بدء
بسم الله الرحمن الرحيم

هندسة وتقنيات المحطات النووية

تأليف

الأستاذ/ أحمد بن نصر كداشي

مركز البحوث - كلية الهندسة

جامعة الملك سعود

النشر العلمي والمطابع - جامعة الملك سعود

ص.ب ٦٨٩٥٣ - الرياض ١١٥٣٧ - المملكة العربية السعودية

ح جامعة الملك سعود، ١٤٣٣هـ (٢٠١٢م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

كداشي، أحمد بن نصر.

هندسة وتقنيات المحطات النووية / أحمد بن نصر كداشي - الرياض، ١٤٣٣هـ.

٤٥٨ ص؛ ١٧سم × ٢٤ سم

ردمك: ٧ - ٩٨٢ - ٥٥ - ٩٩٦٠ - ٩٧٨

١- الإشعاع النووي ٢- التلوث الإشعاعي ٣- محطات الطاقة النووية

أ. العنوان

ديوي ٣٦٣,١١ ١٤٣٣/٢٨٤٠

رقم الإيداع: ١٤٣٣/٢٨٤٠

ردمك: ٧ - ٩٨٢ - ٥٥ - ٩٩٦٠ - ٩٧٨

حكمت هذا الكتاب لجنة متخصصة، وقد وافق المجلس العلمي على نشره في اجتماعه السابع للعام الدراسي ١٤٣٣/١٤٣٢هـ، المعقود بتاريخ ١٤٣٣/١/٩هـ، الموافق ٢٠١١/١٢/٤م.

تعتذر إدارة النشر العلمي والمطابع عن عدم وضوح بعض أشكال الكتاب بسبب عدم وضوحها من المصدر.

النشر العلمي والمطابع ١٤٣٣هـ

مقدمة المؤلف

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء وخاتم المرسلين نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين ... وبعد:

فيتناول هذا الكتاب، وعنوانه (هندسة وتقنيات المحطات النووية) المواضيع الأساسية لفهم تقنية إنتاج الطاقة النووية في مختلف المراحل ابتداء من محطات تصنيع الوقود النووي، ومحطات القدرة النووية، ومحطات تكرير الوقود المستهلك، ومعالجة النفايات الإشعاعية، وانتهاء بسلامة المحطات النووية. ولقد اجتهدت في تبسيط أسلوب هذا الكتاب ليكون مناسباً لشرائح عديدة من القراء، وليكون خاصة مرجعًا للطالب والباحث في مجال الهندسة النووية. ورغم كثرة المعادلات الرياضية في بعض الفصول لشرح بعض المفاهيم، فقد حرصت على تقديمها بشكل شيق وغير ممل للقارئ، راجيا التوفيق في ذلك.

يحتوي هذا الكتاب على اثني عشر فصلا، أولها محطات تخصيب اليورانيوم وتصنيع الوقود النووي، وآخرها الحوادث النووية وسلامة المحطات. يتناول الفصل الأول كيفية استخراج خامات اليورانيوم وتعدينها ثم تقنيات طرائق التخصيب المختلفة، وعمليات تصنيع الوقود النووي. واختص الفصل الثاني بمحطات القدرة

النووية، حيث يُقدم شرحًا مفصلا للمكونات الأساسية لهذا النوع من المحطات، وللمواد الأساسية للمفاعل النووي، وأنواع المفاعلات النووية الانشطارية وفق الأجيال المتلاحقة لها، ثم كيفية التحكم في المفاعل بشكل عام. أما الفصل الثالث، فيتناول محطات تكرير الوقود المستهلك وتخزين النفايات المشعة، فيتطرق لشرح التقنيات المختلفة لعمليات تكرير الوقود المستهلك، والمواد الناتجة من هذه العمليات، ثم تصنيف النفايات المشعة ومعالجتها، وطرائق التخزين النهائي لها.

يتناول الفصل الرابع، والخامس، والسادس أساسيات الفيزياء النووية ودورة النيوترونات في المفاعلات النووية، حيث يُقدم الفصل الرابع دراسة خصائص النيوترونات وتهدئة النيوترونات السريعة، ثم انتشار النيوترونات الحرارية، ويتطرق الفصل الخامس إلى شرح تأثير المواد المكونة للمفاعل وعوامل تضاعف النيوترونات، ثم دورة النيوترونات داخل المفاعل. أما الفصل السادس فيختص بدراسة نظريات انتشار وانتقال النيوترونات داخل قلب المفاعل وحل المعادلات الرياضية الخاصة بذلك.

وقد خصص الفصل السابع، والثامن، والتاسع لدراسة ديناميكا المفاعلات النووية والتحكم في تشغيلها بشكل عام، حيث يُقدم الفصل السابع أنواع النيوترونات في المفاعل ومدة دورة المفاعل، ومختلف الحالات الانتقالية، ويهتم الفصل الثامن بدراسة تطور مستوى الفاعلية أثناء تشغيل المفاعل. أما الفصل التاسع فيختص بشرح مفصل لتأثير قضبان التحكم، والمواد الماصة الذائبة كأدوات للتحكم في تشغيل المفاعل.

يتناول الفصل العاشر موضوع انتقال الحرارة في مختلف مكونات المفاعل وكيفية الاستفادة منها. أما بقية فصول الكتاب، الفصل الحادي عشر والثاني عشر، فخصصت لدراسة الحماية من الإشعاعات وسلامة المحطات النووية من حيث تحليل

وتقويم الحوادث المحتملة والعبرة من الحوادث النووية السابقة ثم استنباط التصاميم الهندسية لسلامة المحطات النووية.

وأخيراً، أتقدم بالشكر لله الذي وفقنى لإنجاز هذا العمل المتواضع إسهاماً في نشر العلوم الهندسية باللغة العربية. وأرجو أن أكون قد وفيت هذا الموضوع حقه، وأن يكون هذا العمل خالصاً لوجه الله – عز وجل –.

ولا يفوتني أن أتقدم بالشكر بعد ذلك إلى مركز البحوث بكلية الهندسة بجامعة الملك سعود على تقديم الدعم والمساعدة لإنجاز هذا الكتاب بحمد الله وعونه.

المؤلف

المحتويات

مقدمة المؤلف ..... هـ

الفصل الأول: محطات تخصيب اليورانيوم وتصنيع الوقود النووي ١

(١,١) مقدمة ١

(١,٢) خامات اليورانيوم وتعدينها ٢

(١,٢,١) مناجم اليورانيوم ٢

(١,٢,٢) عمليات تعدين اليورانيوم ٣

(١,٢,٣) نفايات التكرير ٥

(١,٣) عمليات التخصيب (الإثراء) ٥

(١,٣,١) العوامل الأساسية لعملية التخصيب ٦

(١,٣,٢) مقياس شغل الفصل ٧

(١,٤) طرائق تخصيب اليورانيوم ٩

(١,٤,١) التخصيب بالطرد المركزي ١١

(١,٤,١,١) خصائص وحدة تخصيب الطرد المركزي ١٢

(١,٤,١,٢) ديناميكية وحدة التخصيب ١٤

(١,٤,٢) التخصيب بالفوهات المنحنية ١٤
(١,٤,٣) التخصيب بالانتشار الغازي ١٥
(١,٤,٤) التخصيب بالليزر ١٧
(١,٤,٥) تصميم محطات تخصيب اليورانيوم ١٨
(١,٥) محطات تصنيع الوقود النووي ٢٠
(١,٥,١) تصنيع وقود اليورانيوم الطبيعي ٢٠
(١,٥,٢) تصنيع وقود اليورانيوم المخصب (٢-٥٪) ٢٣
(١,٥,٣) تصنيع وقود خليط أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم ٢٦
(١,٥,٤) أنواع الوقود النووي الأخرى ٢٨
(١,٥,٥) دورة الوقود النووي ٢٨
(١,٦) تمارين ٢٩

الفصل الثاني: محطات القدرة النووية ٣١
(٢,١) مقدمة ٣١
(٢,٢) المكونات الأساسية للمحطة ٣٢
(٢,٢,١) قلب المفاعل ٣٣
(٢,٢,٢) المبادل الحراري ٣٤
(٢,٢,٣) الوعاء والحواجز الإشعاعية ٣٤
(٢,٢,٤) التربينة والمولد الكهربائي وتوابعهما ٣٧
(٢,٣) المواد الأساسية للمفاعل النووي ٣٨
(٢,٣,١) الوقود النووي ٣٨
(٢,٣,١,١) المواد الانشطارية ٣٨

(٢,٣,١,٢) المواد الخصبة ٣٨
(٢,٣,٢) المبرد ٤٠
(٢,٣,٢,١) سوائل التبريد ٤١
(٢,٣,٢,٢) غازات المبرد ٤٢
(٢,٣,٣) المهدئ ٤٣
(٢,٣,٣,١) الجرافيت ٤٤
(٢,٣,٣,٢) الماء ٤٤
(٢,٣,٤) عواكس النيوترونات ٤٦
(٢,٤) أنواع المفاعلات النووية الانشطارية ٤٦
(٢,٤,١) مفاعلات الجيل الأول ٤٧
(٢,٤,٢) مفاعلات الجيل الثاني ٤٨
(٢,٤,٢,١) المفاعلات المبردة بالغاز (OCR) ٤٨
(٢,٤,٢,٢) مفاعل الماء المضغوط (PWR) ٤٩
(٢,٤,٢,٣) مفاعلات الماء المغلي (BWR) ٥١
(٢,٤,٢,٤) مفاعلات الماء الثقيل المضغوط (PHWR – Candu) ٥٢
(٢,٤,٢,٥) مفاعل الماء الخفيف والجرافيت (RBMK) ٥٣
(٢,٤,٢,٦) المفاعلات المولدة السريعة (FBR) ٥٥
(٢,٤,٣) مفاعلات الجيل الثالث ٥٦
(٢,٤,٤) مفاعلات الجيل الرابع ٥٩
(٢,٤,٤,١) المفاعلات السريعة المبردة بالغاز (GCFR) ٥٩
(٢,٤,٤,٢) المفاعلات السريعة المبردة بالرصاص المنصهر (LCFR) ٦٠
(٢,٤,٤,٣) مفاعلات الملح المنصهر (MSR) ٦٠

(٢,٤,٤,٤) المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم (SCFR)..... ٦٠
(٢,٤,٤,٥) مفاعلات الماء عالي الضغط (SWCR) ٦٠
(٢,٤,٤,٦) المفاعلات المبردة بالغاز عالي الحرارة (VHTGR)..... ٦٠
(٢,٥) التحكم في المفاعلات النووية..... ٦١
(٢,٥,١) غرفة التحكم..... ٦١
(٢,٥,٢) قضبان التحكم وأجهزة القياس الإشعاعي ٦٢
(٢,٥,٢,١) قضبان التحكم..... ٦٢
(٢,٥,٢,٢) أجهزة القياس..... ٦٣
(٢,٥,٣) سلامة المحطة والبيئة ٦٤
(٢,٦) تمارين..... ٦٤

الفصل الثالث: محطات تكرير الوقود المستهلك وتخزين النفايات المشعة ٦٧
(٣,١) مقدمة ٦٧
(٣,٢) محطات تكرير الوقود المستهلك ٦٨
(٣,٢,١) الوقود النووي المستهلك..... ٦٩
(٣,٢,٢) تكرير الوقود النووي المستهلك..... ٦٩
(٣,٢,٣) طريقة تكرير الوقود بيراكس (Purex)..... ٧١
(٣,٢,٣,١) المرحلة الأولى..... ٧١
(٣,٢,٣,٢) المرحلة الثانية ٧٢
(٣,٢,٣,٣) المرحلة الثالثة ٧٣
(٣,٢,٣,٤) المرحلة الرابعة..... ٧٣
(٣,٢,٣,٥) المرحلة الخامسة ٧٤

(٣,٢,٤) طرائق التكرير الأخرى ٧٦
(٣,٢,٤,١) الطرائق السائلة..... ٧٦
(٣,٢,٤,٢) الطرائق الصلبة ٧٦
(٣,٣) نواتج تكرير الوقود المستهلك..... ٧٧
(٣,٣,١) نظائر اليورانيوم..... ٧٨
(٣,٣,٢) نظائر البلوتونيوم..... ٧٨
(٣,٣,٣) عناصر شظايا الانشطار (النفايات) ٧٩
(٣,٤) النفايات المشعة..... ٨٠
(٣,٤,١) النفايات الغازية..... ٨٠
(٣,٤,٢) النفايات السائلة ٨١
(٣,٤,٣) النفايات الصلبة..... ٨١
(٣,٥) تصنيف النفايات المشعة..... ٨٢
(٣,٥,١) نفايات الصنف الأول (VLLW)..... ٨٢
(٣,٥,٢) نفايات الصنف الثاني (LLW) ٨٢
(٣,٥,٣) نفايات الصنف الثالث (MLW) ٨٣
(٣,٥,٤) نفايات الصنف الرابع (HLW) ٨٣
(٣,٦) معالجة النفايات وتخزينها ٨٣
(٣,٦,١) معالجة نفايات الصنف الأول والثاني ٨٤
(٣,٦,٢) معالجة نفايات الصنف الثالث..... ٨٥
(٣,٦,٣) معالجة نفايات الصنف الرابع..... ٨٦
(٣,٧) التخزين النهائي للنفايات المشعة..... ٨٨
(٣,٧,١) التخلص من النفايات..... ٨٩

(٣,٧,٢) فصل النظائر إلى مجموعات ٨٩
(٣,٧,٣) معالجة النفايات وتخزينها نهائياً..... ٩٠
(٣,٧,٤) دفن النفايات في باطن الأرض..... ٩٤
(٣,٨) تمارين..... ٩٥

الفصل الرابع: أساسيات الهندسة النووية ٩٧
(٤,١) مقدمة ٩٧
(٤,٢) خصائص النيوترونات ٩٨
(٤,٢,١) تصنيف النيوترونات..... ٩٨
(٤,٢,١,١) النيوترونات الحرارية..... ٩٨
(٤,٢,١,٢) النيوترونات البطيئة ١٠٠
(٤,٢,١,٣) النيوترونات السريعة..... ١٠٠
(٤,٢,٢) تفاعلات النيوترونات مع المادة..... ١٠١
(٤,٢,٢,١) تشتت النيوترونات ١٠٢
(٤,٢,٢,٢) امتصاص النيوترونات..... ١٠٢
(٤,٣) المقاطع العرضية ١٠٣
(٤,٣,١) المقطع العرضي المجهري..... ١٠٣
(٤,٣,٢) المقطع العرضي المجهاري ١٠٥
(٤,٤) تهدئة النيوترونات السريعة ١٠٦
(٤,٤,١) الطاقة الحرارية المفقودة في التصادم ١٠٧
(٤,٤,٢) معدل الطاقة المفقودة..... ١٠٨
(٤,٤,٣) عدد التصادمات لتهدئة النيوترونات ١٠٩

(٤,٤,٤) معدل زاوية التشتت..... ١٠٩
(٤,٤,٥) طول مسار التهدئة..... ١١٠
(٤,٥) انتشار النيوترونات الحرارية..... ١١١
(٤,٥,١) العلاقة بين الفيض وتيار النيوترونات..... ١١١
(٤,٥,٢) معدل المسارات الحرة للنيوترونات..... ١١٢
(٤,٥,٣) تسرب النيوترونات ١١٣
(٤,٥,٤) انتشار النيوترونات..... ١١٤
(٤,٥,٥) طول مسار الانتشار..... ١١٤
(٤,٥,٦) طول مسار هجرة النيوترونات ١١٥
(٤,٦) الانتشار النووي..... ١١٦
(٤,٦,١) المواد الانشطارية..... ١١٧
(٤,٦,٢) المقطع العرضي للانشطار ١١٧
(٤,٦,٣) نواتج الانشطار..... ١١٩
(٤,٦,٤) طاقة الانشطار..... ١٢٠
(٤,٦,٥) الانشطار المتسلسل..... ١٢١
(٤,٧) تمارين..... ١٢٢

الفصل الخامس: عوامل تضاعف النيوترونات في المفاعلات النووية ١٢٥
(٥,١) مقدمة ١٢٥
(٥,٢) عامل التضاعف اللانهائي (K_∞)..... ١٢٦
(٥,٣) عامل التضاعف (K_∞) للمفاعلات المتجانسة ١٢٨
(٥,٣,١) معامل الانشطار الحراري (η) ١٢٨

(٥,٣,٢) معامل الانشطار السريع (ε) ١٢٩
(٥,٣,٣) معامل احتمال الهروب من الامتصاص (p) ١٢٩
(٥,٣,٤) معامل الاستعمال الحراري (f) ١٣٣
(٥,٣,٥) معامل التضاعف اللانهائي..... ١٣٤
(٥,٤) عامل التضاعف (K_∞) للمفاعلات غير المتجانسة ١٣٥
(٥,٤,١) معامل الانشطار الحراري ١٣٦
(٥,٤,٢) معامل الانشطار السريع ١٣٧
(٥,٤,٣) معامل احتمال الهروب من الامتصاص ١٣٨
(٥,٤,٤) معامل الاستعمال الحراري..... ١٤٠
(٥,٤,٥) عامل التضاعف اللانهائي ١٤١
(٥,٤,٥,١) وقود اليورانيوم الطبيعي..... ١٤٢
(٥,٤,٥,٢) وقود اليورانيوم المخصب..... ١٤٢
(٥,٥) عامل التضاعف الفعَّال (K_{eff}) ١٤٣
(٥,٥,١) العلاقة بين عاملي التضاعف ١٤٤
(٥,٥,٢) دورة النيوترونات داخل المفاعل..... ١٤٥
(٥,٦) تأثيرات عواكس النيوترونات ١٤٨
(٥,٧) تمارين..... ١٥٠

الفصل السادس: نظريات انتقال وانتشار النيوترونات في المفاعلات النووية ١٥٣
(١,٦) مقدمة ١٥٣
(٦,٢) تعريف الكميات الأساسية ١٥٤
(٦,٢,١) الكميات العددية..... ١٥٤

(٦,٢,١,١) كثافة النيوترونات ١٥٥
(٦,٢,١,٢) فيض النيوترونات ١٥٥
(٦,٢,١,٣) معدل كثافة التفاعل ١٥٥
(٦,٢,٢) الكميات المتجهة ١٥٦
(٦,٢,٢,١) الكثافة المتجهة للنيوترونات ١٥٧
(٦,٢,٢,٢) الفيض المتجهة للنيوترونات ١٥٧
(٦,٢,٢,٣) معدل كثافة التفاعل المتجهة ١٥٧
(٦,٢,٢,٤) كثافة التيار المتجهة للنيوترونات ١٥٨
(٦,٢,٣) العلاقة بين الكميات العددية والمتجهة ١٥٩
(٦,٢,٣,١) العلاقة بين كثافتي النيوترونات ١٥٩
(٦,٢,٣,٢) العلاقة بين فيضي النيوترونات ١٥٩
(٦,٢,٣,٣) العلاقة بين كثافة تياري النيوترونات ١٥٩
(٦,٣) نظرية انتقال النيوترونات ١٦٠
(٦,٣,١) تزايد النيوترونات ١٦١
(٦,٣,٢) تناقص النيوترونات ١٦١
(٦,٣,٣) تسرب النيوترونات ١٦٢
(٦,٣,٤) معادلة نظرية انتقال النيوترونات ١٦٢
(٦,٣,٥) حل معادلة انتقال النيوترونات ١٦٤
(٦,٤) تبسيط معادلة انتقال النيوترونات ١٦٧
(٦,٤,١) افتراض أحادية سرعة النيوترونات ١٦٨
(٦,٤,٢) افتراض تماثل زوايا التشتت ١٦٨
(٦,٤,٣) افتراض تجانس الوسط ١٦٩

(٦,٤,٤) تقريب نظرية الانتقال إلى نظرية الانتشار..... ١٧٠
(٦,٤,٤,١) فيض النيوترونات يتغير ببطء..... ١٧١
(٦,٤,٤,٢) قلة الامتصاص مقارنة بالتشتت..... ١٧١
(٦,٤,٤,٣) عدم تماثل زوايا التشتت ١٧٣
(٦,٥) نظرية انتشار النيوترونات..... ١٧٤
(٦,٥,١) انتشار زمرة واحدة من النيوترونات ١٧٥
(٦,٥,١,١) الشروط الحدودية ١٧٧
(٦,٥,١,٢) حل معادلة الانتشار ١٧٧
(٦,٥,٢) انتشار زمرتين من النيوترونات..... ١٨٠
(٦,٥,٢,١) شروط حل المعادلات الحرجة ١٨١
(٦,٥,٢,٢) حل نظام معادلات الانتشار..... ١٨٢
(٦,٥,٣) انتشار الزمر المتعددة من النيوترونات ١٨٣
(٦,٥,٣,١) شروط حل نظام المعادلات الحرجة ١٨٥
(٦,٥,٣,٢) حل نظام معادلات الحالة الحرجة ١٨٦
(٦,٦) تمارين..... ١٨٦

الفصل السابع: ديناميكا المفاعلات النووية ١٨٩
(٧,١) مقدمة ١٨٩
(٧,٢) أنواع النيوترونات في المفاعل..... ١٩٠
(٧,٢,١) النيوترونات الفورية ١٩١
(٧,٢,٢) النيوترونات المتأخرة..... ١٩١
(٧,٣) مدة دورة المفاعل والفاعلية ١٩٣
(٧,٣,١) إهمال النيوترونات المتأخرة..... ١٩٥

(٧,٣,٢) تأثير النيوترونات المتأخرة ١٩٧
(٧,٣,٣) الفاعلية ١٩٩
(٧,٣,٤) علاقة الفاعلية بمدة دورة المفاعل..... ٢٠٤
(٧,٣,٤,١) الفاعلية موجبة ٢٠٦
(٧,٣,٤,٢) الفاعلية سالبة ٢٠٦
(٧,٤) الحالات الانتقالية الكبيرة للمفاعل ٢٠٧
(٧,٤,١) الحالة الحرجة الفورية..... ٢٠٧
(٧,٤,٢) القفزة الفورية للفاعلية..... ٢٠٨
(٧,٤,٣) إطفاء المفاعل أو إيقافه ٢١٠
(٧,٥) الحالات الانتقالية الصغيرة للمفاعل..... ٢١٣
(٧,٥,١) العلاقة بين القدرة والفاعلية ٢١٤
(٧,٥,٢) التغير البسيط الثابت للفاعلية..... ٢١٥
(٧,٥,٣) التغير الخطي للفاعلية ٢١٦
(٧,٦) تمارين..... ٢١٧

الفصل الثامن: تطور مستوى الفاعلية أثناء تشغيل المفاعل..... ٢١٩
(٨,١) مقدمة ٢١٩
(٨,٢) تأثر الفاعلية بتغير درجة الحرارة..... ٢٢٠
(٨,٢,١) معامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة..... ٢٢٢
(٨,٢,٢) عوامل الفاعلية لتغير درجة حرارة الوقود..... ٢٢٢
(٨,٢,٢,١) تأثر معامل احتمال الهروب من الامتصاص ٢٢٣
(٨,٢,٢,٢) تأثر معامل الاستعمال الحراري ٢٢٥

(٨,٢,٣) عوامل الفاعلية لتغير درجة حرارة المهدئ والمبرد ٢٢٦
(٨,٢,٣,١) تأثر معامل احتمال الهروب من الامتصاص ٢٢٦
(٨,٢,٣,٢) تأثر معامل الاستعمال الحراري ٢٢٧
(٨,٢,٣,٣) تأثر معامل احتمال عدم تسرب النيوترونات ٢٢٨
(٨,٢,٣,٤) ملاحظات عامة ٢٢٨
(٨,٣) تأثر الفاعلية بتراكم المواد السامة للتفاعل ٢٢٩
(٨,٣,١) تأثر عامل التضاعف بالعناصر السامة ٢٣٠
(٨,٣,٢) فاعلية العناصر السامة ٢٣١
(٨,٤) تسمم التفاعل بعنصر الزينون (Xe) ٢٣٢
(٨,٤,١) فاعلية الزينون عند الاتزان ٢٣٤
(٨,٤,٢) تطور فاعلية الزينون عند توقف المفاعل ٢٣٦
(٨,٤,٣) علاقة فاعلية الزينون بقدرة المفاعل ٢٣٨
(٨,٥) تسمم المفاعل بعنصر السمريوم (Sm) ٢٤٠
(٨,٥,١) فاعلية السمريوم عند الاتزان ٢٤١
(٨,٥,٢) تطور فاعلية السمريوم عند توقف المفاعل ٢٤٢
(٨,٦) تغير خصائص مكونات المفاعل مع الزمن ٢٤٥
(٨,٦,١) استهلاك الوقود واستنزافه ٢٤٦
(٨,٦,٢) تركيز نظائر شظايا الانشطار ٢٤٨
(٨,٦,٣) حل معادلات استنزاف الوقود ٢٤٩
(٨,٦,٤) التوزيع الأمثل للاستفادة من الوقود ٢٥٠
(٨,٧) تمارين ٢٥٤

الفصل التاسع: التحكم في المفاعل ٢٥٧
(٩,١) مقدمة ٢٥٧
(٩,٢) أدوات التحكم في المفاعل ٢٥٨
(٩,٢,١) قضبان التحكم ٢٥٨
(٩,٢,٢) المواد الماصة للنيوترونات ٢٥٩
(٩,٣) فاعلية قضبان التحكم ٢٦٠
(٩,٣,١) فاعلية قضيب مركزي واحد ٢٦٠
(٩,٣,١,١) فاعلية إدخال تام لقضيب التحكم ٢٦٢
(٩,٣,١,٢) إدخال جزئي لقضيب التحكم ٢٦٣
(٩,٣,٢) فاعلية القضبان العنقودية ٢٦٥
(٩,٣,٣) فاعلية قضبان التحكم على شكل صليب ٢٦٦
(٩,٤) فاعلية المواد الماصة الذائبة ٢٧٠
(٩,٤,١) قدرة التحكم للمواد الماصة الذائبة ٢٧٠
(٩,٤,٢) فاعلية المواد الماصة الذائبة ٢٧٠
(٩,٥) معادلات التحكم في المفاعل ٢٧٣
(٩,٥,١) تحويل لبلاس لحل المعادلات التفاضلية ٢٧٥
(٩,٥,١,١) خطوات تحويلات لبلاس ٢٧٥
(٩,٥,١,٢) دالة التحويل ٢٧٧
(٩,٥,٢) دالة تحويل قدرة الصفر للمفاعل ٢٧٧
(٩,٥,٣) دائرة التحكم المفتوحة ٢٧٩
(٩,٥,٣,١) دالة تحويل الدائرة المفتوحة ٢٨٠
(٩,٥,٣,٢) استجابة المفاعل لفاعلية جيبية ٢٨٠

(٩,٥,٤) دائرة التحكم المغلقة..... ٢٨٢
(٩,٥,٤,١) دالة تحويل الدائرة المغلقة ٢٨٣
(٩,٥,٤,٢) دائرة التحكم المغلقة للمفاعل..... ٢٨٣
(٩,٥,٤,٣) استجابة المفاعل لفاعلية جيبية ٢٨٥
(٩,٥,٤,٤) تحليل الاستقرار الخطي للمفاعل ٢٨٧
(٩,٦) تمارين..... ٢٨٨

الفصل العاشر: النقل الحراري داخل المفاعل ٢٩١
(١٠,١) مقدمة..... ٢٩١
(١٠,٢) مبادئ النقل الحراري ٢٩٢
(١٠,٢,١) النقل الحراري بالتوصيل ٢٩٢
(١٠,٢,٢) النقل الحراري بالحمل ٢٩٤
(١٠,٢,٣) النقل الحراري بالإشعاع ٢٩٦
(١٠,٣) الإنتاج الحراري للمفاعل ٢٩٧
(١٠,٣,١) الإنتاج الحراري لقضبان الوقود..... ٢٩٧
(١٠,٣,٢) الإنتاج الحراري للإشعاعات ٢٩٩
(١٠,٣,٣) الإنتاج الحراري للنظائر المشعة..... ٣٠٠
(١٠,٤) انتشار حرارة الوقود..... ٣٠٠
(١٠,٤,١) قضبان الوقود على شكل ألواح ٣٠٢
(١٠,٤,١,١) توزيع الحرارة داخل الوقود..... ٣٠٣
(١٠,٤,١,٢) توزيع الحرارة في الغلاف..... ٣٠٥
(١٠,٤,٢) قضبان الوقود الأسطوانية ٣٠٦

(١٠,٤,٢,١) توزيع الحرارة في الوقود ٣٠٦
(١٠,٤,٢,٢) توزيع الحرارة في الغلاف ٣٠٨
(١٠,٤,٣) تغير تدفق حرارة قضبان الوقود ٣٠٩
(١٠,٥) انتقال الحرارة إلى المبرد (الحالة السائلة) ٣١٠
(١٠,٥,١) التوزيع العرضي للحرارة ٣١٠
(١٠,٥,٢) معامل الانتقال الحراري ٣١١
(١٠,٥,٣) التوزيع الطولي لقناة التبريد ٣١٥
(١٠,٦) انتقال الحرارة إلى المبرد (مرحلة الغليان) ٣١٧
(١٠,٦,١) مرحلة الغليان ٣١٨
(١٠,٦,٢) أزمة الغليان ٣١٩
(١٠,٦,٣) فرق درجات حرارة الغلاف والمبرد ٣٢٠
(١٠,٦,٤) درجة حرارة الغليان المحلي ٣٢١
(١٠,٧) التصميم الحراري للمفاعلات ٣٢٢
(١٠,٧,١) نسبة أزمة الغليان ٣٢٣
(١٠,٧,٢) عامل القناة الساخنة ٣٢٣
(١٠,٧,٢,١) عامل القناة الساخنة النووي ٣٢٥
(١٠,٧,٢,٢) عامل القناة الساخنة الهندسي ٣٢٥
(١٠,٧,٣) التصميم الحراري للمفاعل ٣٢٦
(١٠,٨) تمارين ٣٢٧

الفصل الحادي عشر: الحماية من الإشعاعات المؤينة في المحطات النووية ٣٣١
(١١,١) مقدمة ٣٣١
(١١,٢) الوقاية من الإشعاعات النووية ٣٣٢

(١١,٢,١) الإشعاعات النووية (المؤينة) ٣٣٣
(١١,٢,١,١) أشعة ألفا ٣٣٣
(١١,٢,١,٢) أشعة بيتا..... ٣٣٣
(١١,٢,١,٣) أشعة جاما ٣٣٤
(١١,٢,١,٤) أشعة X (الأشعة السيلية)..... ٣٣٤
(١١,٢,١,٥) النيوترونات ٣٣٤
(١١,٢,١,٦) الأشعة الكونية ٣٣٥
(١١,٢,٢) وحدات الجرعات الإشعاعية ٣٣٥
(١١,٢,٣) التأثير البيولوجي للإشعاعات ٣٣٦
(١١,٣) الحماية من أشعة جاما..... ٣٣٨
(١١,٣,١) مصدر نقطي ٣٣٨
(١١,٣,١,١) المسافة..... ٣٣٩
(١١,٣,١,٢) الدرع (التوهين)..... ٣٤٠
(١١,٣,١,٣) معامل التراكم..... ٣٤١
(١١,٣,١,٤) تجاه الشعاع الموحد..... ٣٤٤
(١١,٣,٢) مصدر مشع على شكل لوح أو قرص..... ٣٤٦
(١١,٣,٣) مصدر مشع خطي ٣٤٩
(١١,٣,٤) مصدر مشع داخلي ٣٥١
(١١,٤) الحماية من النيوترونات ٣٥٣
(١١,٤,١) المقطع العرضي لإزالة النيوترونات ٣٥٤
(١١,٤,٢) الطريقة البسيطة لحساب الحماية من النيوترونات ٣٥٥
(١١,٤,٣) طريقة حساب زمر الانشطار وإزالة النيوترونات ٣٥٨

(١١,٤,٣,١) فيض النيوترونات المزالة ٣٥٩
(١١,٤,٣,٢) المصدر المحلي للنيوترونات الداخلة إلى الزمرة (المزالة) ٣٥٩
(١١,٤,٣,٣) نظام معادلة الانتشار والإزالة ٣٥٩
(١١,٥) تصاميم الدروع الإشعاعية ٣٦٠
(١١,٥,١) محطات تخصيب الوقود ٣٦١
(١١,٥,٢) محطات القدرة النووية (المفاعلات)..... ٣٦٢
(١١,٥,٣) محطات معالجة الوقود..... ٣٦٣
(١١,٦) تمارين..... ٣٦٤

الفصل الثاني عشر: الحوادث النووية وسلامة المحطات..... ٣٦٧
(١٢,١) مقدمة..... ٣٦٧
(١٢,٢) مبادئ السلامة في المحطات النووية..... ٣٦٨
(١٢,٢,١) الحواجز المتعددة..... ٣٦٨
(١٢,٢,٢) إستراتيجية الدفاع عن عمق..... ٣٦٩
(١٢,٢,٣) أهم النظائر المشعة القابلة للترسب ٣٧٠
(١٢,٣) تحليل الحوادث النووية المحتملة ٣٧١
(١٢,٣,١) حوادث فقدان تدفق سائل التبريد..... ٣٧٣
(١٢,٣,٢) حوادث فقدان امتصاص الحرارة..... ٣٧٤
(١٢,٣,٣) حوادث فقدان التحكم في الفاعلية..... ٣٧٥
(١٢,٤) تقويم الحوادث النووية المحتملة..... ٣٧٧
(١٢,٤,١) احتمال الحوادث النووية ٣٧٧
(١٢,٤,٢) انتشار النظائر المشعة وتغيير الجرعة..... ٣٧٩

(١٢,٤,٢,١) انتشار النظائر المشعة وتشتيتها ٣٧٩
(١٢,٤,٢,٢) تقدير الجرعة المكافئة لكامل الجسم ٣٨٢
(١٢,٤,٢,٣) تقدير الجرعة المكافئة الداخلية (التنفس)..... ٣٨٣
(١٢,٤,٢,٤) تقدير الجرعة المكافئة الداخلية (الابتلاع) ٣٨٤
(١٢,٤,٣) تدابير السلامة أثناء الحوادث النووي ٣٨٥
(١٢,٥) الحوادث النووية..... ٣٨٧
(١٢,٥,١) حادث محطة تصنيع الوقود ٣٨٧
(١٢,٥,٢) حادث محطة تكرير الوقود ٣٨٨
(١٢,٥,٣) حادث مفاعل "ثري ميال أيلاند" (أمريكا)..... ٣٨٩
(١٢,٥,٣,١) حادث فقدان امتصاص الحرارة ٣٨٩
(١٢,٥,٣,٢) حادث فقدان تدفق سائل التبريد..... ٣٨٩
(١٢,٥,٣,٣) نتائج الحادث ٣٩١
(١٢,٥,٤) حادث مفاعل "تشرنوبل" (أوكرا نيا- روسيا سابقا)..... ٣٩١
(١٢,٥,٤,١) أهم خطوات الحادث ٣٩٢
(١٢,٥,٤,٢) إدارة أزمة الحادث..... ٣٩٣
(١٢,٥,٤,٣) نتائج الحادث ٣٩٤
(١٢,٥,٥) حادث محطة فوكوشيما النووية اليابانية..... ٣٩٥
(١٢,٥,٥,١) الساعات الأولى لحادث محطة فوكوشيما ٣٩٦
(١٢,٥,٥,٢) الأيام الأولى لحادث محطة فوكوشيما ٣٩٧
(١٢,٥,٥,٣) ملخص الحادث بعد ثلاثة أشهر..... ٤٠٠
(١٢,٥,٥,٤) ملخص الحادث بعد ستة أشهر ٤٠١
(١٢,٦) التصميم الهندسي لسلامة المحطات النووية..... ٤٠٢
(١٢,٦,١) السلامة الفعَّالة..... ٤٠٢

(١٢,٦,٢) السلامة السلبية (الطبيعية) ٤٠٣
(١٢,٧) تمارين ٤٠٤

الملاحق ٤٠٧
ملحق رقم (١). الثوابت الفيزيائية الأساسية ٤٠٩
ملحق رقم (٢). معامل التحويل بين الوحدات الفيزيائية ٤١٠
ملحق رقم (٣). بعض خصائص العناصر الطبيعية ٤١١
ملحق رقم (٤). معامل التوهين الكتلي لأشعة جاما ٤١٣
ملحق رقم (٥). معامل الامتصاص الكتلي لأشعة جاما ٤١٤
ملحق رقم (٦). المقطع العرضي المجهري ٤١٥
ملحق رقم (٧). المقطع العرضي المجهري والمجهاري للنيوترونات الحرارية ٤١٦
المراجع ٤٢١
ثبت المصطلحات ٤٢٥
أولاً: عربي – إنجليزي ٤٢٥
ثانياً: إنجليزي – عربي ٤٣٨
كشاف الموضوعات ٤٥١