بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده فنی و مهندسی

گروه عمران

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران

گرایش سازه

عنوان پایان نامه

بررسی رفتار اعضای برشی بتن مسلح تحت اثر بارهای دینامیکی ضربه‌ای با استفاده از مدل خرپایی

استاد راهنما:

دکتر رضا آقایاری

استاد مشاور:

دکتر ابراهیم خلیل‌زاده

نگارش:

رامین شکری

مهر ۱۳۹۱

چکیده

مدل‌سازی خرپایی یکی از روش‌های تحلیل سازه‌های بتن مسلح معمولی و پیش تنیده است که با تبدیل حالات پیچیدهٔ تنش به مجموعه‌ای از مسیرهای سادهٔ تنش باعث ساده سازی انواع سازه‌های پیچیدهٔ بتنی می‌گردد. این مسیرهای انتقال به صورت اعضای دو نیرویی همراستا با جهت مسیر تنش‌ها مدل می‌گردد. مجموعهٔ این اعضای دو نیرویی یک عمل‌کرد خرپایی را تشکیل می‌دهد.

از جملهٔ اعضای سازه‌ای که بر اساس این مدل تحلیل و طرّاحی می‌شوند می‌توان کربل‌ها، تیرهای عمیق، نواحی اتّصال تیر–ستون، تیرهای انتقالی، سرپوش شمع‌ها، دیوار پی‌ها، سازه‌های دریایی و دیوارهای برشی کوتاه را نام برد. که از این میان تیرهای عمیق دارای کاربردهای متنوّع‌تر و گسترده‌تری هستند.

در این پژوهش مدل مزبور به عنوان موضوع اصلی مورد بررسی قرار گرفته که به این منظور چند نمونه تیر عمیق با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی و با روش المان محدود آنالیز شدند. ۱۲ نمونه تیر عمیق با نسبت دهانهٔ برشی به ارتفاع موثر مقطع که از ۱ تا ۱/۵ متغییر است تحلیل شده‌اند. در مدل‌سازی از بتن با مقاوم ۲۴ MPa و درصدهای متنوّع آرماتورهای برشی عرضی استفاده شده است، همچنین در این مدل‌ها اثر دو نوع بارگذاریِ متمرکز دو نقطه‌ای استاتیکی و بارگذاری دینامیکی ضربه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

با توجه به نتایجِ تحلیل، مساحت آرماتورهای برشی عرضی در افزایش ظرفیّت برشی مدل خرپایی موثّر بوده و کاهش نسبت دهانه برشی به ارتفاع موثّر مقطع باعث کاهش اثر نرم شدگی بتن می‌شود، همچنین تحت اثر بارهای دینامیکی ضربه‌ای، ضریب کاهش مقاومت بتن نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی، کمتر است.

کلمات کلیدی: تیرهای عمیق، کربل‌ها، مدل خرپایی، بارهای ضربه‌ای، ظرفیّت برشی، آرماتورهای برشی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات پژوهش

۱-۱-کلیّات ۲

۱-۲- اهداف پژوهش ۳

۱-۳- برنامهٔ انجام پژوهش ۳

فصل دوم: بررسی مدل خرپایی

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- اعضای مدل خرپایی ۹

۲-۲-۱- اعضای فشاری ۹

۲-۲-۱-۱- اعضای فشاری منشوری ۱۰

۲-۲-۱-۲- اعضای فشاری بادبزنی ۱۱

۲-۲-۱-۳- اعضای فشاری بطری شکل ۱۱

۲-۲-۲- اعضای کششی ۱۲

۲-۲-۳-گره‌ها ۱۲

۲-۳- ضوابط آیین‌نامه‌های موجود برای مدل خرپایی ۱۴

۲-۳-۱- ACI 318-05 [۳] ۱۴

۲-۳-۲- آیین‌نامهٔ AASHTO-LRFD [۴] ۱۷

۲-۳-۳- استاندارد کانادایی CSA A23.3-94 [۵] ۲۱

۲-۴- مدل خرپایی ۲۱

۲-۵- کربل‌ها ۲۲

۲-۶- نواحی اتّصال تیر-ستون ۲۳

۲-۷- تیرهای عمیق ۲۶

۲-۸- بررسی روش‌های موجود تحلیل تیرهای عمیق مبتنی بر مدل خرپایی ۲۷

۲-۸-۱- مدل خرپایی عرب زاده (۲۰۰۰) [۲] ۲۷
۲-۸-۲- مدل خرپایی پلاستیک Foster-Gilbert ۳۰
۲-۸-۳- مدل خرپایی Hwang Lee و همکاران (۲۰۰۲) ۳۳
۲-۸-۴- Matamoros و همکاران (۲۰۰۳) ۳۵
۲-۸-۵-مدل خرپایی Brown و همکاران (۲۰۰۷) ۳۸
۲-۸-۶- مدل خرپایی J. W. Park و همکاران (۲۰۰۷) ۴۰
۲-۹- رفتار تیرهای بتن مسلح تحت بارهای ضربه‌ای ۴۴
۲-۹-۱- مقدمه ۴۴
۲-۹-۲- بررسی برخی از تحقیقات انجام شده در زمینهٔ رفتار ضربه‌ای سازه‌های بتن مسلح ۴۵
۲-۹-۲-۱- N. Kishi و همکاران (۲۰۰۱) ۴۵
۲-۹-۲-۲- Vecchio و Satcci (۲۰۰۹) ۴۵
۲-۹-۲-۳- Akanshu Sharma و همکاران (۲۰۱۱) ۴۶

فصل سوم: مراحل مدل‌سازی

۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- معرفی ABAQUS ۴۹
۳-۳- مراحل مدل‌سازی ۵۰
۳-۳-۱- مقدمه ۵۰
۳-۳-۲- هندسهٔ مدل‌ها ۵۰
۳-۳-۳- مدل سازی اجزای تیر بتن مسلح ۵۴
۳-۳-۳-۱- نوع المان‌ها ۵۴
۳-۳-۳-۲- مدل رفتاری مصالح ۵۶
۳-۳-۳-۳- مش‌بندی ۶۰

فصل چهارم: تحلیل و نتیجه‌گیری

۴-۱- مقدمه ۶۴
۴-۲- نتایج تحلیل ۶۵

۴-۲-۱- رفتار نمونه‌ها ۶۵
۴-۲-۲- نتایج ۶۹
۴-۳- تحلیل نتایج ۸۴
۴-۳-۱- اثر مساحت آرماتورهای برشی عرضی ۸۴
۴-۳-۲- اثر تغییرات نسبت a/d ۸۴
۴-۳-۳- بررسی اثر بارگذاری دینامیکی ضربه‌ای ۸۴
۴-۳-۴- بررسی ضریب کاهش مقاومت عضو فشاری در بارگذاری استاتیکی ۸۵
۴-۳-۵- بررسی ضریب کاهش مقاومت عضو فشاری در بارگذاری دینامیکی ۸۵
فصل پنجم: خلاصهٔ پژوهش، نتایج و پیشنهادات
۵-۱- خلاصهٔ پژوهش ۸۷
۵-۲- خلاصهٔ نتایج ۸۷
۵-۳- پیشنهادات ۸۹
فهرست مراجع ۹۰

فهرست اشکال

شکل **صفحه**

شکل۲-۱- مدل خرپایی ۶
شکل۲-۲- مدل خرپایی Ritter ۷
شکل۲--۳- مدل خرپایی Morsch ۷
شکل۲-۴- انواع اعضای فشاری و مدل‌های خرپایی در تیر عمیق ۱۰
شکل۲-۵- تجزیه و مدل‌سازی عضو بطری شکل ۱۲
شکل۲-۶- حالت‌های مختلف گره‌ها بر اساس حالت تنش سه جانبه ۱۳
شکل۲-۷- آرماتورهای برشی متقاطع با عضو فشاری ۱۷
شکل۲-۸ ..... ۱۹
شکل۲-۹- کربل ۲۲
شکل۲-۱۰- مدل خرپایی برای کربل ۲۳
شکل۲-۱۱- ناحیهٔ اتّصال تیر-ستون ۲۳
شکل۲-۱۲- مدل خرپایی برای ناحیهٔ اتّصال تیر-ستون ۲۵
شکل۲-۱۳- تیر عمیق همراه با مدل خرپایی جایگزین ۲۶
شکل۲-۱۴- مدل خرپایی عرب‌زاده ۲۸
شکل۲-۱۵- مدل خرپایی Foster-Gilbert ۳۱
شکل۲-۱۶- مدل خرپایی Hwang-Lee و همکاران ۳۵
شکل۲-۱۷- مدل خرپایی Matamoros-Wang ۳۶
شکل۲-۱۸- جزئیات مدل خرپایی J. W. Park و همکاران ۴۴
شکل۳-۱- نمونه‌ای از بارگذاری ضربه‌ای اعمال شده ۵۱
شکل۳-۲- شمای کلی تیر ۵۲
شکل۳-۳- المانC3D8R ۵۴
شکل۳-۴- المانT2D3 ..... ۵۵
شکل۳-۵- منحنی بارگذاری و باربرداری نمونهٔ بتن ۵۸
شکل۳-۶- مدل دوخطی فولاد ۵۹
شکل۳-۷- شاخهٔ نزولی منحنی تنش-جابه‌جایی بتن در حالت کشش ۶۰
شکل۳-۸ ..... ۶۱
شکل۳-۹- شمای مش‌بندی شدهٔ نمونه‌ها ۶۲
شکل۴-۱- مراحل شکست تیر B-4 در حالت بارگذاری استاتیکی ۶۴
شکل۴-۲- مراحل شکست تیر B-4 در حالت بارگذاری ضربه‌ای $\frac{T_l}{T_s}=1/25$ ۶۷
شکل۴-۳- شکست تکیه‌گاهی تیر B-4 در حالت بارگذاری ضربه‌ای $\frac{T_l}{T_s}=1$ ۶۸
شکل۴-۴- تغییرات مقاومت برشی در مقابل تغییر درصد آرماتورهای برشی عرضی ۷۹

شکل۴-۵- تغییرات مقاومت برشی در مقابل تغییرات a/d ۸۰
شکل۴-۶- حداکثر پاسخ دینامیکی نمونه‌ها ۸۰
شکل۴-۷- تغییرات ضریب کاهش مقاومت عضو فشاری در حالت بارگذاری استاتیکی ۸۲
شکل۴-۸- تغییرات ضریب کاهش مقاومت عضو فشاری در حالت بارگذاری دینامیکی ۸۲

فهرست جداول

جدول **صفحه**

جدول۲-۱- مقادیر پارامترهای مربوط به مقاومت اعضای فشاری ۱۵
جدول۳-۱- مشخصات هندسی نمونه‌های مدل شده ۵۳
جدول۳-۲- مشخصات مکانیکی بتن ۵۶
جدول۳-۳- پارامترهای مدل CDP ۵۷
جدول۳-۴- مشخصات مکانیکی آرماتورها ۵۹
جدول۴-۱- مقاومت برشی نمونه‌ها در بارگذاری استاتیک ۶۹
جدول۴-۲- ظرفیّت برشی نمونه‌ها در بارگذاری استاتیکی ۷۰
شکل۴-۳- پاسخ‌های دینامیکی نمونه‌ها ۷۱
جدول۴-۴- ضرایب کاهش مقاومت فشاری بتن در بارگذاری استاتیکی ۷۵
جدول۴-۵- مقایسهٔ ضرایب کاهش مقاومت فشاری بتن در بارگذاری دینامیکی ۷۶

فصل اول

کلیّات پژوهش

۱-۱-کلیّات

گروهی از اعضای موجود در سازه‌های بتن مسلح، اعضای غیر خمشی هستند که از جملهٔ آن‌ها می‌توان به کربل‌ها، تیرهای عمیق و نواحی اتّصال تیر-ستون اشاره کرد. در این اعضا سطح مقطع عضو بعد از خمش دیگر به صورت صفحه‌ای باقی نمی‌ماند بنابراین اصول تحلیل تنش که برای اعضای کم عمق به کار می‌رود، برای تعیین مقاومت اعضای غیرخمشی بتن مسلح مناسب نیستند. زیرا به دلیل قابل توجه بودن میزان تنش‌های برشی که باعث توزیع غیر خطی کرنش‌های ارتجاعی می‌گردد، حالت شکست غالب به صورت شکست برشی است. در این اعضا انتقال نیرو از محل بار وارده به تکیه‌گاه توسط عضو فشاری‌ای که در مسیر انتقال نیرو به تکیه‌گاه شکل می‌گیرد انجام می‌شود و مولفهٔ افقی نیرو نیز توسط آرماتورهای کششی تحمّل می‌شوند. بنابراین تحت اثر نیروی وارده یک عمل‌کرد خرپایی در عضو غیرخمشی شکل می‌گیرد که از طریق آن، عضو در برابر بارهای وارده مقاومت می‌کند. در سال‌های اخیر محققین اتفاق نظر دارند که یکی از روش‌هایی که به وسیلهٔ آن می‌توان رفتار برشی و پیچشی اعضای غیرخمشی بتن مسلح را ارزیابی کرد، روش مدل خرپایی یا Strut-and-Tie (STM)، است. با توجه به منطقی بودن و ساده بودن روابطی که بر اساس مدل خرپایی به دست می‌آید، این مدل مبنای برخی از روش‌های آیین‌نامه‌ای در آیین‌نامه‌هایی نظیر CSA، AASHTO LRFD و ACI برای طرّاحی برخی از اعضای بتن مسلح قرار گرفته‌اند.

یکی از مواردی که در مدل‌های STM نیاز به تحقیق بیشتری دارد، اثر بار دینامیکی در مقاومت و نحوهٔ شکل‌گیری اعضای کششی و فشاری در مدل مزبور است که در این پایان‌نامه به آن پرداخته خواهد شد.

۱-۲- اهداف پژوهش

مهمترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

الف- مقایسهٔ مدل خرپایی تحت بار متمرکز دو نقطه ای استاتیکی با مدل خرپایی تحت بارگذاری دینامیکی ضربه‌ای معادل.

ب- بررسی اثر آرماتورهای برشی عرضی بر مقاومت مدل خرپایی.

ج- بررسی اثر نسبت دهانهٔ برشی به ارتفاع موثّر مقطع، بر مقاومت مدل خرپایی.

د-کنترل دقت روابط ارائه شده در ضمیمهٔ A آیین نامهٔ ACI در رابطه با مدل خرپایی.

۱-۳- برنامهٔ انجام پژوهش

با مشخص شدن اهداف کلی پژوهش، برنامه‌ای که برای تامین اهداف مذکور طرح شده است به شرح زیر می‌باشد.

۱. بررسی پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینهٔ مربوط به مدل خرپایی انجام شده است.
۲. مدل‌سازی چند نمونه تیر عمیق با استفاده از بتن با مقاومت فشاری ۲۴ MPa.
۳. تعیین ظرفیّت برشی نمونه‌های مدل شده با استفاده از روش ضمیمهٔ A آیین نامهٔ ACI 318-05 و مقایسهٔ آن‌ها با نتایج حاصل از تحلیل.
۴. بررسی وضعیّت خرپای ایجاد شده در حالت بار استاتیکی متمرکز با حالت مشابه در بارگذاری دینامیکی ضربه‌ای معادل.

فصل دوم

بررسی مدل خرپایی

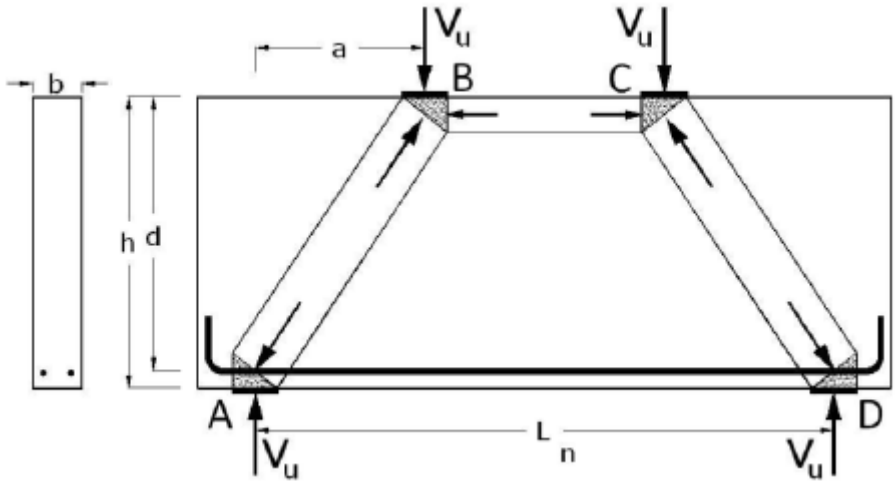
۲-۱- مقدمه

معمولاً اعضای بتن مسلح تحت چهار نوع بارگذاری قرار می‌گیرندکه عبارتند از: از بارگذاری‌های محوری، خمشی، برشی و پیچشی. رفتار اعضای بتن مسلح تحت اثر بارهای محوری و بارهای خمشی به طور نسبتاً کاملی شناخته شده بوده و روش‌های طرّاحی اعضای بتن مسلح تحت اثر بارهای مزبور در آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف تا حدودی یکسان می‌باشد. ولی در مقابل رفتار برشی و پیچشی هنوز به طور کامل شناخته شده نیست و از این‌رو روش‌های طرّاحی پیچشی و برشی اعضای بتن مسلح که معمولاً برمبنای کارهای آزمایشگاهی می‌باشند در آیین‌نامه‌های مختلف متفاوت است.

یکی از روش‌هایی که در اوایل قرن بیستم برای بررسی رفتار برشی اعضای بتن مسلح ابداع شد، روش مدل خرپایی بود. بر اساس تحقیقات سال‌های اخیر، مدل خرپایی رفتار برشی اعضای بتن مسلح را به صورت بهتری مورد بررسی قرار می‌دهد. که از جملهٔ دلایل آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

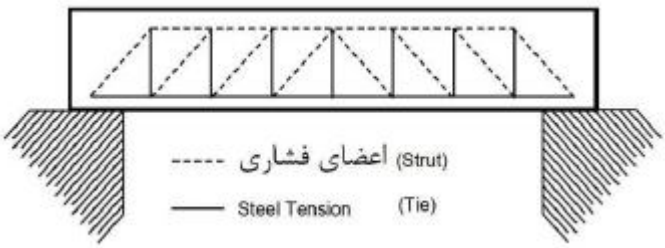
۱. این مدل مکانیزم انتقال برش را بعد از ترک خوردگی عضو به شیوهٔ مناسبی نشان می دهد.
۲. با استفاده از این مدل می توان اثرات پیش تنیدگی را به شیوه‌ای منطقی مدل کرد.
۳. اندرکنش خمش و بار محوری در این مدل به شکل درستی نشان داده می‌شود.
۴. به دلیل سادگی روابط می‌تواند مبنای روش‌های آیین‌نامه‌ای در بررسی برش، در اعضای بتن مسلح قرار گیرد.

مدل‌سازی خرپایی یکی از روش‌های طرّاحی سازه‌های بتن مسلح معمولی و پیش‌تنیده است که با تبدیل حالات پیچیدهٔ تنش به مجموعه‌ای از مسیرهای سادهٔ تنش باعث ساده سازی انواع سازه‌های بتنی پیچیده می-گردد. این مسیرهای انتقال به صورت اعضای دو نیرویی، همراستا با جهت مسیرهای تنش مدل می‌گردد. اعضای دو نیرویی یا خرپایی که نیروهای فشاری را انتقال می‌دهند عضو فشاری، اعضای انتقال دهندهٔ نیروی کششی عضو کششی و محل تلاقی اعضای کششی و فشاری نیز گره نامیده می‌شود. به مجموعهٔ اعضای فشاری، کششی و گره‌ها مدل خرپایی گفته می‌شود. در شکل ۲-۱، یک نمونه مدل خرپایی در تیر عمیق نشان داده شده است.

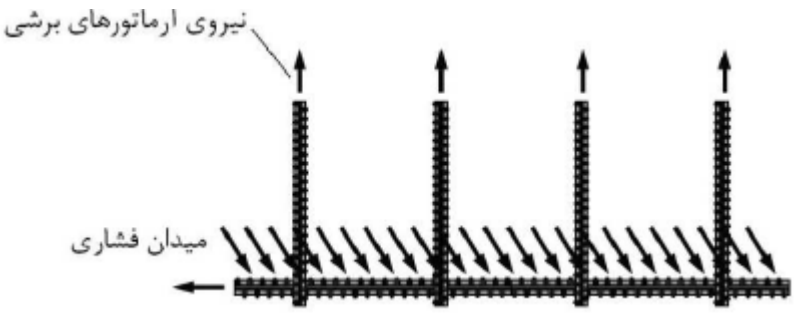


شکل۲-۱- مدل خرپایی [۲]

ظهور مدل خرپایی مقارنِ دوران رشدِ طرّاحی سازه‌های بتن مسلح بود. در سال ۱۸۹۹، Ritter [۱]، اولین مدل خرپایی را به منظور لحاظ نمودن نقش اصلی آرماتورهای عرضی در ظرفیّت برشیِ تیرها ارائه نمود. مدل خرپایی Ritter که در شکل ۲-۲، نشان داده شده است بعدها توسط Morsch [۱]، (شکل ۲-۳)، اصلاح شد. او معتقد بود که میدان‌های فشاری موازی و مجزا که توسطRitter تعریف شده بود، در اصل به صورت یک میدان فشاری پیوسته و واحد است که در تمامیِ طول بتن مسلح پراکنده شده است.



شکل۲-۲- مدل خرپایی Ritter [۲]



شکل۲-۳- مدل خرپایی Morsch [۲]

همچنین در سال **۱۹۲۹**، این مدل توسط Rausch [۲] برای بررسی مسئلهٔ پیچش در تیرهای بتن مسلح به کار گرفته شد.

اساس مدل‌هایی که به آن‌ها اشاره شد، این بود که با شکل‌گیری ترک‌های مورّب در عضو بتنی مسلح، تحت اثر تنش‌های کششی، بتن پیوستهٔ بین هر دو ترک به صورت یک عضو فشاری عمل می‌کند، این اعضای فشاری همراه با آرماتورهای طولی که فقط کشش را تحمّل می‌کنند، تشکیل یک عمل‌کرد خرپایی را می‌دهند که در مقابل تنش‌های برشیِ وارده مقاومت می‌کند. مدل خرپایی ارائه شده بسیار کاربردی بود و معادلاتی که از شرایط تعادل به دست می‌آمدند ساده بودند امّا با این وجود نتایج حاصل از این مدل نسبت به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، دارای میزان خطای زیادی بود. از دلایل تفاوت‌ها این بود که در این مدل‌ها برای سادگی فرض شده بود که زاویهٔ عضو فشاری با آرماتورهای طولی برابر 45° است. همچنین در این مدل‌ها از مقاومت کششی بتن صرف نظر شده بود، در حالی که تنش‌های کششی موجود در بتن به طور

چشم‌گیری توانایی بتن را برای مقاومت در برابر تنش‌های برشی افزایش می‌دهد. به منظور تصحیح و بهبود مدل خرپایی در پیش بینیِ رفتار برشی اعضای بتن مسلح، تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفت. در واقع این مدل در سه گام اساسی اصلاح شد که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر بیان کرد:

۱. اولین گام در بهبود مدل خرپایی، تعمیم دادنِ زاویهٔ عضو فشاری بود که توسط Lampert و Thurlimann[۱] (۱۹۶۸)، مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها فرض کردند که زاویهٔ عضو فشاری با آرماتورهای طولی می‌تواند کمتر یا بیشتر از 45° باشد. با این فرض، بر اساس معادلات تعادلی که به دست می‌آیند علت تسلیم شدن آرماتورهای طولی یا عرضی با درصدهای مختلف، در لحظهٔ شکست قابل توجیه بود.

۲. گام دوم در بهبود مدل خرپایی توسط Collins [۱] (۱۹۷۳)، انجام گرفت. ایشان با مشتق‌گیری از معادلات سازگاری، اقدام به تعیین زاویهٔ عضو فشاری با آرماتورهای طولی کردند و به این نتیجه رسیدند که زاویهٔ عضو فشاری با زاویهٔ تنش‌های فشاری اصلی و کرنش‌های فشاری اصلی برابر است. این تئوری، تئوری میدان فشاری نامگذاری شد.

۳. گام سوم در بهبود مدل خرپایی، بررسی نرم‌شدگی فشاری بتن توسط Collins و Vecchio [۱] (۱۹۸۱)، بود. به این ترتیب با ترکیب معادلات تعادل، سازگاری و روابط نرم‌شدگی، مدلی به وجود آمد که می‌توانست با دقت مناسبی رفتار برشی و پیچشی انواع اعضای بتن مسلح را پیش‌بینی کند. به علاوه این مدل به خوبی می‌توانست تغییرشکل سازه، پس از ترک خوردگی را به خوبی پیش‌بینی کند.

با رشد تقاضا برای استفاده از مدل خرپایی، روش‌های دیگری نیز براساس این مدل ابداع شدند. این مدل‌ها ضمن اینکه دارای نتایج ایمن براساس رفتار واقعی سازه بودند، به دلیل ساده سازی اعضای بتن مسلح پیچیده،