دانشکده‌ی مهندسی

تحلیل و آسیب‌یابی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه

فریبا حسن‌زاده توکلی

رساله‌ی دکتری سازه

دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

گروه عمران

پاییز ۱۳۹۲

دانشکده‌ی مهندسی

تحلیل و آسیب‌یابی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه

فریبا حسن‌زاده توکلی

دارای

مدرک کارشناسی عمران- عمران از دانشگاه سمنان، ۱۳۷۶

مدرک کارشناسی ارشد عمران- سازه از دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶

رساله‌ی دکتری سازه

دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

گروه عمران

۲ آبان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تحلیل و آسیب‌یابی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه

چکیده: لایه‌لایه‌شدگی و از میان رفتن پیوند بین لایه‌های گوناگون که سبب به‌خطر افتادن کارایی و یک‌پارچگی می‌گردد، یکی از علت‌های مهم گسیختگی سازه‌های مرکب چندلایه می‌باشد. درآغاز این رساله، فن‌های مختلف آسیب‌یابی برای سازه‌های مرکب چندلایه دسته‌بندی می‌شوند. برای هر فرآیند، شرح کاستی‌ها و توانمندی‌های آن می‌آید. سپس، به رابطه‌های تنش و کرنش در چندلایه‌های مرکب پرداخته خواهد شد. همچنین، مروری کوتاه بر نگره‌های سازه‌ای انجام می‌پذیرد. به‌دنبال این‌ها، درباره‌ی پژوهش‌های پیشینیان در تحلیل تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه سخن به‌میان می‌آید. باید آگاه بود، استفاده از یک الگوی تحلیلی دقیق با سرعت همگرایی زیاد در جزء ترک‌خورده، سبب دست‌یابی به پاسخ‌های درست در فرآیند حل مساله‌ی بهینه‌سازی و یافتن محل و اندازه‌ی لایه‌لایه‌شدگی می‌گردد. از این‌رو، یک جزء شش‌پهلوی سه‌بعدی دارای میان‌رویه برای واکاوی تیرهای مرکب چندلایه با لایه‌لایه‌شدگی پیشنهاد می‌شود. برای تحلیل صفحه‌های چندلایه‌ی خمشی و ساندویچی، برپایه‌ی نگره‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالا، یک جزء مثلثی صفحه‌ی خمشی با سازگاری C^1 رابطه‌سازی می‌گردد. افزون‌بر این، اثر افزایش شمار گره‌ها و مرتبه‌ی تابع‌های درون‌یاب این جزء در تحلیل تنش‌های بین‌لایه‌ای صفحه‌های خمشی دارای لبه‌ی آزاد بررسی خواهد شد. سپس، با بهره‌جویی از نگره‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالا، یک رابطه‌سازی نو برای تحلیل کمانشی و پس‌کمانشی صفحه‌های چندلایه، با لایه‌لایه‌شدگی‌های میانی، زیر بار فشاری پیشنهاد می‌گردد. راست‌آزمایی هر یک از این جزءها با شماری از مساله‌های سنگ نشانه انجام می‌پذیرد. هدف دیگر این رساله، رسیدن به راه‌کاری نوین در آسیب‌یابی سازه‌های مرکب چندلایه است. فن شناخت آسیب با رابطه‌سازی یک مسأله‌ی وارون انجام می‌شود که درآن پاسخ‌های تحلیل جزءهای پیشنهادی در یافتن اندازه و جای لایه‌لایه‌شدگی به‌کار می‌روند. حل مسأله‌ی وارون با فن بهینه‌سازی و کمینه‌کردن تابع هدف و به‌دست آوردن عامل‌های بهینه‌ی لایه‌لایه‌شدگی انجام می‌پذیرد. یک فرآیند حسابگری زیستی بهبود می‌یابد تا مساله‌های آسیب‌یابی را با انبارسازی رایانه‌ای و نیز تلاش محاسباتی کم‌تری حل کند. سرانجام، درستی فرآیند آسیب‌یابی با حل شماری از مساله‌ها ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌یابی، بهینه‌سازی، تحلیل جزءهای محدود، حسابگری زیستی، سازه‌های مرکب چندلایه، لایه‌لایه‌شدگی.

سپاس‌گزاری

در آغاز نویسنده بر خود لازم می‌داند از زحمت‌های دلسوزانه و بی‌دریغ استادهای گران‌قدر، جناب آقایان دکتر محمد رضایی‌پژند و دکتر فرزاد شهابیان‌مقدم که در زمینه‌ی انتخاب موضوع، فراهم‌کردن منبع‌ها، تدوین پایان‌نامه و مشورت‌های دائمی در فرآیند پژوهش این‌جانب را یاری نمودند، صمیمانه قدردانی نماید. در پایان از پروردگار یکتا، برای این بزرگواران و دیگر استادهای دلسوز گروه عمران دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی، بهروزی، سربلندی و توفیق‌های فراوان آرزومند است.

فریبا حسن‌زاده‌توکلی

نمایه‌ی بخش‌ها

چکیده ..... یک
سپاس‌گزاری ..... دو
نمایه‌ی بخش‌ها ..... سه
نمایه‌ی نشانه‌ها ..... هفت
نمایه‌ی شکل‌ها ..... ده
نمایه‌ی جدول‌ها ..... سیزده

۱- فصل یکم: آغاز سخن ۱

۱-۱- پیش‌گفتار ۱
۱-۲- واکاوی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه ۱
۱-۳- نیاز به انجام پژوهش ۲
۱-۴- سامان‌دهی ۳

۲- فصل دوم: شیوه‌های آسیب‌یابی چندلایه‌ها ۵

۲-۱- پیش‌گفتار ۵
۲-۲- آسیب‌یابی سازه‌ها ۵
۲-۳- آسیب‌یابی چندلایه‌ها ۷
۲-۳-۱- آسیب‌یابی با وارسی داخلی ۷
۲-۳-۲- پژوهش‌های پیشینیان ۹

۳- فصل سوم: ماده‌ی مرکب چندلایه ۱۳

۳-۱- پیش‌گفتار ۱۳
۳-۲- ویژگی‌های ماده‌ی مرکب ۱۳
۳-۲-۱- نگره‌ی کشسانی ناهمسان‌گرد ۱۴
۳-۲-۲- رابطه‌های ساختاری ماده ۱۴
۳-۲-۳- نگره‌های سازه‌ای تحلیل سازه‌های مرکب چندلایه ۱۹
۳-۳- پژوهش‌های پیشینیان ۲۳
۳-۳-۱- رابطه‌سازی چندلایه‌ها ۲۴
۳-۳-۱-۱- رابطه‌سازی ناخطی هندسی چندلایه‌ها ۲۴

۳-۳-۱-۲- رابطه‌سازی صفحه‌ی خمشی چندلایه..... ۲۵
۳-۳-۱-۳- رابطه‌سازی صفحه‌ی خمشی چندلایه دارای لبه‌ی آزاد..... ۲۶
۳-۳-۱-۴- کمانش صفحه‌های مرکب چندلایه..... ۲۷
۳-۳-۲- لایه‌لایه‌شدگی در چندلایه‌ها..... ۲۷
۴- فصل چهارم: جزءها و رابطه‌سازی‌های پیشنهادی..... ۳۰
۴-۱- پیش‌گفتار..... ۳۰
۴-۲- رابطه‌سازی جزء تیری پیشنهادی..... ۳۰
۴-۲-۱- گسستگی داخلی..... ۳۱
۴-۲-۲- قراردادن میان‌رویه در جزء شش‌پهلو..... ۳۴
۴-۲-۳- رشد لایه‌لایه‌شدگی..... ۳۸
۴-۲-۴- نمونه‌های عددی تیرهای چندلایه بدون لایه‌لایه‌شدگی..... ۳۹
۴-۲-۴-۱- تیر یک‌لایه‌ی دوسر ساده..... ۴۲
۴-۲-۴-۲- تیر دولایه‌ی متعامد دوسر ساده..... ۴۴
۴-۲-۴-۳- تیر سه‌لایه‌ی متعامد دوسر ساده..... ۴۸
۴-۲-۴-۴- تیر ساندویچی پنج‌لایه‌ی متعامد دوسر ساده..... ۵۰
۴-۲-۴-۵- تیر سه‌لایه‌ی متعامد دارای تکیه‌گاه گیردار..... ۵۳
۴-۲-۵- نمونه‌های عددی تیرهای چندلایه دارای لایه‌لایه‌شدگی..... ۵۴
۴-۲-۵-۱- نمونه‌ی یکم..... ۵۴
۴-۲-۵-۲- نمونه‌ی دوم..... ۵۵
۴-۳- رابطه‌سازی جزء خمشی صفحه‌ای..... ۵۸
۴-۳-۱- الگوسازی صفحه‌ی خمشی..... ۵۸
۴-۳-۲- جزء مثلثی سیزده‌گرهی..... ۵۹
۴-۳-۳- نمونه‌های عددی ۶۴
۴-۳-۳-۱- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد مربعی دارای تکیه‌گاه ساده..... ۶۵
۴-۳-۳-۲- صفحه‌ی چندلایه‌ی ضربدری مربعی دارای تکیه‌گاه ساده..... ۶۷
۴-۳-۳-۳- صفحه‌ی چندلایه‌ی کج دارای تکیه‌گاه ساده..... ۶۸
۴-۳-۳-۴- صفحه‌ی مرکب چندلایه‌ی ساندویچی دارای تکیه‌گاه ساده..... ۷۰
۴-۳-۳-۵- صفحه‌ی نواری مرکب چندلایه دارای تکیه‌گاه ساده..... ۷۱
۴-۳-۳-۶- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای دو لبه‌ی ساده‌ی روبه‌روی هم و دو لبه‌ی آزاد..... ۷۳
۴-۴- افزایش مرتبه‌ی تابع‌های درون‌یاب و شمار گره‌ها در چندلایه‌های دارای لبه‌ی آزاد..... ۷۵
۴-۴-۱- الگوسازی جزءهای محدود..... ۷۵
۴-۴-۲- نمونه‌های عددی ۷۹
۴-۴-۲-۱- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای دو لبه‌ی آزاد و دو لبه‌ی ساده‌ی روبه‌روی هم..... ۷۹

۴-۴-۲-۲- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای دو لبه‌ی آزاد روبه‌روی هم و دو لبه‌ی ساده..... ۸۰
۴-۴-۲-۳- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای دو لبه‌ی ساده‌ی روبه‌روی هم، یک لبه‌ی آزاد و یک لبه‌ی گیردار..... ۸۱
۴-۴-۲-۴- صفحه‌ی چندلایه با چیدمان [0°/45°/0°/90°]..... ۸۶
۴-۵- کمانش و پس‌کمانش صفحه‌های مرکب چندلایه دارای لایه‌لایه‌شدگی..... ۸۹
۴-۵-۱- رابطه‌سازی..... ۸۹
۴-۵-۲- الگوسازی جزء محدود..... ۹۲
۴-۵-۳- نمونه‌های عددی..... ۹۴
۴-۵-۳-۱- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی..... ۹۵
۴-۵-۳-۲- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای دو لایه‌لایه‌شدگی میانی..... ۹۸
۴-۶-نتیجه‌گیری..... ۱۰۰
۵- فصل پنجم: آسیب‌یابی..... ۱۰۲
۵-۱- پیش‌گفتار..... ۱۰۲
۵-۲- روش‌های زیستی..... ۱۰۲
۵-۲-۱- حسابگری زیستی ساده..... ۱۰۳
۵-۲-۲- ویژگی‌های حسابگری زیستی..... ۱۰۴
۵-۲-۳- فرآیند حسابگری زیستی..... ۱۰۵
۵-۲-۴- روش‌های گوناگون حسابگری زیستی..... ۱۰۸
۵-۳- حسابگری زیستی در سازه‌های مرکب چندلایه..... ۱۰۹
۵-۳-۱- فرآیند پیشنهادی آسیب‌یابی..... ۱۱۰
۵-۳-۲- گزینش تابع هدف..... ۱۱۰
۵-۳-۳- نمونه‌های عددی..... ۱۱۱
۵-۳-۳-۱- تیر چندلایه‌ی یک‌سر گیردار دارای چندین لایه‌لایه‌شدگی..... ۱۱۲
۵-۳-۳-۲- تیر چندلایه‌ی دوسر ساده دارای یک لایه‌لایه‌شدگی..... ۱۱۹
۵-۴- فرآیند بهبودیافته‌ی دو گامی بهینه‌سازی ۱۲۲
۵-۴-۱- نمونه‌های عددی..... ۱۲۳
۵-۴-۱-۱- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی..... ۱۲۳
۵-۴-۱-۲- صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد دارای دو لایه‌لایه‌شدگی میانی..... ۱۲۵
۵-۵- نتیجه‌گیری..... ۱۲۷
۶-فصل ششم: پایان سخن..... ۱۲۸
۶-۱- پیش‌گفتار..... ۱۲۸
۶-۲- گزیده‌ی رساله..... ۱۲۸
۶-۳- نوآوری..... ۱۳۰

۶-۴- دست‌آورد..... ۱۳۱
۶-۴-۱- جزءهای پیشنهادی..... ۱۳۱
۶-۴-۲- فرآیند آسیب‌یابی..... ۱۳۲
۶-۵- پژوهش‌های آیندگان..... ۱۳۲
دست‌مایه‌ها..... ۱۳۴
واژه‌نامه..... ۱۴۱
نام‌نامه..... ۱۴۶
پیوست یکم: نمودار جریان برنامه‌ی رایانه‌ای..... ۱۴۹

نمایه‌ی نشانه‌ها

سطح ..... $\partial\beta$

حجم ..... β

سطح گسستگی ..... Γ

کارمایه‌ی شکست ..... G_f

کارمایه‌ی شکست حالت یکم ..... G_I

میدان جابه‌جایی پیوسته ..... $\overline{u}$

میدان جابه‌جایی گسسته ..... $w^{\pm}$

جابه‌جایی مجازی لبه‌های ترک ..... δw

جابه‌جایی لبه‌های ترک مماسی و عمودی ..... w_s, w_n

بردارهای نیروی سطحی روی بخش‌های مثبت و منفی ..... t^-, t^+

بردارهای نیروی سطحی مماسی و عمودی ..... t_s, t_n

راستای عمودی ..... n

راستای مماسی ..... s, t

ایستادگی کششی ..... f_t

درازای ناپیوستگی ..... L_Γ

مشتق تابع‌های درون‌یاب بخش‌های پیوسته و گسسته ..... $B_u, B_w^{\pm}$

جابه‌جایی‌های گرهی ..... $d_u, d_w^{\pm}$

تابع‌های وزنی ..... $\beta(r)$

مجموعه‌ی ترک آغازین ..... A

مجموعه‌ی جزءهای گذری ..... N

فاصله‌ی بین نقطه‌ی x و نوک ترک ..... r

مکان نوک ترک ..... x_Γ

درایه‌های جابه‌جایی درون‌صفحه‌ای گره‌ها ..... u, v

جابه‌جایی جانبی گره‌ها ..... w

درایه‌های جابه‌جایی میان‌صفحه ..... u_0, v_0, w_0

مشتق‌های جزئی خیز نسبت به سه راستای x، y و n ..... $w_{,x}, w_{,y}, w_{,n}$

دوران‌های خمشی ..... θ_x, θ_y

تابع درون‌یاب ..... $[N], N_u, N_w^{\pm}$

بردارهای ضریب‌های مجهول ..... $\{\alpha\}, \{\beta\}, \{\gamma\}, \{\lambda\}, \{\mu\}, \{\psi\}$

مختصه‌های بدون بعد ..... $\xi_i, \xi_j, \xi_k, \xi, \eta, \zeta$

بردار جابه‌جایی گرهی ..... $\{\delta\}$

بردار کلی ضریب‌های مجهول ..... $\{\Delta\}$

زاویه‌ی بین بردار $\mathbf{n}_j$ و راستای $\mathbf{x}$ ..... φ_j

مختصه‌ی گره‌ی $\mathbf{j}$ ..... x_j, y_j

درایه‌های کرنش برشی عرضی میانگین ..... φ_x, φ_y

بردار کرنش ..... $\{\varepsilon\}$

بردار کرنش درون‌صفحه‌ای ..... $\{\varepsilon_b\}$

بردار کرنش برشی عرضی ..... $\{\varepsilon_s\}$

بردار تنش ..... $\{\sigma\}$

بردار تنش درون‌صفحه‌ای ..... $\{\sigma_b\}$

بردار تنش برشی عرضی ..... $\{\sigma_s\}$

فاصله از میان‌صفحه ..... z

ثابت‌های دگرگون شده‌ی ماده در خمش ..... $[\overline{Q}_b]$

ثابت‌های دگرگون شده‌ی ماده در برش ..... $[\overline{Q}_s]$

ماتریس ماده‌ی چندلایه ..... $[D]$

ماتریس ماده‌ی چندلایه در خمش ..... $[D_b]$

ماتریس ماده‌ی چندلایه در برش ..... $[D_s]$

ماتریس کرنش-جابه‌جایی ..... $[B]$

ماتریس سختی جزء ..... $[K]$

کارمایه‌ی نهفته V

بردار بار گرهی ..... $\{P\}$

درازای چندلایه ..... a

پهنای چندلایه ..... b

ضخامت چندلایه ..... h, t

ضریب کشسانی ..... E_i

ضریب برشی ..... G_{ij}

نسبت پواسون ..... ν_{ij}

درازای رشته ..... L_C

تنش‌های تحلیلی چندلایه بدون لایه‌لایه‌شدگی ..... σ_j^a

تنش‌های اندازه‌گیری شده‌ی چندلایه دارای لایه‌لایه‌شدگی ..... σ_j^r
شمار نقطه‌های گوس ..... NOG
شمار نسل ..... N_{pop}

نمایه‌ی شکل‌ها

شکل (۳-۲-۱) وابستگی مختصه‌ی اصلی ماده و هندسی..... ۱۸

شکل (۳-۲-۲) محورهای اصلی و جابه‌جایی‌های چندلایه..... ۲۰

شکل (۳-۲-۳) نیروهای صفحه‌ای و گشتاورهای یک چندلایه‌ی تخت..... ۲۱

شکل (۳-۲-۴) فاصله‌ی لایه‌ها از سطح میانی یک چندلایه..... ۲۲

شکل (۴-۲-۱) تقسیم حجم دارای گسستگی Γ ۳۱

شکل (۴-۲-۲) جزء شش‌پهلو دارای میان‌رویه..... ۳۴

شکل (۴-۲-۳) هندسه و شبکه‌بندی تیرهای چندلایه..... ۴۱

شکل (۴-۲-۴) هم‌شماری جابه‌جایی‌های به‌هنجار تیر یک‌لایه برای (۰، a/۲)..... ۴۲

شکل (۴-۲-۵) هم‌شماری تنش‌های عمودی درون‌صفحه‌ای به‌هنجار تیر یک‌لایه..... ۴۳

شکل (۴-۲-۶) هم‌شماری تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار تیر یک‌لایه..... ۴۳

شکل (۴-۲-۷) هم‌شماری جابه‌جایی‌های جانبی به‌هنجار تیر دولایه‌ی [0°/90°] برای (۰، a/۲)..... ۴۵

شکل (۴-۲-۸) هم‌شماری جابه‌جایی‌های درون‌صفحه‌ای به‌هنجار تیر دولایه‌ی [0°/90°]..... ۴۵

شکل (۴-۲-۹) هم‌شماری تنش‌های عمودی عرضی به‌هنجار تیر دولایه‌ی [0°/90°]..... ۴۶

شکل (۴-۲-۱۰) هم‌شماری تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار تیر دولایه‌ی [0°/90°]..... ۴۶

شکل (۴-۲-۱۱) هم‌شماری تنش‌های عمودی درون‌صفحه‌ای به‌هنجار تیر دولایه‌ی [0°/90°]..... ۴۷

شکل (۴-۲-۱۲) هم‌شماری تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار تیر سه‌لایه‌ی [0°/90°/0°]..... ۴۸

شکل (۴-۲-۱۳) هم‌شماری تنش‌های عمودی عرضی به‌هنجار تیر سه‌لایه‌ی [0°/90°/0°]..... ۴۹

شکل (۴-۲-۱۴) هم‌شماری جابه‌جایی‌های درون‌صفحه‌ای به‌هنجار تیر سه‌لایه‌ی [0°/90°/0°]..... ۴۹

شکل (۴-۲-۱۵) هم‌شماری تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار تیر ساندویچی [90°/0°/هسته/0°/90°] ۵۰

شکل (۴-۲-۱۶) هم‌شماری تنش‌های عمودی عرضی به‌هنجار تیر ساندویچی [90°/0°/هسته/0°/90°] ۵۱

شکل (۴-۲-۱۷) هم‌شماری جابه‌جایی‌های درون‌صفحه‌ای به‌هنجار تیر ساندویچی [90°/0°/هسته/0°/90°] ۵۲

شکل (۴-۲-۱۸) هم‌شماری تنش‌های عمودی درون‌صفحه‌ای به‌هنجار تیر ساندویچی [90°/0°/هسته/0°/90°] ۵۲

شکل (۴-۲-۱۹) هم‌شماری تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار تیر سه‌لایه‌ی [0°/90°/0°] دارای تکیه‌گاه گیردار..... ۵۳

شکل (۴-۲-۲۰) هندسه‌ی تیر یک‌سر گیردار دولبه‌ی متقارن یک راستایی..... ۵۵

شکل (۴-۲-۲۱) شبکه‌بندی تیر یک‌سر گیردار چندلایه..... ۵۶

شکل (۴-۲-۲۲) نمودار بار-جابه‌جایی ماده‌ی مرکب کربن/اپوکسی T300/977-2..... ۵۶

شکل (۴-۲-۲۳) نمودار بار-جابه‌جایی ماده‌ی مرکب کربن/اپوکسی AS4/PEEK ۵۷
شکل (۴-۳-۱) جزء مثلثی سیزده‌گرهی ۵۹
شکل (۴-۳-۲) مختصه‌های جزء مثلثی سیزده‌گرهی ۵۹
شکل (۴-۳-۳) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب خمشی چندلایه ۶۴
شکل (۴-۳-۴) هندسه‌ی صفحه‌ی کج چندلایه ۶۸
شکل (۴-۳-۵) جابه‌جایی‌های درون‌صفحه‌ای به‌هنجار در ضخامت صفحه‌ی چهارلایه برای (a/h=۴) ۷۲
شکل (۴-۳-۶) تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار در ضخامت صفحه‌ی چهارلایه برای (a/h=۴) ۷۲
شکل (۴-۳-۷) تنش‌های برشی بین‌لایه‌ای به‌هنجار $\bar{\tau}_{yz}$ در چندلایه‌ی [0°/90°/90°/0°] ۷۳
شکل (۴-۴-۱) جزءهای مثلثی پانزده و بیست‌وهشت‌گرهی ۷۶
شکل (۴-۴-۲) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای لبه‌ی آزاد ۸۱
شکل (۴-۵-۱) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای چندین لایه‌لایه‌شدگی میانی ۹۳
شکل (۴-۵-۲) الگوی جزء محدود ناحیه‌ی لایه‌لایه‌شده ۹۳
شکل (۴-۵-۳) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی ۹۵
شکل (۴-۵-۴) بار کمانشی چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی برای h_1/h=۰/۲۵ ..... ۹۶
شکل (۴-۵-۵) خیز میانی چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی برای h_1/h=۰/۲۵ و a_i/a=۰/۴ ..... ۹۶
شکل (۴-۵-۶) خیز میانی چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی برای h_1/h=۰/۲۵ و درازاهای مختلف لایه‌لایه‌شدگی ۹۷
شکل (۴-۵-۷) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای چندین لایه‌لایه‌شدگی میانی مختلف ۹۸
شکل (۴-۵-۸) رفتار کمانشی و پس‌کمانشی صفحه‌ی چندلایه دارای لایه‌لایه‌شدگی‌های گونه‌ی یکم ۹۹
شکل (۴-۵-۹) رفتار کمانشی و پس‌کمانشی صفحه‌ی چندلایه دارای لایه‌لایه‌شدگی‌های گونه‌ی دوم ۹۹
شکل (۵-۳-۱) هندسه‌ی تیر یک‌سر گیردار مرکب دوازده‌لایه ۱۱۳
شکل (۵-۳-۲) شمار لایه‌ها و جزءها در تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه ۱۱۴
شکل (۵-۳-۳) تاریخچه‌ی زمانی تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه برای حالت آسیب D_1 در آزمون دوم ۱۱۷
شکل (۵-۳-۴) تاریخچه‌ی زمانی تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه برای حالت آسیب D_1 در آزمون چهارم ۱۱۸
شکل (۵-۳-۵) هندسه‌ی تیر مرکب چندلایه‌ی دوسر ساده ۱۱۹
شکل (۵-۳-۶) شمار لایه‌ها و جزءها در تیر مرکب چندلایه‌ی دوسر ساده ۱۲۰
شکل (۵-۳-۷) تاریخچه‌ی زمانی تیر مرکب چندلایه‌ی دوسر ساده برای حالت آسیب D_2 در دو آزمون ۱۲۲
شکل (۵-۴-۱) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی ۱۲۴
شکل (۵-۴-۲) تاریخچه‌ی زمانی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی میانی در دو آزمون ۱۲۵
شکل (۵-۴-۳) هندسه‌ی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای دو لایه‌لایه‌شدگی میانی ۱۲۶
شکل (۵-۴-۴) تاریخچه‌ی زمانی صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای دو لایه‌لایه‌شدگی میانی در دو آزمون ۱۲۷
شکل (پ-۱) نمودار جریان واکاوی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه دارای لایه‌لایه‌شدگی ۱۵۰

شکل (پ-۲) نمودار جریان فن بهینه‌سازی..... ۱۵۱

شکل (پ-۳) نمودار جریان فرآیند بهبودیافته‌ی بهینه‌سازی..... ۱۵۲

نمایه‌ی جدول‌ها

جدول (۴-۲-۱) شرط‌های تکیه‌گاهی تیرهای مرکب چندلایه..... ۳۹

جدول (۴-۲-۲) ویژگی‌های ماده‌های تیر مرکب چندلایه‌ی ناهمسان‌گرد صفحه‌ای..... ۴۰

جدول (۴-۲-۳) شبکه‌بندی تیرهای مرکب چندلایه..... ۴۰

جدول (۴-۲-۴) هم‌شماری تنش‌ها و جابه‌جایی‌های به‌هنجار تیر یک‌لایه‌ی دوسر ساده..... ۴۲

جدول (۴-۲-۵) هم‌شماری تنش‌ها و جابه‌جایی‌های به‌هنجار تیر دولایه‌ی $[0^o/90^o]$ دوسر ساده..... ۴۴

جدول (۴-۲-۶) هم‌شماری تنش‌ها و جابه‌جایی‌های به‌هنجار تیر سه‌لایه‌ی $[0^o/90^o/0^o]$ دوسر ساده..... ۴۸

جدول (۴-۲-۷) هم‌شماری تنش‌ها و جابه‌جایی‌های به‌هنجار تیر ساندویچی $[0^o/90^o$ /هسته/$90^o/0^o]$ دوسر ساده..... ۵۱

جدول (۴-۲-۸) هم‌شماری تنش‌ها و جابه‌جایی‌های به‌هنجار تیر سه‌لایه‌ی $[0^o/90^o/0^o]$ دارای تکیه‌گاه گیردار..... ۵۳

جدول (۴-۳-۱) هم‌شماری خیز به‌هنجار مرکز صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد مربعی دارای تکیه‌گاه ساده..... ۶۶

جدول (۴-۳-۲) هم‌شماری گشتاور خمشی به‌هنجار مرکز صفحه‌ی چندلایه‌ی متعامد مربعی دارای تکیه‌گاه ساده..... ۶۶

جدول (۴-۳-۳) هم‌شماری خیز و گشتاور خمشی به‌هنجار در مرکز و نیروهای محوری در گوشه‌ی صفحه‌ی مربعی چندلایه‌ی ضربدری..... ۶۷

جدول (۴-۳-۴) هم‌شماری خیز و گشتاورهای خمشی به‌هنجار مرکز صفحه‌ی کج چندلایه..... ۶۹

جدول (۴-۳-۵) هم‌شماری تنش‌های بیشینه‌ی به‌هنجار صفحه‌ی ساندویچی مربعی..... ۷۰

جدول (۴-۳-۶) جابه‌جایی‌های درون‌صفحه‌ای به‌هنجار در ضخامت صفحه‌ی دارای چیدمان نامتقارن $[0^o/90^o/0^o/90^o]$ برای $(a/h=4)$..... ۷۱

جدول (۴-۳-۷) تنش‌های برشی عرضی به‌هنجار در ضخامت صفحه‌ی دارای چیدمان نامتقارن $[0^o/90^o/0^o/90^o]$ برای $(a/h=4)$..... ۷۱

جدول (۴-۳-۸) تنش‌های برشی بین‌لایه‌ای به‌هنجار $\bar{\tau}_{yz}$ چندلایه‌ی $[0^o/90^o/90^o/0^o]$ برای $x=2h$ در میان‌رویه‌ی $0^o/90^o$..... ۷۴

جدول (۴-۴-۱) تنش‌های برشی به‌هنجار $\bar{\tau}_{yz}$ چندلایه‌ی $[0^o/90^o/90^o/0^o]$ برای $x=2h$ در میان‌رویه‌ی $0^o/90^o$ ۸۰

جدول (۴-۴-۲) تنش‌های عمودی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[90_3^o/0^o]$ دارای دو لبه‌ی آزاد روبه‌روی هم و دو لبه‌ی ساده..... ۸۲

جدول (۴-۴-۳) تنش‌های برشی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/90^o]_2$ دارای دو لبه‌ی آزاد روبه‌روی هم و دو لبه‌ی ساده..... ۸۳

جدول (۴-۴-۴) تنش‌های برشی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/90^o]_s$ دارای دو لبه‌ی ساده‌ی روبه‌روی هم، یک لبه‌ی آزاد و یک لبه‌ی گیردار برای $y=0$..... ۸۴

جدول (۴-۴-۵) تنش‌های برشی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/90^o]_s$ دارای دو لبه‌ی ساده‌ی روبه‌روی هم، یک لبه‌ی آزاد و یک لبه‌ی گیردار برای $y=۰/۲b$ ۸۵
جدول (۴-۴-۶) تنش‌های برشی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/90^o]_s$ دارای دو لبه‌ی ساده‌ی روبه‌روی هم، یک لبه‌ی آزاد و یک لبه‌ی گیردار برای $y=۰/۴b$ ۸۶
جدول (۴-۴-۷) تنش‌های عمودی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/45^o/0^o/90^o]$ دارای دو لبه‌ی آزاد روبه‌روی هم و دو لبه‌ی گیردار ۸۷
جدول (۴-۴-۸) تنش‌های برشی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/45^o/0^o/90^o]$ دارای دو لبه‌ی آزاد روبه‌روی هم و دو لبه‌ی گیردار برای $y=b$ ۸۸
جدول (۴-۴-۹) تنش‌های عمودی به‌هنجار صفحه‌ی چندلایه‌ی $[0^o/45^o/0^o/90^o]$ دارای دو لبه‌ی آزاد روبه‌روی هم، یک لبه‌ی ساده و یک لبه‌ی گیردار برای $x=۴h$ ۸۸
جدول (۵-۳-۱) حالت‌ها و ناحیه‌های لایه‌لایه‌شدگی در تیر یک‌سر گیردار چندلایه ۱۱۳
جدول (۵-۳-۲) ویژگی‌های آزمون‌ها برای حالت آسیب $D_۱$ ۱۱۳
جدول (۵-۳-۳) ویژگی‌های آزمون‌ها برای حالت آسیب $D_۲$ ۱۱۴
جدول (۵-۳-۴) ویژگی‌های آزمون‌ها برای حالت آسیب $D_۳$ ۱۱۴
جدول (۵-۳-۵) ویژگی‌های آزمون‌ها برای حالت آسیب $D_۴$ ۱۱۵
جدول (۵-۳-۶) آسیب‌یابی حالت $D_۱$ در تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه ۱۱۵
جدول (۵-۳-۷) آسیب‌یابی حالت $D_۲$ در تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه ۱۱۶
جدول (۵-۳-۸) آسیب‌یابی حالت $D_۳$ در تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه ۱۱۶
جدول (۵-۳-۹) آسیب‌یابی حالت $D_۴$ در تیر یک‌سر گیردار مرکب چندلایه ۱۱۷
جدول (۵-۳-۱۰) ویژگی‌های آزمون‌ها برای حالت‌های آسیب $D_۱$ و $D_۲$ در تیر مرکب چندلایه‌ی دوسر ساده ۱۲۰
جدول (۵-۳-۱۱) آسیب‌یابی حالت $D_۱$ در تیر مرکب چندلایه‌ی دوسر ساده ۱۲۱
جدول (۵-۳-۱۲) آسیب‌یابی حالت $D_۲$ در تیر مرکب چندلایه‌ی دوسر ساده ۱۲۱
جدول (۵-۴-۱) ویژگی‌های آزمون‌ها در گام یکم برای صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی ۱۲۴
جدول (۵-۴-۲) ویژگی‌های آزمون‌ها در گام دوم برای صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای یک لایه‌لایه‌شدگی ۱۲۴
جدول (۵-۴-۳) ویژگی‌های آزمون‌ها در گام یکم برای صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای دو لایه‌لایه‌شدگی ۱۲۶
جدول (۵-۴-۴) ویژگی‌های آزمون‌ها در گام دوم برای صفحه‌ی مرکب چندلایه دارای دو لایه‌لایه‌شدگی ۱۲۶

فصل یکم

آغاز سخن

۱-۱- پیش‌گفتار

تمامی سازه‌های مهندسی، پس از طرح و ساخت، به نگهداری نیاز دارند. باید آگاه بود، آسیب‌یابی و شناخت عضوهای خراب یکی از مهم‌ترین بخش‌های این فرآیند می‌باشد. از این‌رو، روش‌های آسیب‌یابی و رهیافت‌های تحلیلی تخمین خرابی در مهندسی سازه جایگاه ویژه‌ای دارند. باید افزود، سازه‌ی آسیب‌دیده به‌صورت آرمانی رفتار نمی‌کند و ممکن است سبب ناکارآمدی کل سازه شود. بنابراین، آسیب‌یابی و میزان خرابی از دیرباز خواست پژوهش‌گران بوده است و آن‌ها تاکنون به پیشرفت‌های شایانی دست یافته‌اند. یکی از فن‌های تحلیلی در فرآیند آسیب‌یابی، بهره‌جویی از شیوه‌های عددی می‌باشد. روش جزءهای محدود یکی از دقیق‌ترین و کارآمدترین فن‌های عددی برای تحلیل رفتارهای پیچیده‌ی سازه‌ای است. پژوهش‌گران بسیاری با بهره‌جویی از این شیوه‌ی کارا به تحلیل سازه‌های مرکب چندلایه پرداخته‌اند. شمار روزافزون پژوهش‌ها در این زمینه، نشان از توانمندی این روش دارد.

۱-۲- واکاوی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه

در دهه‌های کنونی، از ماده‌های مرکب چندلایه به‌طور گسترده‌ای در شاخه‌های گوناگون مهندسی بهره‌جویی می‌نمایند. این‌ها ویژگی‌های برتری نسبت به دیگر ماده‌ها دارند. از این‌رو، در بسیاری از زمینه‌ها، هم‌چون سازه‌های مهندسی، به‌کار می‌روند. با افزایش شمار سازه‌هایی که از این ماده‌ها ساخته می‌شوند، اهمیت نگهداری و مقاوم‌سازی آن‌ها نیز آشکار می‌گردد. نخستین گام برای ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها، یافتن ناحیه‌های خراب می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، می‌توان از روش‌های آسیب‌یابی بهره جست. سازه‌های مرکب چندلایه آماده‌ی پذیرش شکل‌های گوناگونی از آسیب، همانند: ترک‌های زمینه، شکست تارها و لایه‌لایه‌شدگی، می‌باشند. از میان‌رفتن پیوند بین لایه‌های سازه را لایه‌لایه‌شدگی می‌نامند. این‌گونه از آسیب، به‌ویژه در سازه‌هایی که زیر بارهای فشاری بزرگی قرار دارند، بسیار مهم است. زیرا، در پاره‌ای از سازه‌ها، لایه‌لایه‌شدگی‌های داخلی به کاهش بیش از اندازه‌ی سختی و ایستادگی فشاری می‌انجامد. یافتن آسیب در ماده‌های مرکب بسیار دشوار است. چون، لایه‌لایه‌شدگی و شکست تارها در درون آن‌ها رخ می‌دهد و در بیش‌تر حالت‌ها در سطح قابل‌دیدن نمی‌باشد.

خاطرنشان می‌کند، در دو دهه‌ی گذشته، فن‌های ارزیابی بدون خرابی، که از دقیق‌ترین فرآیندهای وارسی ماده‌های مرکب به‌شمار می‌آیند، به‌طور گسترده‌ای برای رسیدن به اطمینان از یک‌پارچگی سازه‌ها و آسیب‌یابی آن‌ها، به‌کار می‌روند.

برای یافتن لایه‌لایه‌شدگی در سازه‌های مرکب چندلایه، گام نخست داشتن یک الگوی تحلیلی مناسب می‌باشد. این الگو به نوع سازه بستگی دارد و باید توانایی داشته باشد که با سرعت همگرایی زیاد پاسخ‌های درست به‌دست دهد. روش‌های فراوانی برای بهبود بخشیدن واکاوی پیشنهاد کرده‌اند. این فن‌ها سازگاری میان رفتار حقیقی سازه و پاسخ‌های الگوی ریاضی آن را افزایش داده‌اند. در این فرآیند، با بهره‌جویی از پاسخ‌های تجربی و آزمایشگاهی، مانند اندازه‌گیری کرنش‌ها، تنش‌ها، بسامدها و شکل‌های حالت سازه، ماتریس‌های سختی و جرم به‌هنگام می‌شوند. ماتریس‌های جدید، الگوی تحلیلی مناسب و دقیقی را برای سازه‌ی درست به‌دست خواهند داد. با داشتن چنین الگویی، می‌توان به‌آسانی آسیب‌های وارد به سازه را کشف نمود. باید افزود، در فرآیند واکاوی، از تفاوت بین ماتریس‌های سختی و جرم سازه در دو حالت درست و خراب بهره می‌گیرند و به کشف محل و میزان آسیب می‌پردازند. چون ویژگی‌های سازه‌ی خراب، تحلیل‌گر را به سرشت سازه‌ی درست رهنمون می‌سازد، وارونه‌ی فرآیندی که در تحلیل‌های معمولی به‌کار می‌رود، باید همسانی کافی میان الگوهای ریاضی و واقعیت‌ها وجود داشته باشد. به‌خاطر باید سپرد، در برآورد آسیب سازه‌ها، روش‌های ماتریسی از گستردگی، نظم و سادگی بیش‌تری برخوردارند. از این‌رو، کاربرد آن‌ها رو به فزونی است.

۱-۳- نیاز به انجام پژوهش

به‌طور کلی، فن‌های پایش درستی سازه برای یافتن آسیب سازه‌های مرکب چندلایه با تراکم جرم زیاد، پیوندهای فراوان، مقطع‌های متغیر و هندسه‌ی پیچیده با مشکل‌هایی همراه می‌باشند و در ساختمان بافت ماده تغییر ایجاد می‌نمایند. همچنین، چون در بیش‌تر حالت‌ها به شمار زیادی حسگر نیاز است، امکان دارد که یک‌پارچگی و قابلیت اطمینان سازه را از بین ببرند. این شیوه‌ها پرهزینه و زمان‌براند و می‌بایست در زمان وارسی، سامانه در حال بهره‌برداری نباشد. بنابراین، بهره‌جویی از یک راه‌کار نو برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی، در فرآیند یافتن اندازه و جای لایه‌لایه‌شدگی در تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه نیاز می‌باشد.

با افزایش به‌کارگیری ماده‌های مرکب چندلایه در سازه‌ها، به درک درستی از رفتار سازه‌ای آن‌ها نیاز است. پژوهش‌گران بسیاری با بهره‌جویی از شیوه‌ی جزء محدود به تحلیل‌های ایستا، پویا، کمانشی، پس‌کمانشی، گسیختگی، آسیب و رفتارهای دیگر تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه پرداخته‌اند. با وجود این، روش‌های واکاوی کاستی‌هایی دارند. کمی سرعت همگرایی در به‌دست آوردن پاسخ درست و وجود گره‌ها و درجه‌های آزادی زیاد، از مهم‌ترین کاستی‌های موجود در روش‌های عددی می‌باشند که زمان زیادی از فرآیند تحلیل را می‌گیرند. خاطرنشان می‌نماید، بسیاری از شیوه‌های پیشینیان برای بهبود دقت و سرعت همگرایی، سبب پیچیدگی فرآیند عددی تحلیل می‌شود. دست‌یابی به پاسخ‌های دقیق و بهره‌جویی از جزءهای محدود با سرعت همگرایی زیاد، به‌ویژه در مساله‌های ناخطی هندسی و تحلیل طولانی تیرها و صفحه‌های مرکب چندلایه، نیازمند یافتن راه‌کاری نو در این زمینه می‌باشد. یکی از هدف‌های این پژوهش رابطه‌سازی‌های نو است، که در کنار

داشتن دقت و همگرایی زیاد، دارای فرآیند ساده‌تری هم باشند. افزون‌بر این، راه‌کارهایی برای افزایش سرعت همگرایی واکاوی پیشنهاد می‌گردد. به‌سخن دیگر، با کاهش شمار گره‌ها و درجه‌های آزادی، درتحلیل تیرها با لایه‌لایه‌شدگی، صفحه‌های مرکب چندلایه با لایه‌لایه‌شدگی زیر اثر بارهای کمانشی و صفحه‌های خمشی بدون لایه‌لایه‌شدگی، پاسخ‌ها به‌دست می‌آیند. خاطرنشان می‌کند، روش بهینه‌سازی این رساله با فن جزء محدود سازگاری دارد و این ویژگی به دقت و سرعت همگرایی آسیب‌یابی می‌افزاید.

۱-۴- سامان‌دهی

رساله‌ی کنونی شش فصل دارد. در فصل نخست، بحث‌های کلی از تحلیل و آسیب‌یابی سازه‌های مرکب چندلایه می‌آیند. فصل دوم، خلاصه‌ای از روش‌های مختلف پایش درستی سازه‌های مرکب چندلایه و کارهای پژوهشی پیشینیان در زمینه‌ی آسیب‌یابی را دربر دارد. شایان توجه است، به‌سبب گستردگی موضوع و محدود بودن حجم رساله، بررسی همه‌ی اثرهای پیشینیان امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این‌رو، کوشش خواهد شد کارهای اصلی، که کاربرد سازه‌ای دارند، گزیده‌نویسی شوند. ویژگی‌های خوب و بد شیوه‌های گوناگون تا حد ممکن شرح داده خواهد شد. در فصل سوم، خلاصه‌ای از ویژگی‌های ماده‌های مرکب به‌همراه نگره‌های سازه‌ای در تحلیل آن‌ها می‌آیند. در ادامه‌ی این فصل، کارهای پژوهشی پیشینیان در زمینه‌های رابطه‌سازی ناخطی هندسی چندلایه‌های مرکب، رابطه‌سازی خمشی صفحه‌های چندلایه، رابطه‌سازی صفحه‌های خمشی دارای لبه‌ی آزاد، رابطه‌سازی کمانش و پس‌کمانش صفحه‌های مرکب و لایه‌لایه‌شدگی در تیرها و صفحه‌های چندلایه، بررسی می‌گردد.

یادآوری می‌کند، در فرآیند آسیب‌یابی به جزءهای محدود با دقت خوب و سرعت همگرایی زیاد نیاز است. این‌ها باید بتوانند با به‌کارگیری شبکه‌بندی درشت‌تر، پاسخ‌های دقیق را با سرعت همگرایی زیاد به‌دست آورند. از این‌رو، فصل چهارم جزءهای پیشنهادی در زمینه‌ی تحلیل تیرهای چندلایه بدون لایه‌لایه‌شدگی و با لایه‌لایه‌شدگی، تحلیل تنش‌های بین‌لایه‌ای در صفحه‌های مرکب چندلایه‌ی خمشی و تحلیل کمانشی صفحه‌های چندلایه با لایه‌لایه‌شدگی زیر اثر بارهای فشاری را دربر دارد. در این رساله، با تعریف یک میان‌رویه درون یک جزء هم‌عامل در فضای سه‌بعدی و به‌کار بردن میدان جابه‌جایی مرتبه‌ی بالا، یک جزء تیری رابطه‌سازی می‌گردد. این جزء می‌تواند الگوسازی رشد لایه‌لایه‌شدگی را به‌همراه یک جزء هم‌عامل هشت‌گرهی در حالت یکم شکست یا بازشدگی دهانه‌ی ترک، انجام دهد. میان‌رویه‌ی درونی سبب کاهش شمار گره‌ها و درجه‌های آزادی و افزایش سرعت همگرایی می‌گردد. همچنین، با به‌کارگیری نگره‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالا و بهره‌جویی از تابع‌های میدان مرتبه‌ی بالا به‌همراه درجه‌های آزادی با سازگاری C^1، یک جزء صفحه‌ی خمشی معرفی می‌شود که سرعت همگرایی برای رسیدن به پاسخ درست را افزایش می‌دهد. در ادامه، اثر افزایش شمار گره‌ها و افزایش مرتبه‌ی تابع‌های درون‌یاب جزء خمشی برای تحلیل تنش‌های بین‌لایه‌ای، در صفحه‌هایی که دارای لبه‌ی آزاد هستند، بررسی می‌گردد. افزون‌بر این، کمانش صفحه‌های چندلایه با لایه‌لایه‌شدگی زیر اثر بار فشاری و رفتار پس‌کمانشی آن‌ها، با به‌کارگیری نگره‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالا و جزء پیشنهادی صفحه‌ای، رابطه‌سازی و ارزیابی می‌شوند. ریز این کارها در بخش‌های دو تا پنج از فصل چهارم گنجانده خواهد شد. سرانجام، در فصل پنجم پس از آوردن ریشه‌های حسابگری زیستی، یک فرآیند وابسته بهبود می‌یابد. راه‌کار حسابگری زیستی دو