدائية) ومقدارها بالتقريب 7170 KPa وتأخذ هذه القيمة في الارتياح والنقصان بدلالة الزمن وذلك حسب طبيعة عمل المفاعل والتدفق الحاصل بداخله حيث كما قمنا بتشغيل المفاعل وردنا التدفق سنلاحظ انخفاض على مستوى الضغط وهذا ما يجعل القيمة الابتدائية هي العظمى وذلك لعدم وجود أي مؤثرات على الضغط ونلاحظ انخفاض كبير جدا في الضغط عند 5000 s وذلك لزيادة عمل المفاعل وقيمة التدفق بداخله حيث يصل الضغط إلى حوالي 7030 KPa وهذه تعتبر القيمة الدنيا للضغط والتي يكون عندها المفاعل يعمل بكل قدرته وتدفقه. ومن خلال المنحنى نستنتج لكي يعمل المفاعل بقدرة متوسطة يجب أن يكون الضغط في حدود 7120 KPa.

III-3-9- تغير ضغط البخار في قبة المفاعل بدلالة الزمن:

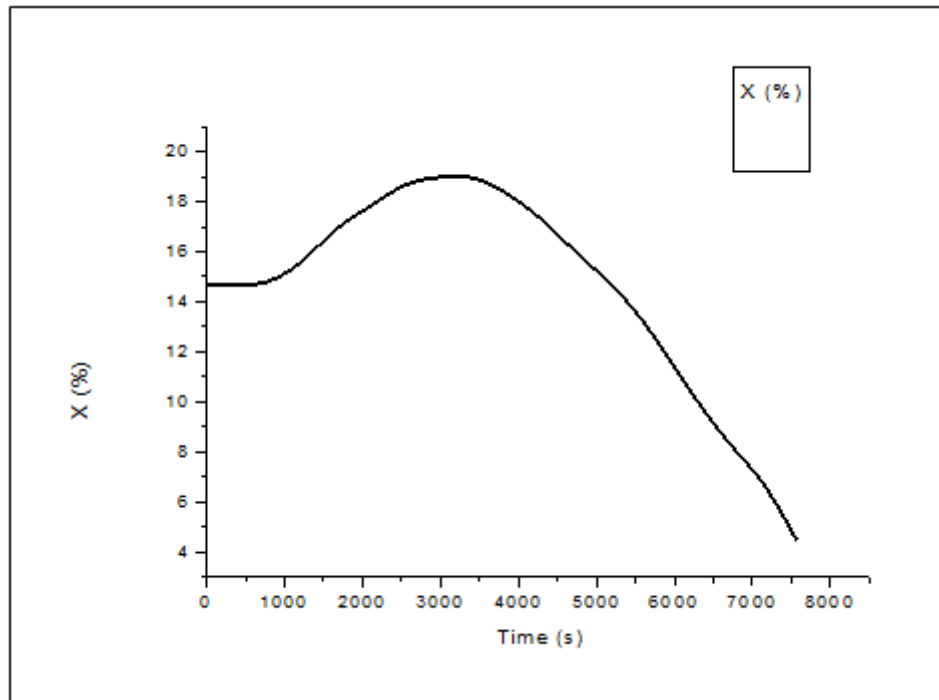


الشكل (III-11): منحنى ضغط في قبة المفاعل بدلالة الزمن

وهو نفسه تغير الضغط الأساسي أي أن الضغط نفسه في كامل أنحاء المفاعل وهو عموماً ضمن القيم المقبولة ولا تشكل خطراً على سلامة المفاعل.

الشكل (III-11) الذي يمثل منحنى ضغط القبة بدلالة الزمن حيث يعبر هذا المنحنى عن الضغط البخاري نلاحظ أن القيمة الأعظمية للضغط البخاري هي القيمة الابتدائية مقدارها حوالي 7170 KPa وتأخذ هذه القيمة في الارتياح والنقصان بدلالة الزمن وذلك حسب طبيعة التدفق الحاصل بداخل المفاعل حيث كما قمنا بتشغيل المفاعل وردنا التدفق سلاحظ انخفاض على مستوى الضغط وهذا ما يجعل القيمة الابتدائية هي العظمى وذلك لعدم وجود أي مؤثرات على الضغط ونلاحظ انخفاض كبير جداً في الضغط عند 5000 s وذلك لزيادة عمل المفاعل وقيمة التدفق بداخله حيث يصل الضغط إلى حوالي 7030 KPa وهذه تعتبر القيمة الدنيا للضغط والتي يكون عندها المفاعل يعمل بكل قدرته وتدفعه . ومن خلال المنحنى نستنتج حتى يعمل المفاعل بقدرة متوسطة يجب أن يكون الضغط في حدود 7120 KPa.

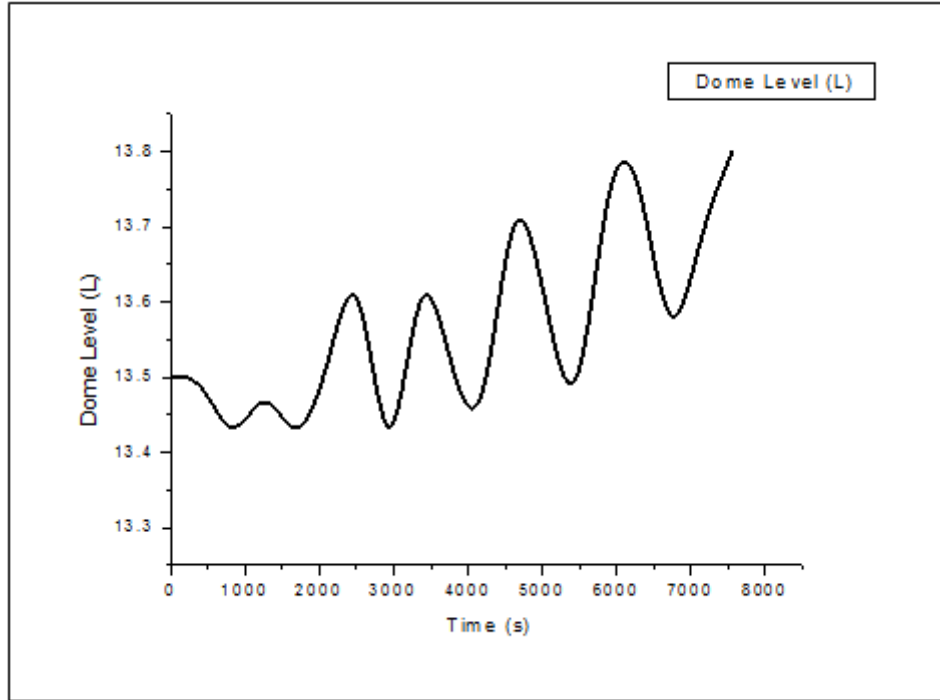
III-3-10- تغير جودة سائل التبريد عند مخرج بدلالة الزمن:



الشكل (III-12): منحنى جودة سائل التبريد عند مخرج بدلالة الزمن

الشكل (III-12) يمثل منحنى جودة سائل التبريد نلاحظ ثبوت في جودة سائل التبريد عند 14.8% خلال المدة الزمنية $[0-1000]$ s ، كما نلاحظ أيضا زيادة في الجودة سائل إلى أن تصل القيمة العظمى بقدرة 19% تقريبا وذلك عند 3500s هذا ما يعني أن جودة سائل تزيد بزيادة تدفق الحرارة، ومن ثم تتراجع بشكل كبير إلى أن تصل أدنى قيمة لها 4.5% عند 7500 s وذلك لأن معدل تدفق الكتلة يتناقص. وهي نسبة البخار من الماء وهذا البخار هو مسؤول عن توليد الطاقة الكهربائية. فكلما كان البخار أكثر كلما كانت الكهرباء المنتجة أكبر لكن لا يجب أن تزيد هذه النسبة في المفاعل الماء المغلي عن 20% حتى لا يتبخر كل السائل وينوب قلب المفاعل نتيجة الحرارة الكبيرة.

III-3-11- تغير مستوى الماء مفاعل بدلالة الزمن:



الشكل (III-13): منحنى مستوى الماء مفاعل بدلالة الزمن

مستوى السائل داخل المفاعل يتزايد في قيمة 13.5 L (عند طاقة 100%) إلى حوالي 13.8 L (عند طاقة 16%) وهذا طبيعي فكلما نقصت طاقة المفاعل وتناقصت الحرارة تقل نسبة البخار من السائل (الفقرة السابقة) إلى أن تنعدم (عدم إنتاج الحرارة) ويكون عندها المفاعل في حالة توقف عن النشاط. المنحنى عبارة عن تموجات (سعتها حوالي 0.2 L) وهي ناتجة عن التفاعل بسبب الحرارة. الضغط وتدفق المياه وهو طبيعي وضمن القيم المسموح بها.

III-4- خلاصة:

لقد توصلنا في دراستنا إلى أن طاقة المفاعل تتناقص بالتناقص الطاقة الحرارية وهي الطاقة مسؤولة عن إنتاج الكهرباء وكذلك التدفق الأساسي. إن تناقص مياه التغذية متناسب مع حرارة قلب المفاعل وتعمل المياه على الحفاظ على الحرارة والضغط داخل المفاعل.

الخاتمة عامة

الخاتمة عامة:

في هذه المذكرة عملنا على دراسة الخصائص الهيدرولوجية لمفاعل الماء المغلي الذي تم تصميم النماذج الأولى منه في الخمسينيات وبدأ تشغيلها بدءاً من أوائل الستينيات. منذ ذلك الوقت تم بناء العديد وتشغيلها بأمان في جميع أنحاء العالم. وهي تشكل الآن مصدراً كبيراً للكهرباء. على الرغم من التغييرات والتحسينات التي أدخلت على تصاميم BWR، إلا أن المفهوم الأساسي لم يتغير منذ تصميم BWR الأول الذي اقترحه شركة جنرال إلكتريك.

باستعمال محاكي الوكالة الدولية للطاقة النووية الذرية IAEA لمفاعل الماء المغلي BWR تقليدي، تم اعتماد سيناريو عملية إطفاء للمفاعل في ظروف تشغيل عادية حيث تم إنقاص الطاقة الكلية للمفاعل من قيمة 100% إلى ما يقارب 10% بمعدل 5% كل ثانية. وقد قمنا خلال هذه العملية بمتابعة تغيرات المعلمات الهيدرولوجية للمفاعل وهي الحرارة، الضغط والتدفق وما يتبعها من مستوى المياه وجودتها. فيما يخص الطاقة الحرارية المنتجة من المفاعل وكذا حرارة الوقود.

إن عملية إطفاء المفاعل هي عملية تخفيض التفاعلات النووية داخل قلب المفاعل بإنقاص تدفق النيوترونات على الوقود النووي، وبالتالي تناقص في التفاعلات النووية الأساسية أي الانشطار النووي وهي المسؤولة على الجزء الأكبر من إنتاج الحرارة وتبقى التفاعلات الأخرى (النشاط الإشعاعي لمكونات الوقود) والتي تكون كبيرة في الأول حيث أن نواتج الانشطار التي لها نصف العمر قصيرة تكون لها نشاط كبير لكنها سرعان ما تختفي لتبقى نواتج الانشطار الأخرى والتي لها أنصاف أعمار أكبر لكن كمياتها أقل. ولهذا نجد أن هناك دائماً حرارة باقية في المفاعل ناتجة عن النشاط الإشعاعي لنواتج الانشطار الباقية في الوقود التي لها أنصاف أعمار أكبر. وبالتالي فإننا نجد تناقص منتظم لدرجة حرارة الوقود يتبعه تناقص منتظم للطاقة الحرارية المنتجة وهي نتائج متوقعة.

إن الخصائص الهيدرولوجية في المفاعل مرتبطة بعضها ببعض. وبالتالي فإننا نجد أن تناقص حرارة الوقود يؤدي إلى تناقص مماثل في الطاقة الحرارية المنتجة داخل قلب المفاعل. أما تدفق التغذية فهو يعمل على أن تبقى حرارة المفاعل وضغطه ومستوى الماء وجودته في الحدود المقبولة لإنتاج الطاقة وللحفاظ على سلامة المفاعل.

إن متابعة الخصائص الهيدرولوجية للمفاعل يجب أن تكون بشكل متزامن ودقيق لتحقيق إنتاج دائم وآمن للطاقة والتدخل مباشرة عند ملاحظة أي خلل. لقد قمنا باختيار عملية واحدة وهي إطفاء عادي ونود في المستقبل أن نقوم بتعميم هذه العملية على سيناريوهات أخرى بما فيها دراسة الحوادث والأعطال.

الملاحق

الملحق A: البيانات BWR

بيانات المصنع العامة

1385	MW(e)	إنتاج الإجمالي لمحطة توليد الكهرباء
1300	MW(e)	إنتاج صافي لمحطة توليد الكهرباء
3926	MWth	الناتج الحراري للمفاعل
33.1	%	كفاءة صافية لمحطة توليد الكهرباء
28≈	°C	درجة حرارة ماء التبريد

نظام تزويد البخار النووي

1		عدد حلقات المبرد
2122	Kg/s	معدل تدفق البخار
2118	Kg/s	معدل تدفق المياه المغذية

نظام مبرد المفاعل

14502	Kg/s	معدل تدفق سائل التبريد الأولي
7.07	MPa	مفاعل ضغط التشغيل
287.8/7.07	°C/MPa	درجة حرارة / ضغط البخار
215.6	°C	درجة حرارة ماء التغذية
278	°C	درجة حرارة مدخل سائل التبريد الأساسي
288	°C	درجة حرارة مخرج سائل التبريد الأساسي
10	°C	ارتفاع درجة الحرارة

المفاعل الأساسية

3.710	m	ارتفاع الأساسية النشطة
9254	m ²	سطح نقل الحرارة في جوهر
159	t U	وزن الوقود

24.7 KW/K _g U	متوسط كثافة طاقة الوقود
50.6 KW/l	متوسط كثافة القدرة الأساسية
424 KW/m ²	تدفق الحرارة الحرارية F _q
273	ارتفاع إنتالبي F _H
4470 mm	طول إجمالي لقضيب الوقود (التجمع)
10 × 10	مجموعة قضيب مربعة
872	عدد مجموعات الوقود
92	عدد قضبان الوقود / التجمع
8	عدد الفواصل
شهر 24	طول دورة التشغيل (طول دورة الوقود)
> 50000 MW/t	متوسط حرق تفريغ الوقود [القدرة]
صلب إعادة بلورة Zr 2	مادة الغلاف أنبوب
0.66 mm	سمك الغلاف أنبوب
10.3 mm	القطر الخارجي لقضبان الوقود
300 Kg	الوزن الكلي للتجمع
181 Kg	وزن اليورانيوم / التجميع
3.810 mm	الطول الفعال لقضبان الوقود
205	عدد قضبان التحكم
B ₄ C وهافنيوم	المواد امتصاص
البورون	محلول نيوتروني قابل للذوبان

وعاء ضغط المفاعل

7100 mm	القطر الداخلي للذخيرة الأسطوانية
190 mm	سمك الجدار ذخيرة أسطوانية
21000 mm	الارتفاع داخل الكلي

مضخة إعادة تدوير المفاعل

1453	K_g/s	تصميم معدل تدفق الكتلة (في ظروف التشغيل)
0.287	MPa	رأس مضخة
800≈	KW	القدرة لمحرك المضخة (معدل التدفق)
≤1500	دورة في الدقيقة	سرعة المضخة (في الظروف المقدرة)

أنظمة مساعدة المفاعل

42.36	K_g/s	السعة تنظيف مفاعل الماء
253.8	MW	عند ضغط منخفض (100 درجة مئوية)

مصنع التوربينات

1	عدد التوربينات في المفاعل
1800	سرعة التوربينات دورة في الدقيقة

مولد كهرباء

1620	MVA	الطاقة المقدرة
1385	MW	الطاقة الفعالة

مكتف

124،170	m^2	مساحة نقل الحرارة
34.68	m^3/s	معدل تدفق مياه التبريد

مضخات المكثفات

435	K_g/s	معدل التدفق
-----	---------	-------------

مضخات مياه التغذية

1000	K_g/s	معدل التدفق
6	MPa	مضخة رأس
216	°C	درجة حرارة الماء المغذي (النهائي)

الملحق B: النتائج

في هذا الملحق سنقوم بتقديم النتائج التجريبية على شكل جداول

الجدول (B-1): تغيرات درجات الحرارة

	Time	Fuel Temperature	Coolant Temperature	Dome Temperature
Unit	(s)	(C°)	(C°)	(C°)
100%	0	584,04	288,6	282,12
100%	20	583,34	288,64	282,13
100%	40	583,05	288,64	282,14
100%	60	584,28	288,6	282,12
95%	420	568,73	288,53	282,09
90%	840	554,48	288,65	282,14
85%	1260	542,25	288,43	282,04
80%	1680	528,43	288,38	282,02
75%	2100	512,51	288,65	282,14
70%	2520	498,12	288,49	282,07
65%	2940	485,3	288,71	282,16
60%	3360	477,69	288,53	282,09
55%	3780	463,3	288	281,85
50 %	4200	449,68	288,13	281,91
45%	4620	435,62	286	281,82
40%	5040	420,89	286,92	281,35
35%	5460	406,36	287,35	281,55
30%	5880	393,54	288,09	281,89
25%	6300	378,96	287,8	281,76
20%	6720	364,41	287,94	281,82
15%	7140	348,68	287,98	281,84
10%	7560	333,58	288,06	281,88

الجدول (2-B): تغير التدفق الأساسي ومياه التغذية في المفاعل

	Time	Feedwater Flow	Core Flow Rate
Unit	(s)	(Kg/s)	(Kg/s)
100%	0	2052,6	14490,3
100%	20	2256,4	14492,5
100%	40	2255,6	14492,6
100%	60	2047,1	14490,8
95%	420	2250,5	13776,4
90%	840	2188	13061,7
85%	1260	1281,9	11585,6
80%	1680	1193,7	10132,2
75%	2100	2095,3	9077,7
70%	2520	1486,8	7988,9
65%	2940	1692,5	7421,3
60%	3360	1692,6	7041,9
55%	3780	571,3	6773,6
50%	4200	1590,6	6589,4
45%	4620	1163,2	6409,2
40%	5040	332,6	6224,3
35%	5460	1280,2	6101,2
30%	5880	1090,7	6052,7
25%	6300	314,6	6045,8
20%	6720	790,8	6061,2
15%	7140	789,1	6051,3
10%	7560	119,3	6053,1

الجدول (3-B): تغيرات الضغط والطاقة الحرارية

	Time	Core Thermal Power	Core Pressure	Dome Pressure
Unit	(s)	(MWTh)	(Kpa)	(Kpa)
100%	0	3925,35	7168	7168
100%	20	3916,34	7172	7171,9
100%	40	3912,64	7172	7172
100%	60	3928,46	7168	7167,6
95%	420	3724,27	7161	7161,3
90%	840	3534,12	7173	7172,9
85%	1260	3371,72	7152	7151,7
80%	1680	3186,35	7147	7147,2
75%	2100	2977,23	7172	7172,3
70%	2520	2789,74	7157	7157,3
65%	2940	2611,98	7179	7178,6
60%	3360	2515,95	7161	7161
55%	3780	2358,64	7112	7111,7
50%	4200	2175,11	7123	7123,4
45%	4620	2011,71	7104	7104,5
40%	5040	1815,18	7011	7011,4
35%	5460	1692,61	7052	7051,6
30%	5880	1471,05	7120	7120,2
25%	6300	1278,71	7093	7093,2
20%	6720	1064,31	7106	7106,5
15%	7140	859,91	7110	7109,6
10%	7560	646,72	7118	7117,7

الجدول (4-B): طاقة مفاعل وجودة الكتلة ومنسوب الماء

	Time	Reactor Power	X	Dome Level (L)
Unit	(s)	(%)	(%)	(M)
100%	0	99,98	14,7	13,5
100%	20	99,76	14,69	13,5
100%	40	99,66	14,7	13,5
100%	60	100,6	14,7	13,5
95%	420	94,86	14,65	13,5
90%	840	90,02	14,74	13,4
85%	1260	85,88	15,65	13,5
80%	1680	81,16	17,05	13,4
75%	2100	75,83	17,78	13,5
70%	2520	71,06	18,74	13,7
65%	2940	66,53	18,98	13,3
60%	3360	64,09	19,1	13,7
55%	3780	60,08	18,49	13,5
50%	4200	55,41	17,6	13,4
45%	4620	51,25	16,3	13,8
40%	5040	46,24	15,14	13,6
35%	5460	41,34	13,85	13,4
30%	5880	37,48	11,98	13,8
25%	6300	32,58	9,97	13,8
20%	6720	27,12	8,22	13,5
15%	7140	21,91	6,9	13,7
10%	7560	16,48	4,51	13,8

قائمة المراجع

قائمة المراجع

- [1] د. ضو سعد مصباح، أ.د. محمود نصر الدين، "مستقبل توليد الكهرباء بالطاقة النووية"، الهيئة العربية للطاقة الذرية، تونس، (2006).
- [2] د.مطوع الأشهب، "هندسة المفاعلات النووية الجزء الأول"، دمشق، المركز العربي للتعريف والترجمة، (1991).
- [3] Boiling Water Reactor Simulator with Active Safety Systems International Atomic Energy Agency, User Manua October (2011)
- [4] Wilson, R . Physics of liquid metal fast breeder reactor safety. Rev. Mod. Phys., **49**, No.4, 893-924 (1977).
- [5] Duderstadt, J.J. and Hamilton, L.J . Nuclear reactor analysis. John Wiley and Sons, New York (1976).
- [6] Todres, N.E. and Kazimi, M.S. Nuclear systems I. Thermal hydraulic fundamentals. Hemisphere Publ. Co (1990).
- [7] WNA (1). World Nuclear Association website. <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/PowerReactors/Appendices/RBMK-Reactors>
- [8] Cameron, I.R . Nuclear fission reactors. Plenum Press, New York & London (1982).
- [9] Collier, J.G. and Hewitt, G.F . Introduction to nuclear power. Hemisphere Publ. Co (1987).
- [10] WNA (2). World Nuclear Association website. <http://www.world-nuclear.org/info/nuclearfuel-cycle/power-reactors/nuclear-power-reactors/>
- [11] USNRC. Reactor safety study. An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Rep. WASH-1400 (1975).
- [12] CRBRP. Clinch river breeder reactor plant technical review. CRBRPPMC 76-06 (1976).
- [13] USAEC. The safety of nuclear power reactors (light water cooled) and related facilities. U.S. Atomic Energy Commission, Rep. WASH 1250 (1973).

- [14] Gregg King, C.D. Nuclear power systems. The Macmillan Company, New York (1964).
- [15] Mould, R.F. Chernobyl record: the definitive history of the Chernobyl catastrophe. Publ. Institute of Physics (2000).
- [16] Jones, O.C. and Bankhoff, S.G. (editors). Symposium on the Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety. Volume 2: Liquid Metal Fast Breeder Reactors. ASME, New York (1977b).
- [17] Lahey, R.T. Jr. The status of boiling water nuclear reactor safety analysis. In Jones, O.C. and Bankhoff, S.G. (1977).
- [18] Jones, O.C. and Bankhoff, S.G. (editors). Symposium on the Thermal and Hydraulic Aspects of Nuclear Reactor Safety. Volume 1: Light Water Reactors. ASME, New York (1977a).
- [19] Winterton, R.H.S. Thermal design of nuclear reactors. Pergamon Press (1981).
- [20] Gregg King, C.D. Nuclear power systems. The Macmillan company, New York (1964)
- [21] Rohsenow, W.M. and Hartnett, J.P. Handbook of heat transfer. McGraw- Hill Book Company (1973).
- [22] Tong, L.S. and Weisman, J. Thermal analysis of pressurized water reactors. American Nuclear Society monograph (1970).
- [23] Knief, R.A. Nuclear engineering: Theory and practice of commercial nuclear power. Hemisphere Pub. Corp (1992).
- [24] Todres, N.E. and Kazimi, M.S. Nuclear systems I. Thermal hydraulic fundamentals. Hemisphere Publ. Co (1990).
- [25] Dymola Multi-Engineering Modeling and Simulation. User Manual 5. fb. Lund. Dynssim AB. (2003).
- [26] Ernesto Kofman Francois E. Cellier. Continuous system simulation Springer Science + Business Media .Inc. (2006).

الملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة الخصائص الهيدروحرارية لمفاعل الماء المغلي BWR تقليدي وذلك باستعمال محاكي الوكالة الدولية للطاقة النووية IAEA، اعتمدنا على سيناريو إطفاء للمفاعل في ظروف تشغيل عادية حيث تم أنقاص الطاقة الكلية للمفاعل من قيمة 100% إلى ما يقارب 10% بمعدل 5%. قمنا بتتبع تغيرات الهيدروحرارية للمفاعل وتضمنت (الطاقة، الضغط، الحرارة ...إلخ).

أظهرت نتائج أن الخصائص الهيدروحرارية في المفاعل مرتبطة ببعضها البعض فإن نقص في حرارة الوقود يؤدي إلى نقص الطاقة الحرارية وهي بدورها مسؤولة عن تناقص طاقة المفاعل المتناسب مع التدفق الأساسي. فإن الضغط يبقى نفسه في كامل أنحاء المفاعل، أما مياه التغذية فهي متناسبة مع حرارة قلب المفاعل وتعمل هذه المياه على الحفاظ على الحرارة والضغط داخل المفاعل لإنتاج الطاقة وسلامة المفاعل.

الكلمات المفتاحية: مفاعلات النووية، مفاعل BWR ، الهيدروحرارية ، IAEA.

Abstract:

The objective of this work is to study the thermalhydraulic properties of a conventional BWR by using the IAEA simulator. We have relied on a scenario of extinguishing the reactor under normal operating conditions , where the total reactor energy has been reduced from 100% to about 10% at 5% .We have tracked the hydrothermal changes of the reactor and included (energy,pressure, heat,etc..)

The results shown that the thermalhydraulic propeties in the reactor are interrelated, as the decrease in fuel temperature leads to a decrease in the produced thermal energy, which in turn is responsible for decreasing the reactor's energy proportional to the primary flow. The pressure is the same in whole the reactor. Feeding water is proportional to the temperature of the reactor's heart. The water works to maintain heat and pressure inside the reactor to produce energy and maintain the reactor's safety.

Keywords: nuclear reactors,BWR reactor ,Thermalhydraulic ,IAEA