تحليل الإجهادات في إنشاءات الطائرات

الأستاذ الدكتور محمود نديم نحاس

قسم هندسة الطيران

كلية الهندسة - جامعة الملك عبدالعزيز

مركز النشر العلمي

جامعة الملك عبد العزيز

ص ب: ٨٠٢٠٠ - جدة: ٢١٥٨٩

المملكة العربية السعودية

© جامعة الملك عبد العزيز ١٤٢٣ هـ (٢٠٠٢م)

جميع حقوق الطبع محفوظة .

الطبعة الأولى : ١٤٢٣هـ (٢٠٠٢م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

نحاس ، محمود نديم

تحليل الإجهادات في إنشاءات الطائرات.- جده .

... ص ؛ .. سم

ردمك : ٦ - ٣٠٤- ٠٦- ٩٩٦٠

١- الطيران ٢- هندسة الطيران أ- العنوان

ديوي ٦٢٩,١٣٢ ٢٢/٤١٥١

رقم الإيداع : ٢٢/٤١٥١

ردمك : ٦- ٣٠٤- ٠٦- ٩٩٦٠

مطابع جامعة الملك عبد العزيز

إهـــداء

إلى روح والدي الذي شجّعني على طلب العلم وقضى

نحبه قبل أنْ يرى إنتاجي

وإلى روح والدتي التي هكلّت من أجلي

وإلى زوجتي التي هيّأت لي الجو المناسب لطلب العلم

وإلى أبنائي وبناتي الذين أرجو من الله أنْ يكونوا

مشاعل نور في طريق أمتهم نحو التقدم والرقي

مقدمة

الحمد لله الذي أحسن كل شيء خلقه ثم هدى، وعلّم الإنسان مالم يعلم، والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين، الذي حثّ على طلب العلم وجعله فريضة على كل مسلم، ورضي الله عن الصحابة والتابعين، الذين فهموا الإسلام أحسن فهم، فطلبوا العلم، وسادوا العالم في فترة وجيزة من الزمن، ونشروا الحضارة في أصقاع الدنيا.

وبعد،

فخلال عملي في تدريس مقررات "إنشاءات الطائرات" في جامعة الملك عبد العزيز شعرت بضرورة وجود كتاب باللغة العربية بين يدي الطلاب. ورغم توفر عدد من الكتب باللغة الإنجليزية في هذا الموضوع، إلاّ أنني لم أعثر على كتاب واحد باللغة العربية حوله. ومن هنا جاء هذا الكتاب ليسد هذه الثغرة، وهو الكتاب الأول في سلسلة من الكتب التي ستصدر تباعاً - إن شاء الله - لتعالج مختلف الموضوعات المتعلقة بإنشاءات الطائرات.

وهذا الكتاب موضوعٌ أساساً كمرجع لأول مقرر في موضوع "تحليل إنشاءات الطائرات" لطلاب الشهادة الأولى (البكالوريوس) في هندسة الطيران، ولذا فإنه مبني على افتراض أن الطالب قد سبق له أن درس "مقاومة المواد" و "أساسيات الطيران" بالإضافة إلى المقررات الأساسية الجامعية في "الرياضيات" و "الفيزياء"، مما يمهد له السبيل لفهم هذا المقرر. كذلك فإنه مفترَض أيضاً بأن الطالب سيدرس بعد هذا المقرر مقررات تالية، تعالج موضوعات أخرى، مثل دراسة الانحرافات في الإنشاءات، وانحناء الصفائح، وعدم الاستقرار في الإنشاءات، وهذه هي موضوعات الكتاب الثاني من هذه السلسلة. بالإضافة

إلى موضوعات التصميم الإنشائي لأجزاء الطائرات، التي هي موضوعات الكتاب الثالث في هذه السلسلة. ويبقى هناك موضوعات متقدمة خاصة بطلاب الدراسات العليا، مثل الطرق المتقدمة في التحليل الإنشائي، كطريقة "العناصر المتناهية"، و "التصميم الأمثل"، وغيرها. هذا وإن مسوّدات هذه الكتب بعضها جاهز وبعضها في طريقه إلى أن يرى النور.

هذا ولعله من المفيد بيان التسميات المكافئة لاسم هذا الكتاب. فالاسم الحالي "تحليل الإجهادات في إنشاءات الطائرات" قُصد منه إيضاح المحتوى، مع المحافظة على قصر العنوان قدر الإمكان، وإن كان هناك موضوعات أخرى حواها الكتاب، وهي ذات صلة بموضوعه، مثل الفصل الخاص بالتفصيل الإنشائي للطائرات، والفصل الخاص بمواد إنشاءات الطائرات، والفصل الخاص بحساب الأحمال على إنشاءات الطائرات. ومن ناحية ثانية فإن بعض الأساتذة الأفاضل يفضّلون استخدام تعبير "هياكل الطائرات"، عوضاً عن "إنشاءات الطائرات"، وذلك خوفاً من أن يختلط الأمر على القارئ، فيخلط بينها وبين الإنشاءات المدنية الخاصة بمباني المطارات. وعلى الرغم من وجاهة هذا الرأي، إلا أنني فضّلت استعمال تعبير "إنشاءات الطائرات"، لأنه يعادل التعبير الإنجليزي (Aircraft Structures)، في حين أن التعبير "هياكل الطائرات" هو ترجمة للتعبير الإنجليزي (Airframe)، الذي قل استعماله في المراجع الأجنبية، كما هو واضح في أسماء المراجع المستخدمة في هذا الكتاب. كذلك فإن استخدام كلمة "طائرة" في ترجمة كلمة (Aircraft) ليس دقيقا، حيث أن كلمة "طائرة" هي في الحقيقة ترجمة لكلمة (Airplane or Aeroplane)، في حين أن كلمة (Aircraft) تُترجم بـ "المركبات الطائرة". وقد آثرت هنا استخدام التعبير الشائع خوفا من الالتباس، بالإضافة إلى أنه مختصر.

وإذا كان هناك اختلاف في الرأي في ترجمة اسم الكتاب فمن باب أولى أن يكون هناك اختلاف في بعض المصطلحات الداخلة فيه. وسبب الاختلاف يعود إلى شيوع بعض المصطلحات في بعض البلدان العربية، في حين تشيع مصطلحات غيرها في بلدان أخرى.

وإلى أن يتم التنسيق بين هذه البلدان، للوصول إلى مصطلحات موحّدة، فإن عملية الترجمة والتأليف لاينبغي أن تتوقف. وفي هذا الكتاب اضطررتُ إلى استخدام أكثر من مصطلح في ترجمة بعض المصطلحات الإنجليزية، وذلك عند ورود المصطلح لأول مرة. ثم كان لابد من تفضيل مصطلح واحد يتم استخدامه فيما تبقى. وفي الحقيقة فإن وجود أكثر من مصطلح أمر شائع حتى في اللغة الإنجليزية، فمثلاً كلمة (crippling) التي ترد في المراجع الأمريكية لتدل على الانهيار بفعل التحنيب (buckling)، لاوجود لها على الإطلاق في المراجع البريطانية التي تستخدم كلمة (failure) عوضاً عنها. ولعل اختلاف التهجئة بين المراجع البريطانية والمراجع الأمريكية أمر معروف لايحتاج إلى بيان.

وفي ترجمة المصطلحات استخدمتُ المعجم الذي سبق أن وضعتُه بالاشتراك مع زملاء آخرين، وهو "معجم مصطلحات علوم هندسة الطيران والفضاء"، – تحت النشر حالياً بمطابع جامعة الملك عبدالعزيز . ومع ذلك فقد ختمتُ هذا الكتاب بمعجم للمصطلحات العلمية الواردة فيه، وتم ترتيبها في مسردين، أولهما حسب تسلسل الكلمات العربية، والآخر حسب تسلسل الكلمات الإنجليزية. وإذا كان هناك مصطلحان بالعربية يقابلان مصطلحاً واحداً بالإنجليزية فقد تمت كتابة كليهما مقابله في مسرد المصطلحات الإنجليزية، وكذلك فإن القارئ يستطيع أن يجد كلا منهما حسب تسلسل تهجئته في مسرد المصطلحات العربية، ويجد مايقابله في الإنجليزية. وهناك مصطلحات قد يستغربها بعض القرّاء، وذلك لأنهم اعتادوا على مصطلحات غيرها، وقد قمتُ بتحقيقها مستخدماً "المعجم الوسيط" – وهو من منشورات مجمع اللغة العربية في القاهرة – وقد ذكرتُ هذه التحقيقات في موضعها المناسب في هذا الكتاب. غير أني لم آت من عندي بمصطلح جديد، وقد استخدمت هنا ماهو معروف وشائع استخدامه في بعض البلدان العربية، لأنه كما ذكرت من قبل ليس هناك اتفاق على كل المصطلحات. وكل الذي أرجوه هو أن يعذرني القارئ إن كان يختلف معي في الرأي، وكما قيل "الاختلاف لايفسد للود قضية".

ولقد أخذتُ موضوعات الكتاب وطريقة عرضها من المراجع الإنجليزية المتوفرة حول الموضوع، غير أنني أضفتُ إليها من خبرتي الشخصية في تدريس هذا المقرر لمدة طويلة. ولذا فقد تبدو بعض الفقرات، وكذلك حلول المسائل مشروحة أكثر من الضروري، وذلك لأنني لمستُ - أثناء تدريسي للمادة - بأن الطلاب يحتاجون هذا الشرح المفصّل حتى تكون الأفكار واضحة أمامهم.

وكما ذكرتُ في البداية فإن محتوى هذا الكتاب يناسب كمقرر أول في موضوع "تحليل إنشاءات الطائرات"، وإن كان من الصعب إنهاؤه في فصل دراسي واحد. فقد حرصتُ على أن أضع فيه مايجب أن يوضع، تاركاً لمن يتبناه ككتاب تدريسيّ أن يختار منه الموضوعات التي تناسب منهاج الجامعة التي هو فيها. وقد ألحقتُ بالكتاب ثلاثة ملحقات (جمع ملحق، حسبما وردت في المعجم الوسيط) تناولت فيها ملخصاً لموضوعات مهمة لمحتويات الكتاب، ولكنها ليست عامة، وإنما كانت أمثلتها المحلولة كلها موجّهة لما يخدم موضوع الكتاب.

وقد يجد القارئ في هذا الكتاب شيئاً غير مألوف. فمن ذلك مثلا طريقة كتابة الأرقام الكبيرة، التي تُكتب بالتعبير الهندسي بشكل أسي. فالمألوف أن يكتب الرقم الكبير بحيث يكون فيه رقم واحد إلى يسار الفاصلة، وكل مايتبقى يُلحق بالأس، هكذا مثلاً: $2.345 * 10^8$. أما الطريقة التي أخذتُ بها فهي طريقة كتابة الأس بحيث يكون 3 أو من مضاعفاتها. فالرقم السابق كتبتُه هكذا $234.5 * 10^6$، وذلك لأن هذه الطريقة تسهّل تحويل الأرقام بين الوحدة الأساسية للقياس ومضاعفاتها أو أجزائها. فالرقم السابق - إن كان يمثل إجهادا بوحدة الباسكال - فإنه يمكن أن يُقرأ مباشرة 234.5 ميجا باسكال. وهذه هي الطريقة المتّبعة في الكتب الحديثة. ومن ذلك أيضاً استخدام التعبير "مع اتجاه الطواف" و "عكس اتجاه الطواف"، عوضاً عن استخدام اتجاه عقارب الساعة، وذلك لأن اتجاه الطواف حول الكعبة هو اتجاه الحركة في الكون كله، من أجرام سماوية، أو دقائق ذرية.

ولقد حرصتُ على استخدام وحدات النظام الدولي المعروفة بنظام الـ SI، وإن كانت

صناعة الطيران لاتزال تستخدم الوحدات البريطانية، وذلك لأن البلد الأول في هذه الصناعة، وهو الولايات المتحدة الأمريكية، لايزال يستخدم هذه الوحدات، ولاتزال الكتب التي تأتي من هناك تستخدمها.

وقبل نشر هذا الكتاب في شكله النهائي سبق لي أن وزّعته على طلابي بشكل مايشبه الأمالي، وأرسلتَ نسخة منه لصديقي وزميلي الأستاذ الدكتور هاني محمد نجم (أستاذ إنشاءات الطائرات في قسم هندسة الطيران بجامعة القاهرة، والذي سبق له أن عمل في جامعة الملك عبد العزيز)، فوافاني مشكوراً بملحوظات قيّمة، وتصويبات مفيدة، ومقترحات سديدة، كما أنه شجّعني على مثل هذا العمل، فقد كانت كلماته ورسائله – وهو مرجع في هذا الاختصاص – دافعاً قويا لي على سهر الليالي، واستغلال إجازات الصيف – منعزلا عن الأهل والخلان – لإتمام هذا الكتاب، فله مني جزيل الشكر والتقدير. وأما طلابي فقد دلني بعضهم على الأخطاء المطبعية في تلك الأمالي، وكذلك فقد ساعدتني أسئلتهم واستفساراتهم على تبسيط بعض الموضوعات والمسائل التي لعلها كانت قد عُرضت بطريقة صعبة، فلهم مني الشكر.

وإني إذ أقدم هذا الجهد المتواضع أود أن أطلب من المطّلعين عليه من أساتذة وباحثين ومستفيدين ألا يبخلوا علي بالملحوظات والمقترحات والاستدراكات، فقد يجد القارئ خطأ يجب تصحيحه، أو غامضا يجدر إيضاحه، أو فصلا ينبغي إشباعه، أو موضوعاً يحسُن عرضه ودراسته. فمن فعل ذلك فله مني جزيل الشكر والعرفان والدعاء بالخير والتوفيق. كما أني أطلب من هؤلاء جميعا الدعاء لي في ظهر الغيب برفع الدرجات وغفران الزلاّت والعون على إخلاص النيّات.

والله أسأل أن يمنَ عليَ فيوفقني لإتمام بقية كتب السلسلة بالشكل الذي تكون فيه

مرجعا في موضوعها، كما أسأله سبحانه أن يجعل هذا العمل عملاً خالصا متقبّلاً، وأن يعم به النفع والفائدة، وأن يجعله من العلم الذي يُنتفع به، ليكون أجره متصلا حتى بعد أن يُوارى صاحبُه الثرى.

محمود نديم بن عبد الوهاب نحاس

المحتويات

إهداء هـ

مقدمة ز

الفصل الأول: مدخل إلى الموضوع

١ – ١ نظرة تاريخية ٣

١ – ٢ عمل مهندس إنشاءات الطائرات ٨

١ – ٣ مراحل تصميم المركبات الطائرة ٩

١ – ٤ أهمية موضوع تحليل الإنشاءات ١١

١ – ٥ مراحل التصميم والتحليل الإنشائي ١١

١ – ٦ تنظيم هذا الكتاب ١٥

١ – ٧ أسئلة عامة ١٧

الفصل الثاني: التفصيل الإنشائي للطائرات

٢ – ١ مهمة الأجزاء الإنشائية ٢١

٢ – ٢ التركيب الإنشائي ٢١

٢ – ٢ – ١ التركيب الإنشائي للجناح ٢٢

٢ – ٢ – ٢ التركيب الإنشائي لبدن الطائرة ٢٥

٢ – ٣ تصنيع الأجزاء الإنشائية ٢٧

٢ – ٣ – ١ المجمّعات الفرعية ٢٧

٢ – ٣ – ٢ تصنيع الجناح ٢٨

٢ – ٣ – ٣ تصنيع البدن ٣٣

٢ – ٣ – ٤ التجميع النهائي ٣٤
٢ – ٤ التمثيل الإنشائي أو النمذجة ٣٤
٢ – ٥ مسائل محلولة ٣٨
٢–٦ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٤٦

الفصل الثالث: مواد إنشاءات الطائرات

٣ – ١ مقدمة ٥١
٣ – ٢ المواد الهندسية المستخدَمة في إنشاءات الطائرات ٥١
٣ – ٣ سلوك المواد وخواصها ٥٧
٣ – ٣ – ١ سلوك المواد تحت أحمال الشد ٥٧
٣ – ٣ – ٢ سلوك المواد تحت أحمال الضغط والقص ٦٤
٣ –٤ تمثيل منحنيات الإجهاد–الانفعال ٦٦
٣ – ٥ معادلة منحنى الإجهاد–الانفعال ٦٨
٣ – ٦ تأثير درجة الحرارة على خواص المواد ٧٢
٣ – ٧ جداول خواص المواد ٧٤
٣ – ٨ الزحف في المواد ٧٩
٣ – ٩ الكَلال (أو التعب) في المواد ٨٢
٣ – ١٠ تأثير الأحمال المتحركة أو التحريكية ٨٦
٣ – ١١ اختيار المادة لعنصر إنشائي ٨٧
٣ – ١٢ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٨٧

الفصل الرابع: الأحمال على إنشاءات الطائرات

٤ – ١ مقدمة ٩١

٤ – ٢ تصنيف الأحمال على إنشاءات الطائرات ٩١
٤ – ٣ تعريف الأحمال ٩٤
٤ – ٣ – ١ الحمل الحدّي أو الحمل المطبّق ٩٤
٤ – ٣ – ٢ حمل الإذعان أو حمل الصمود ٩٥
٤ – ٣ – ٣ الحمل الأقصى أو حمل التصميم ٩٧
٤ – ٤ قوى التحريك الهوائي ٩٩
٤ – ٥ قوى العطالة (قوى القصور الذاتي) ١٠٢
٤ – ٦ عامل الحمل ١٠٦
٤ – ٧ غلاف الطيران ١١٠
٤ – ٨ القوى على الطائرة ١١٤
٤ – ٨ – ١ الطيران المستقر ١١٥
٤ – ٨ – ٢ الطيران المتسارع ١١٧
٤ – ٨ – ٣ تقويم الطائرة بشكل مستقر بعد انقضاض ١١٨
٤ – ٨ – ٤ الدوران العطوفي الصحيح ١٢٠
٤ – ٩ عامل حمل العصف ١٢٢
٤ – ١٠ غلاف العصف ١٢٥
٤ – ١١ تأثير مرونة إنشاءات الطائرات ١٢٨
٤ – ١٢ حالات أخرى من التحميل ١٢٩
٤ – ١٣ مسائل محلولة ١٢٩
٤ – ١٤ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ١٤٣

الفصل الخامس :

عزوم الانحناء والالتواء وقوى القص على إنشاءات الطائرات

٥ – ١ مقدمة ١٤٩

٥ – ٢ قوى القص وعزوم الانحناء ١٥١

٥ – ٣ القوى الطولية وعزوم الالتواء ١٥٤

٥ – ٤ قوى القص وعزوم الانحناء وعزوم الالتواء على الأجنحة ١٥٤

٥ – ٥ قوى القص وعزوم الانحناء على بدن الطائرة ١٥٦

٥ – ٦ مسائل محلولة ١٥٧

٥ – ٧ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ١٨٨

الفصل السادس: مبادئ نظرية المرونة

٦ – ١ مقدمة ١٩٣

٦ – ٢ الإجهاد ١٩٣

٦ – ٣ معادلات التوازن ١٩٧

٦ – ٤ حالة الإجهادات المستوية ٢٠١

٦ – ٥ الظروف الحدّية ٢٠٢

٦ – ٦ ملحوظة مهمة ٢٠٣

٦ – ٧ تحويل الإجهادات ٢٠٤

٦ – ٨ الإجهادات الرئيسية أو الأساسية ٢٠٧

٦ – ٩ استنتاجات مهمة ٢١٠

٦ – ١٠ دائرة مور للإجهادات ٢١١

٦ – ١١ الانفعال ٢١٥

٦ – ١٢ معادلات التناسق أو التوافق ٢٢٠
٦ – ١٣ حالة الانفعالات المستوية ٢٢٢
٦ – ١٤ تحويل الانفعالات ٢٢٣
٦ – ١٥ الانفعالات الرئيسية أو الأساسية ٢٢٦
٦ – ١٦ دائرة مور للانفعالات ٢٢٧
٦ – ١٧ العلاقات بين الإجهادات والانفعالات ٢٢٧
٦ – ١٨ حل معادلات المرونة ٢٣٢
٦ – ١٩ المسائل ثنائية البعد ٢٣٤
٦ – ١٩ – ١ حالة الإجهادات المستوية ٢٣٤
٦ – ١٩ – ٢ حالة الانفعالات المستوية ٢٣٦
٦ – ٢٠ دوال الإجهاد ٢٣٧
٦ – ٢١ الطريقة العكسية ٢٣٩
٦ – ٢٢ الطريقة شبه العكسية ٢٤٢
٦ – ٢٣ نظريات الانهيار ٢٤٥
٦ – ٢٤ مسائل محلولة ٢٤٩
٦ – ٢٥ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٢٧٠

الفصل السابع: انحناء العتبات رقيقة الجدران

٧ – ١ مقدمة ٢٧٧
٧ – ٢ النظرية الهندسية العامة للانحناء ٢٧٧
٧ – ٢ – ١ اصطلاح الإشارات والرموز ٢٧٨
٧ – ٢ – ٢ تحليل عزوم الانحناء ٢٨٠
٧ – ٢ – ٣ إجهادات الإنحناء ٢٨١

٧ – ٢ – ٤ حالات خاصة ٢٨٥
٧ – ٢ – ٥ إجهاد الانحناء والمحاور الرئيسية ٢٨٦
٧ – ٢ – ٦ إجهاد الانحناء والمحور المحايد ٢٨٦
٧ – ٣ العلاقة بين عزوم الانحناء وقوى القص ٢٨٨
٧ – ٤ الانحراف الناتج عن الانحناء ٢٨٩
٧ – ٥ انحناء العتبات رقيقة الجدران ٢٩١
٧ – ٦ انحناء الإنشاءات التمثيلية ٢٩٢
٧ – ٧ مدى صحة تطبيق نظرية الانحناء ٢٩٣
٧ – ٨ مسائل محلولة ٢٩٤
٧ – ٩ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٣١٦

الفصل الثامن: التواء الإنشاءات رقيقة الجدران

٨ – ١ مقدمة ٣٢١
٨ – ٢ التواء القضبان ذات المقاطع غير الدائرية ٣٢١
٨ – ٢ – ١ التواء القضبان ذات المقطع بشكل قطع ناقص ٣٢٣
٨ – ٢ – ٢ التواء القضبان ذات المقاطع المستطيلة ٣٢٤
٨ – ٢ – ٣ مقطع شريحة مستطيلة نحيفة ٣٢٥
٨ – ٣ التواء الإنشاءات رقيقة الجدران ذات المقاطع المفتوحة ٣٢٦
٨ – ٤ اعوجاج أو تلوّي المقاطع المفتوحة ٣٢٧
٨ – ٥ التواء الإنشاءات رقيقة الجدران ذات المقاطع المغلقة ٣٣٢
٨ – ٦ اعوجاج أو تلوّي المقاطع المغلقة ٣٤٠
٨ – ٧ التواء المقاطع المغلقة متعددة الخلايا ٣٤٣
٨ – ٨ التواء الإنشاءات التمثيلية ٣٤٧

٨ – ٩ التواء الإنشاءات ذات المقاطع المركّبة ٣٤٧
٨ – ١٠ دقة نظرية الالتواء ٣٤٨
٨ – ١١ مسائل محلولة ٣٤٩
٨ – ١٢ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٣٧٥

الفصل التاسع: القص في العتبات رقيقة الجدران

٩ – ١ مقدمة ٣٧٩
٩ – ٢ العلاقة بين الإجهادات والانفعالات في مقاطع العتبات رقيقة الجدران ٣٧٩
٩ – ٣ القص في العتبات رقيقة الجدران ذات المقاطع المفتوحة ٣٨١
٩ – ٤ حالات خاصة ٣٨٥
٩ – ٥ مركز القص في المقاطع المفتوحة ٣٨٥
٩ – ٦ القص في المقاطع التمثيلية المفتوحة ٣٨٧
٩ – ٧ القص في العتبات رقيقة الجدران ذات المقاطع المغلقة ٣٨٩
٩ – ٨ انفتال وتلوّي المقاطع المغلقة المعرّضة للقص ٣٩٢
٩ – ٩ مركز القص للمقاطع المغلقة ٣٩٣
٩ – ١٠ القص في المقاطع التمثيلية المغلقة ٣٩٤
٩ – ١١ القص في العتبات رقيقة الجدران ذات المقاطع المغلقة المتعددة الخلايا ٣٩٥
٩ – ١٢ القص في المقاطع التمثيلية متعددة الخلايا ٣٩٥
٩ – ١٣ القص في العتبات ذات المقاطع المركّبة ٣٩٦
٩ – ١٤ طريقة بديلة لحساب دفق القص في الإنشاءات التمثيلية ٣٩٦
٩ – ١٥ مسائل محلولة ٣٩٧
٩ – ١٦ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٤٣٠

الفصل العاشر: تحليل إنشاءات عدة الحط

١٠ - ١ مقدمة ٤٣٥

١٠ - ٢ استخدامات عدة الحط ٤٣٥

١٠ - ٣ أنواع عدة الحط ٤٣٦

١٠ - ٤ امتصاص الصدمات ٤٣٧

١٠ - ٥ تحليل إنشاءات عدة الحط ٤٣٩

١٠ - ٦ مسائل محلولة ٤٤٠

١٠ - ٧ أسئلة عامة ومسائل غير محلولة ٤٥٣

ملحقات

الملحق (أ): مراجعة مختصرة لمبادئ مقاومة المواد

أ - ١ القضبان ٤٥٩

أ - ٢ أوعية الضغط الأسطوانية رقيقة الجدران ٤٦٠

أ - ٣ التواء القضبان دائرية المقطع ٤٦١

أ - ٤ انحناء (أو ثني) العتبات البسيطة ٤٦٢

أ - ٥ إجهادات الانحناء ٤٦٤

أ - ٦ إجهادات القص في العتبات ٤٦٦

أ - ٧ مسائل محلولة ٤٦٨

الملحق (ب): خواص المقاطع وخواص الأجسام

ب - ١ مقدمة ٤٨٣

ب - ٢ مركز الثقل ٤٨٣

ب - ٣ عزم عطالة المساحة ٤٨٤

ب – ٤ نصف قطر التدويم ٤٨٥
ب – ٥ نظرية المحاور المتوازية ٤٨٦
ب – ٦ عزوم العطالة حول محاور مائلة ٤٨٦
ب – ٧ خواص بعض المقاطع الشهيرة ٤٨٨
ب – ٨ عزوم عطالة الكتل ٤٨٩
ب – ٩ نظرية المحاور المتوازية لعزوم عطالة الكتل ٤٩١
ب – ١٠ خواص بعض الأجسام الشهيرة ٤٩١
ب – ١١ مسائل محلولة ٤٩٢
جدول ب – ١ خواص بعض المقاطع الشهيرة ٥٠٨
جدول ب – ٢ خواص بعض المقاطع رقيقة الجدران ٥١٣
جدول ب – ٣ خواص بعض المساحات الشهيرة ٥١٦
جدول ب – ٤ خواص بعض الأجسام الشهيرة ٥١٨

الملحق (ج): مراجعة مختصرة لبعض مبادئ الميكانيكا

ج – ١ مقدمة ٥٢٥
ج – ٢ معادلات توازن القوى ٥٢٥
ج – ٣ معادلات التوازن ٥٢٥
ج – ٣ – ١ المعادلات العامة للتوازن في الفراغ ٥٢٥
ج – ٣ – ٢ معادلات التوازن لقوى فراغية متلاقية ٥٢٦
ج – ٣ – ٣ معادلات التوازن لقوى فراغية متوازية ٥٢٦
ج – ٣ – ٤ المعادلات العامة للتوازن في المستوي ٥٢٧
ج – ٣ – ٥ معادلات التوازن لقوى مستوية متلاقية ٥٢٨
ج – ٣ – ٦ معادلات التوازن لقوى مستوية متوازية ٥٢٨

ج - ٣ - ٧ معادلات التوازن لقوى متسامتة ٥٢٨
ج - ٤ ردود الأفعال ٥٢٩
ج - ٥ الإنشاءات المحددة والإنشاءات غير المحددة سكونيًا ٥٣٠
ج - ٦ مسائل محلولة ٥٣١
المراجع ٥٤٩
معجم المصطلحات العلمية: عربي - انجليزي ٥٥٣
معجم المصطلحات العلمية: انجليزي - عربي ٥٦٧