



دانشگاه سیام نور
پی

زمین شناسی ساختاری

(رشته زمین شناسی کاربردی)

دکتر محمد خلیج

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و **کمک درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی

فهرست

یازده

پیشگفتار

۱	فصل اول: تنش و واکنش
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ نیرو
۳	۳-۱ تنش
۴	۴-۱ تنش‌های مایل بر جسم
۴	۱-۴-۱ مؤلفه‌های تنش
۶	۱-۴-۱-۱ تنش دوبعدی
۷	۲-۴-۱-۱ مؤلفه‌های تنش تک‌محوره
۹	۳-۴-۱-۱ مؤلفه‌های تنش دومحوره
۹	۵-۱ تنش‌های عمود بر جسم
۹	۱-۵-۱ بیضوی تنش
۱۱	۲-۵-۱ طبقه‌بندی حالات تنش
۱۱	۳-۵-۱ تنش اصلی تک‌محوره
۱۳	۴-۵-۱ تنش اصلی دومحوره
۱۴	۵-۵-۱ تنش اصلی سه‌محوره
۱۵	۶-۱ نمودار مور
۱۶	۱-۶-۱ ترسیم دایره تنش مور
۲۰	۲-۶-۱ سطوح مزدوج بزرگ‌ترین تنش برشی
۲۱	۳-۶-۱ دایره مور برای تنش سه‌بعدی
۲۴	۴-۶-۱ حالت‌های خاص تنش
۲۷	۵-۶-۱ واکنش‌های سنگ در شرایط شکننده
۲۹	۶-۶-۱ روش‌های تعیین جهت تنش
۳۰	۷-۱ واکنش
۳۲	۸-۱ واکنش همگن

۳۳	۱-۸-۱ بیضی واتنش همگن
۳۳	۲-۸-۱ کمیت‌های تغییر طول واتنش همگن
۳۵	۳-۸-۱ کمیت‌های تغییر زاویه واتنش همگن
۳۶	۴-۸-۱ اندازه‌گیری واتنش همگن
۴۰	۵-۸-۱ میدان‌های بیضی واتنش همگن
۴۳	۹-۱ واتنش ناهمگن
۴۵	خودآزمایی ۱

۴۷	فصل دوم: درزه و شکستگی
۴۸	۱-۲ مقدمه
۴۸	۲-۲ شکستگی‌ها و درزه‌ها
۵۰	۳-۲ تقسیم‌بندی شکستگی‌ها
۵۰	۱-۳-۲ تقسیم‌بندی توصیفی شکستگی‌ها
۵۲	۱-۳-۲ معیارهای توصیفی شکستگی‌ها
۵۵	۲-۳-۲ ریخت‌شناسی سطح شکستگی
۵۷	۲-۳-۲ تقسیم‌بندی زایشی شکستگی‌ها
۵۸	۱-۲-۳-۲ معیارهای دینامیکی شکستگی‌ها
۶۱	۲-۳-۲ نقش اصطکاک در ایجاد شکستگی
۶۲	۳-۳-۲ بررسی تنش‌ها در دسته‌های شکستگی
۶۳	۴-۲ ارتباط نسبی بین شکستگی‌ها
۶۴	۵-۲ ارتباط شکستگی‌ها با سایر ساختارها
۶۴	۱-۵-۲ ارتباط شکستگی‌ها با گسل‌ها
۶۵	۲-۵-۲ ارتباط شکستگی‌ها با چین‌خوردگی‌ها
۶۷	خودآزمایی ۲

۷۱	فصل سوم: گسل خوردگی
۷۲	۱-۳ مقدمه
۷۲	۲-۳ طبقه‌بندی گسل‌ها
۷۳	۱-۲-۳ وضعیت سطح گسل
۷۳	۲-۲-۳ جابه‌جایی نسبی یا لغزش
۷۴	۳-۲-۳ حرکت نسبی دو قطعه گسل در طول یکدیگر
۷۴	۱-۳-۲-۳ حرکت نسبی گسل‌های شیب‌لغز
۷۴	۲-۳-۲-۳ حرکت نسبی گسل‌های راستالغز
۷۵	۳-۳ تعیین جابه‌جایی گسل‌ها
۷۵	۱-۳-۳ تعیین جابه‌جایی تقریبی گسل در ساختارهای کوچک‌مقیاس
۷۵	۱-۳-۳ شاخص‌های جابه‌جایی در مناطق برشی شکننده
۷۷	۲-۳-۳ شاخص‌های جابه‌جایی در مناطق برشی شکل‌پذیر
۸۲	۴-۳ خصوصیات گسل‌ها
۸۲	۱-۴-۳ خصوصیات گسل‌های عادی
۸۲	۲-۴-۳ خصوصیات گسل‌های رانده
۸۵	۳-۴-۳ خصوصیات گسل‌های راستالغز
۸۷	۵-۳ شکل و جابه‌جایی گسل‌ها

۸۷	۳-۵-۱ شکل گسل های عادی
۸۸	۳-۵-۲ جابه جایی گسل های عادی
۸۸	۳-۵-۳ شکل گسل های رانده
۹۰	۳-۵-۴ جابه جایی گسل های رانده
۹۱	۳-۵-۵ شکل گسل های راستالغز
۹۲	۳-۵-۶ جابه جایی گسل های راستالغز
۹۵	۳-۶-۶ ساختارهای مرتبط با گسل ها
۹۵	۳-۶-۱ ساختارهای مرتبط با گسل های عادی
۹۵	۳-۶-۱-۱ چین های مرتبط با گسل های عادی
۹۶	۳-۶-۱-۲ ساختارهای کششی مرتبط با گسل عادی
۹۹	۳-۶-۲ ساختارهای مرتبط با گسل های رانده
۹۹	۳-۶-۲-۱ گسل های رانده محلی
۱۰۲	۳-۶-۲-۲ سیستم های رانده
۱۰۵	۳-۶-۳ ساختارهای مرتبط با گسل های راستالغز
۱۰۵	۳-۶-۳-۱ ساختارهای فرعی گسل های راستالغز
۱۰۷	۳-۷ تأثیر تنش ها در انواع گسل ها
۱۱۰	خودآزمایی ۳

۱۱۳	فصل چهارم: چین خوردگی
۱۱۴	۴-۱ مقدمه
۱۱۴	۴-۲ توصیف چین خوردگی
۱۱۴	۴-۲-۱ توصیف یک سطح چین خورده
۱۱۴	۴-۲-۱-۱ توصیف یک سطح چین خورده در حالت نیم رخ
۱۱۵	۴-۲-۱-۲ توصیف یک سطح چین خورده کامل
۱۱۷	۴-۳ توصیف چندلایه چین خورده
۱۲۰	۴-۴ توصیف ابعاد چین خوردگی
۱۲۳	۴-۵ توصیف جهت یابی چین خوردگی
۱۲۶	۴-۶ تقسیم بندی چین خوردگی
۱۲۶	۴-۶-۱ تقسیم بندی چین ها بر اساس زاویه بین یال ها یا درجه فشردگی
۱۲۷	۴-۶-۲ تقسیم بندی چین ها بر اساس نحوه قرارگیری خطوط هم شیب
۱۲۹	۴-۶-۳ تقسیم بندی چین ها بر اساس تقارن سطح چین خورده
۱۲۹	۴-۶-۳-۱ چین های متقارن
۱۳۰	۴-۶-۳-۲ چین های نامتقارن
۱۳۱	۴-۶-۴ تقسیم بندی چین ها از نظر دوران محور سطح چین خورده
۱۳۳	۴-۶-۵ تقسیم بندی چین ها بر اساس ضخامت طبقه چین خورده
۱۳۴	۴-۶-۶ تقسیم بندی چین ها بر اساس اختلاف مقاومت
۱۳۵	۴-۷ فرایندهای تشکیل چین خوردگی
۱۳۵	۴-۷-۱ فرایندهای چین خوردگی یک سطح چین خورده
۱۳۵	۴-۷-۱-۱ فرایند چین خوردگی خمشی
۱۴۰	۴-۷-۱-۲ فرایند چین خوردگی برشی غیر فعال
۱۴۲	۴-۷-۱-۳ فرایند چین خوردگی کاهش حجم
۱۴۳	۴-۷-۲ فرایندهای چین خوردگی چند لایه چین خورده

۱۴۴	۴-۷-۲-۱ فرایند چین خوردگی لغزش خمشی
۱۴۶	۴-۷-۲-۲ فرایند چین خوردگی های مرتبط با گسل
۱۵۰	۴-۸ چین های تداخلی
۱۵۴	خودآزمایی ۴
۱۵۷	فصل پنجم: تورق و خطواره
۱۵۸	۵-۱ مقدمه
۱۵۸	۵-۲ تورق
۱۵۹	۵-۲-۱ انواع تورق
۱۵۹	۵-۲-۱-۱ تقسیم بندی تورق بر اساس تقسیم بندی مارشاک (۱۹۸۸)
۱۶۳	۵-۲-۱-۲ تقسیم بندی تورق بر اساس تقسیم بندی توئیس و مور (۱۹۹۲)
۱۶۶	۵-۲-۲ ارتباط تورق با سایر ساختارها
۱۷۱	۵-۳ خطواره
۱۷۲	۵-۳-۱ انواع خطواره
۱۷۶	۵-۳-۲ ارتباط خطواره ها با سایر ساخت ها
۱۷۷	۵-۳-۲-۱ ارتباط خطواره ها با تورق
۱۷۸	۵-۳-۲-۲ ارتباط خطواره ها با چین ها
۱۷۹	۵-۳-۳ فرایند تشکیل تورق ها و خطواره ها
۱۸۰	۵-۳-۳-۱ کوتاه شدگی و طولیل شدگی
۱۸۲	۵-۳-۳-۲ چرخش مکانیکی
۱۸۴	۵-۳-۳-۳ انحلال، انتشار و رسوب گذاری
۱۸۴	۵-۳-۳-۴ تبلور دوباره
۱۸۴	۵-۳-۳-۵ تورق های حالت پایدار
۱۸۵	۵-۳-۳-۶ خطواره های روی آینه گسل
۱۸۶	خودآزمایی ۵
۱۸۹	فصل ششم: کاربرد ژئوفیزیک در شناسایی ساختارها
۱۹۰	۶-۱ مقدمه
۱۹۱	۶-۲ روش های لرزه نگاری
۱۹۱	۶-۲-۱ مبانی نظری انتشار امواج لرزه ای
۱۹۲	۶-۲-۲ روش شکست مرزی
۱۹۲	۶-۲-۳ روش بازتابی
۱۹۳	۶-۲-۴ روش درون چاهی
۱۹۳	۶-۲-۵ تفسیر مقاطع لرزه ای
۱۹۴	۶-۳ روش های مغناطیس سنجی
۱۹۵	۶-۳-۱ تفسیر نقشه های مغناطیسی
۱۹۷	۶-۳-۲ تفسیر ساختاری ناهنجاری های مغناطیسی
۱۹۹	۶-۴ روش های الکتریکی
۲۰۰	۶-۴-۱ دو محیط با مقاومت ویژه متفاوت
۲۰۱	۶-۴-۲ برداشت های مقاومت ویژه
۲۰۲	۶-۵ روش های گرانی سنجی
۲۰۲	۶-۵-۱ برداشت و تفسیر اندازه گیری گرانی

۲۰۳	۶-۶ روش سنجش از دور
۲۰۴	۶-۶-۱ استخراج خطوطاره‌ها
۲۰۵	۶-۶-۲ الگوهای رقومی ارتفاع
۲۰۶	خودآزمایی ۶
۲۰۷	پاسخ خودآزمایی‌ها
۲۰۹	منابع و مآخذ

پیشگفتار

کتاب‌های برجسته و ممتازی در موضوع زمین‌شناسی ساختاری توسط مؤلفین صاحب‌نظری همچون هابز، مینز، پرایس، رمزی، راگان و سایر محققین دیگر تألیف شده است. اکثر این آثار در داخل کشور در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کتاب زمین‌شناسی ساختاری با بهره‌گیری از این منابع و سایر منابع و براساس سرفصل شورای عالی انقلاب فرهنگی و مطابق با قوانین و مقررات کتاب‌های خودآموز برای مقطع کارشناسی دانشجویان رشته زمین‌شناسی کاربردی تألیف شده است.

فصل اول شامل تنش و واتنش است. در این فصل تلاش شده است مسایل مربوط به آنها به زبان گویا و ساده بیان شود و از روابط پیچیده ریاضی و مثلثات پرهیز شود. بیشترین تأکید بر اصل معادلات و کاربرد آنها در حل مسایل مربوط به تنش و واتنش است.

فصل دوم مربوط به درزه و شکستگی است. در این فصل تلاش شده است تا دانشجو ضمن فراگیری انواع شکستگی‌ها، بتواند با استفاده از درزه‌ها و شکستگی‌ها تاریخچه ساختارها را دریابد.

فصل سوم شامل انواع گسل‌ها است. در این کتاب برخلاف سایر کتاب‌های زمین‌شناسی ساختاری که هر نوع گسل به طور مجزا توضیح داده می‌شوند، به صورت تطبیقی و مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند، یعنی در یک فصل هر سه نوع گسل از

لحاظ شکل و رفتار و خصوصیات و عملکرد با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا شباهت‌ها و تفاوت‌های آنها به طور نظام‌مند برای دانشجو روشن شود.

فصل چهارم مربوط به چین‌خوردگی است. در این فصل ابتدا چین‌ها تعریف می‌شوند و از ابعاد و دیدگاه‌های محققین مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. در پایان فصل سازوکار انواع چین‌خوردگی‌ها توضیح داده می‌شود.

فصل پنجم مربوط به خطواره‌ها و تورق‌ها است. در این فصل خطواره‌ها و انواع آنها و ارتباط انواع خطواره‌ها با سایر ساختارهای زمین‌شناسی توضیح داده می‌شود سپس انواع تورق و ارتباط انواع تورق‌ها با سایر ساختارهای زمین‌شناسی بررسی می‌شود.

فصل ششم شامل کاربرد روش‌های ژئوفیزیک در زمین‌شناسی ساختاری است. در این فصل با توجه به اینکه دانشجو در درس ژئوفیزیک به طور مفصل با انواع روش‌های ژئوفیزیکی آشنا شده است فقط روش‌هایی که برای تعیین و شناسایی ساختارهای پنهان زمین کاربرد دارند توضیح داده شده است.

در انتها از کلیه اساتید و همکاران گرانمایه به ویژه استاد ارجمند جناب آقای دکتر بابک سامانی که برای ارزیابی و ویراستاری این کتاب زحمات بسیار ارزشمندی متقبل شده‌اند تشکر به عمل می‌آید. همچنین از سرکار خانم مهندس هما بهنام به خاطر حروف‌چینی، نمونه‌خوانی و صفحه‌آرایی این کتاب کمال تشکر را دارم.

محمد خلیج

استادیار دانشگاه پیام نور

فصل اول

تنش و واتنش

هدف کلی

شناسایی تنش و واتنش در ساختارهای زمین و شناخت عناصر وابسته به آنها.

هدف رفتاری

تفسیر تغییر شکل‌های ایجادشده در ساختارهای زمین و حل مسایل مرتبط با تنش و واتنش و تفسیر تاریخچه زمین‌ساختی و ساختاری منطقه مورد بررسی.

مفاهیم پیش‌نیاز

نیرو	محور	شکونده	انتقال
چرخش	همگن	ناهمگن	کشیدگی
تک‌محوره	دو‌محوره	سه‌محوره	

مفاهیم تازه

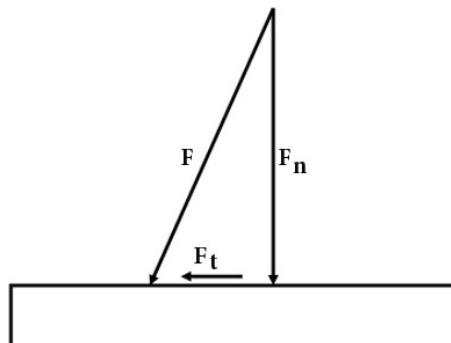
تنش	مؤلفه تنش	بیضی تنش	تنش عمودی
تنش برشی	تنش اصلی	تنش برشی خالص	دایره مور
واتنش	بیضی واتنش	مربع طویل‌شدگی	واتنش همگن
واتنش ناهمگن			

۱-۱ مقدمه

در بررسی‌های زمین‌شناسی، ساختارهایی مشاهده می‌شود که معمولاً از حالت اولیه خود خارج شده و دگرریختی در آنها به وجود آمده است. تغییرات ساختارهای زمین‌شناسی به دلیل تأثیر نیروهای خارجی و تنش‌های ایجادشده در آنها می‌باشد، ساختارها نیز در مقابل تنش، دگرریخت شده و واتنش نشان می‌دهند.

۲-۱ نیرو

مقدار مشخصی از انرژی که توسط یک عامل خارجی به شکل کشش، فشارش، پیچش، خمش و یا برش بر یک جسم وارد می‌شود و دارای مقدار و جهت باشد، نیرو^۱ نامیده می‌شود. نیروهای وارد بر جسم هر منشأی که داشته باشند می‌توانند از نوع نیروهای حجمی^۲ یا از نوع نیروهای سطحی^۳ باشند. نیروهای حجمی مانند نیروهای ثقل و مغناطیس در تمام ابعاد و سطوح جسم اثر می‌کند، نیروهای سطحی، مانند بار اعمال شده توسط یک یخچال بر سنگ بستر، فقط در سطوح و مرزهای جسم عمل می‌کنند. نیروهای وارد بر یک جسم نسبت به محور مختصات، در هر جهتی که وارد شوند به دو مؤلفه تجزیه می‌شوند، یکی از این مؤلفه‌ها عمود بر سطح وارد می‌شود که نیروی عمودی (F_N) نامیده می‌شود و نیروی دیگر مماس بر سطح جسم اعمال می‌شود که نیروی مماسی (F_t) نامیده می‌شود (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱ اعمال نیروی مایل F بر جسم فرضی که موجب می‌شود نیروهای عمودی (F_N) و نیروهای برشی (F_t) از تجزیه آن ایجاد شوند.

مطابق قانون سوم نیوتن، نیروی عمل و عکس‌العمل در سطح تماس دو جسم، دارای یک مقدار مساوی ولی خلاف جهت یکدیگر می‌باشد. بنابراین اعمال هر نیروی سطحی یا حجمی حاصل از کشش، فشارش یا برش خارج از جسم، سبب ایجاد نیروهای داخلی^۱ در درون جسم می‌شود که مقدار آن طبق قانون سوم نیوتن مساوی و جهت آن خلاف جهت نیروهای خارجی است که بر جسم وارد شده است. در این مرحله است که تنش آغاز می‌شود.

۳-۱ تنش

انرژی داخلی یا نیروهای داخلی ناشی از اعمال نیروهای خارجی بر جسم، که از داخل جسم به اندازه مقدار نیروهای خارجی و در جهت خلاف آن اعمال می‌شود، تنش^۲ نامیده می‌شود. با توجه به اینکه تنش نوعی عکس‌العمل در مقابل اعمال نیرو می‌باشد، بنابراین مقدار آن به بزرگی و جهت نیروهای اعمال‌شده بر جسم بستگی دارد.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad ۱-۱$$

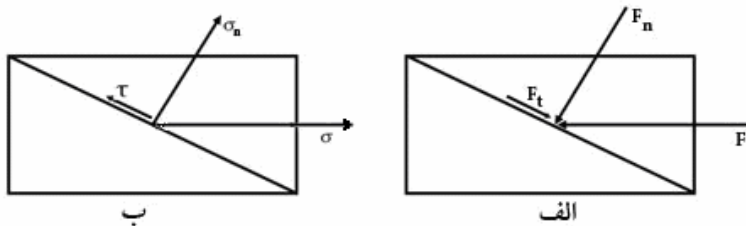
در این معادله F نیروی خارجی وارد بر جسم و A سطحی است که نیرو بر آن اعمال می‌شود و σ (سیگما) علامت اختصاری تنش می‌باشد. در بحث تنش در یک جسم دو حالت در نظر گرفته می‌شود:

- تنش‌های مایل بر جسم
- تنش‌های عمود بر جسم

در حالتی که تنش با زاویه و مایل بر جسم وارد شود، بردار تنش به دو مؤلفه عمود بر سطح جسم (σ_n) و مماس بر سطح جسم (τ یا σ_s) تجزیه می‌شود. به همین دلیل در وضعیت تنش‌های مایل بر جسم، از مؤلفه‌های تنش نام برده می‌شود. در حالتی که تنش عمود بر جسم وارد شود، تنش اصلی بدون آن که به مؤلفه‌های تنش تجزیه شود، عمود بر جسم عمل کرده و به عنوان تنش‌های اصلی نامیده می‌شود. البته این تنش‌ها بسته به اینکه تک‌محوره، دو‌محوره یا سه‌محوره باشند متفاوت هستند.

۴-۱ تنش‌های مایل بر جسم

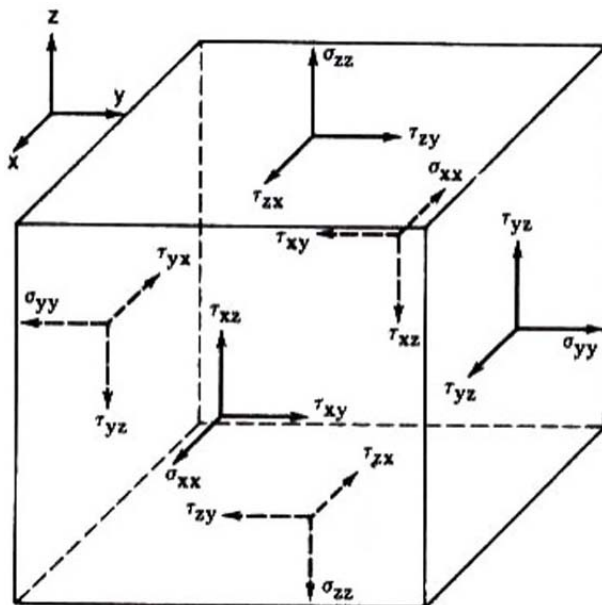
وقتی نیرویی به صورت مایل بر جسم وارد می‌شود به دو مؤلفه عمودی و مماسی تجزیه می‌شود. مطابق قانون سوم نیوتن، تنش‌های ایجاد شده در داخل جسم نیز به دو مؤلفه عمودی و مماسی (برشی) تجزیه می‌شوند. مؤلفه عمودی تنش (σ_n)، مساوی و خلاف جهت مؤلفه عمودی نیرو (F_n) و مؤلفه برشی تنش (τ)، مساوی و خلاف جهت مؤلفه مماسی نیرو (F_t) است (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱ مقایسه اعمال نیروی مایل بر یک جسم فرضی و اعمال تنش بر همان جسم. مطابق قانون سوم نیوتن به اندازه مقدار نیروی اعمال‌شده، تنش با همان مقدار ولی در جهت مخالف آن ایجاد می‌شود. حتی نیروهای عمودی و مماسی ایجاد شده نیز باعث می‌شوند تنش‌های عمودی و برشی نیز به همان اندازه ولی در جهات مخالف آنها در جسم ایجاد شود. الف) اعمال نیرو در جسم، ب) اعمال تنش در همان جسم.

۱-۴-۱ مؤلفه‌های تنش

وقتی تنش به صورت مایل بر یک سطح وارد شود، براساس محورهای مختصات کارتزین x ، y و z بر آن سطح یک تنش عمودی و دو تنش برشی در جهت‌های محورهای x ، y و z اعمال می‌شود، تنش‌های ایجاد شده، مؤلفه‌های تنش^۱ نامیده می‌شوند. برای توصیف تنش در یک نقطه فرض می‌شود که آن نقطه به صورت یک مکعب است (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱ مؤلفه‌های کامل تنش سه‌بعدی که بر حجم جسم عمل می‌کنند (راگان، ۱۹۸۵)

با توجه به اینکه بر روی هر سطح مکعب سه مؤلفه تنش اعمال می‌شود، مؤلفه‌های تنش به صورت ماتریس نمایش داده می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

در این ماتریس در هر سطر یک مؤلفه σ و دو مؤلفه τ دیده می‌شوند که با علائم x ، y و z نمایش داده می‌شوند.

علامت اول نشان‌دهنده اعمال تنش بر صفحه‌ای است که آن صفحه بر محور مختصات مورد نظر عمود می‌باشد و علامت دوم نشان‌دهنده آن است که تنش اعمال شده در جهت کدام محور مختصات می‌باشد. مثلاً مؤلفه τ_{xy} نشان‌دهنده آن است که تنش بر صفحه‌ای اعمال شده که آن صفحه بر محور مختصات x عمود است و تنش به موازات محور y می‌باشد. یا σ_{zz} نشان‌دهنده آن است که تنش عمودی بر صفحه‌ای اعمال شده که آن صفحه بر محور مختصات z عمود بوده و تنش عمودی به موازات محور z می‌باشد.

با توجه به اینکه سطوح مقابل هر مکعب دارای تنش‌های عمودی و برشی یکسان می‌باشند بنابراین در ماتریس، سه سطح مکعب در نظر گرفته می‌شوند و چون بر هر سه سطح سه مؤلفه تنش وارد می‌شود، در مجموع ۹ مؤلفه تنش ایجاد می‌شود. از سوی دیگر این ۹ مؤلفه نیز به طور متقابل مستقل نیستند و برای اینکه تعادل مکعب فرضی حفظ شود باید برش‌های مشابه به دلیل تعادل گشتاوری حذف شوند. مطابق تعادل گشتاوری باید $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ، $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ و $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ باشد تا مکعب فرضی علیرغم اعمال تنش‌های برشی در سطوح مختلف مکعب چرخش نداشته باشد و ثابت باقی بماند. به این ترتیب ماتریس با ۹ مؤلفه را می‌توان به صورت ماتریس زیر نمایش داد:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \sigma_{zz} & \tau_{zx} \end{bmatrix}$$

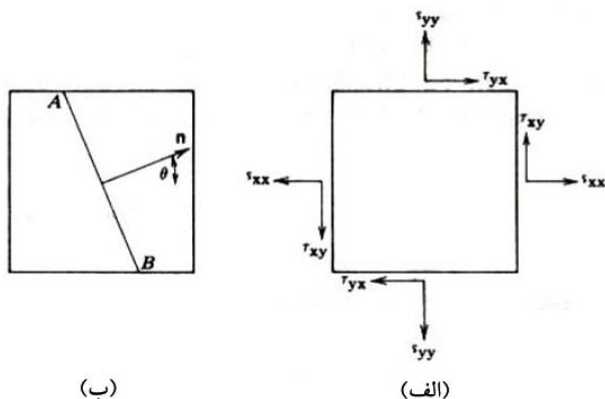
۱-۴-۱-۱ تنش دوبعدی

اگر یکی از مؤلفه‌های تنش، در یکی از جهت‌های محورهای مختصات حذف شود، جسم در وضعیت تنش صفحه‌ای^۱ قرار می‌گیرد. این وضعیت فقط برای صفحات نازک کاربرد دارد. اما تنش صفحه‌ای روش مناسبی برای نمایش شکل هندسی تنش در یک نقطه می‌باشد. معمولاً در عمل فرض می‌شود که تنش‌های وارد بر جهت محور مختصات Z صفر است، به این ترتیب مؤلفه‌های σ_{zz} ، τ_{zx} و τ_{zy} از ماتریس حذف می‌شوند و به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}$$

در محاسبات مؤلفه تنش و حل مسایل مربوط به آن، مقادیر τ_{xy} و τ_{yx} مطابق قانون تعادل گشتاور یکسان می‌باشد ولی علامت آنها خلاف یکدیگر است.

اگر عنصر مربع شکل با ابعاد Δx و Δy و ضخامت واحد در نظر گرفته شود که تنش صفحه‌ای بر آن عمود است، مؤلفه‌های عمودی و برشی اعمال شده بر یک سطح مایل در داخل مربع مذکور قابل محاسبه می‌باشد. سطح مایل به موازات محور Z بوده و با خط عمود بر سطح مایل زاویه θ می‌سازد (شکل ۱-۴).

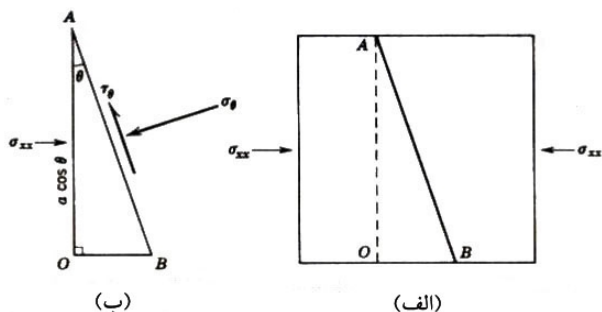


شکل ۴-۱ تنش دوبعدی. الف) مؤلفه‌های تنش، ب) مؤلفه‌های یک سطح شیب‌دار AB که با خط عمود بر سطح AB زاویه θ می‌سازد (راگان، ۱۹۸۵).

برای بررسی تنش دوبعدی ابتدا هر مؤلفه به تنهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این ترتیب معادلات مؤلفه‌های تنش تک‌محوره به دست می‌آید. در انتها با ترکیب معادلات تنش‌های تک‌محوره، معادلات مؤلفه‌های دو محوره نیز به دست می‌آید.

۴-۱-۲ مؤلفه‌های تنش تک‌محوره

الف) به موازات محور x: اگر سطح مایل در حالتی فرض شود که فقط مؤلفه تنش عمودی σ_{xx} در جهت محور x عمل کند (سطح AB در شکل ۵-۱ الف)، برای محاسبه تأثیر این مؤلفه، مثلث OAB از مربع جدا می‌شود (شکل ۵-۱ ب). در این حالت نیروهای معادل در مثلث قرار داده می‌شوند.



شکل ۵-۱ تنش تک‌محوره که در جهت محور x عمل می‌کند. الف) نمایش مؤلفه تنش عمودی بر سطح مایل AB در جهت محور x، ب) نمایش مثلثاتی تنش‌های وارد بر یک سطح مایل در جهت محور x (راگان، ۱۹۸۵).

اگر AB سطح شیب‌دار در نظر گرفته شود، سطح OA معادل با $a \cos \theta$ است. بزرگی نیروی وارد بر ضلع OA از معادله زیر به دست می‌آید.

$$F_x = \sigma_{xx} (a \cos \theta) \quad ۲-۱$$

یک نیروی معادل و مخالف نیز روی سطح شیب‌دار AB عمل می‌کند. نیروهای عمودی و مماسی به شرح زیر به دست می‌آیند:

$$F_N = F_x \cos \theta \quad ۳-۱$$

$$F_t = F_x \sin \theta \quad ۴-۱$$

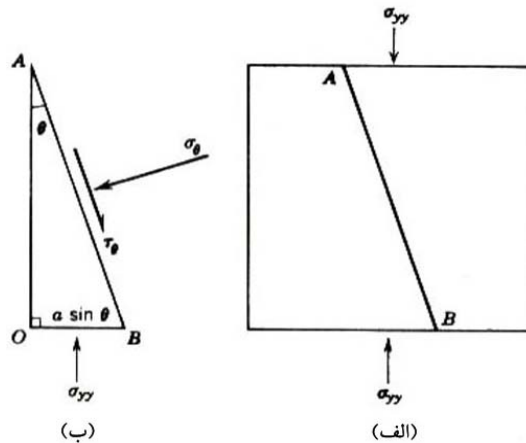
با جایگزینی مقدار F_x با معادله ۲-۱ و تقسیم آن بر سطح، بزرگی دو مؤلفه تنش عمودی و تنش برشی تک‌محوره به دست می‌آید:

$$\sigma = \sigma_{xx} \cos^2 \theta \quad ۵-۱$$

$$\tau = \sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta \quad ۶-۱$$

ب) به موازات محور y: مانند حالت الف، در این حالت فرض می‌شود که در یک سطح شیب‌دار داخل مربع فرضی، نیروهای عمودی σ_{yy} به موازات محور y به تنهایی عمل می‌کند (شکل ۶-۱ الف). نیروهای وارد بر ضلع AB در یک مثلث جداشده از مربع فرضی به شرح زیر است (شکل ۶-۱ ب).

$$F_y = \sigma_{yy} (a \sin \theta) \quad ۷-۱$$



شکل ۶-۱ تنش تک‌محوره که در جهت محور y عمل می‌کند. الف) نمایش مؤلفه تنش عمودی بر سطح مایل AB در جهت محور y، ب) نمایش مثلثاتی تنش‌های وارد بر سطح مایل در جهت محور y (راگان، ۱۹۸۵).

با جایگزینی σ به جای F_N و جایگزینی τ به جای F_t ، مؤلفه تنش تک‌محوره در راستای محور y به شرح زیر به دست می‌آید:

$$\sigma = \sigma_{yy} \sin^2 \theta \quad ۸-۱$$

$$\tau = \sigma_{yy} \sin \theta \cos \theta \quad ۹-۱$$

۱-۴-۳ مؤلفه‌های تنش دو محوره

با داشتن معادلات مؤلفه‌های تنش تک‌محوره در راستای محورهای مختصات x و y و ترکیب آنها با یکدیگر، حالت واقعی برای جسمی که از دو سو تحت تنش‌های σ_{xx} و σ_{yy} قرار می‌گیرد به شرح زیر می‌باشد:

$$\sigma = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta \quad ۱۰-۱$$

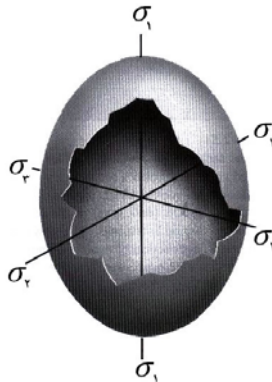
$$\tau = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \sin \theta \cos \theta \quad ۱۱-۱$$

۱-۵ تنش‌های عمود بر جسم

در مبحث مؤلفه‌های تنش فرض بر آن است که تنش‌ها مایل بر جسم عمل می‌کنند. همان طور که نیروهای مایل به دو مؤلفه عمودی و مماسی تجزیه می‌شوند، تنش‌های مایل نیز به دو مؤلفه تنش عمودی و تنش برشی تجزیه می‌شوند که به عنوان مؤلفه‌های تنش عنوان می‌شوند. حال اگر تنش‌ها عمود بر سطح عمل کنند، تنش‌های برشی حذف می‌شوند و در این حالت به جای مؤلفه‌های تنش از محورهای اصلی تنش در محاسبات استفاده می‌شود. در بحث محورهای اصلی تنش برای درک بهتر مطلب از بیضی تنش^۱ استفاده می‌شود. قابل ذکر است در حالت سه‌بعدی تنش از اصطلاح بیضوی تنش و در حالت دوبعدی تنش از اصطلاح بیضی تنش استفاده می‌شود.

۱-۵-۱ بیضوی تنش

بیضوی تنش طرحی است که وضعیت سه‌بعدی را در یک نقطه نمایش می‌دهد (شکل ۷-۱).



شکل ۱-۷ تنش در یک نقطه. سطح بیضوی به وسیله انتهای بردارهای تنش مربوط به تمام صفحات گذرنده از نقطه مورد نظر معین می‌شود. محورهای اصلی تنش، جهات و بزرگی تنش‌های اصلی را نشان می‌دهند (رمزی و لایسل، ۲۰۰۰)

همان‌طور که می‌دانید از یک نقطه بی‌نهایت صفحه عبور می‌کند. وضعیت تنش در هر نقطه با مؤلفه‌های تنش‌های عمودی و برشی که بر روی این صفحات عمل می‌کنند، توصیف می‌شود. بردارهای تنش در اطراف یک نقطه در سه بعد، نمایانگر یک بیضوی است که بیضوی تنش نامیده می‌شود. در این حالت سه بردار تنش که قطره‌های اصلی بیضوی را ایجاد کرده‌اند، در جهاتی واقع می‌شوند که صفحات مربوط به آنها به صورت عمود بر هر بردار تنش قرار می‌گیرد. به این ترتیب این بردارها در هنگام عمل بر روی صفحه مربوط به خود، باعث ایجاد تنش برشی نمی‌شوند. بردارهای مربوط به شعاع‌های اصلی بیضوی، تنش‌های اصلی^۱ نامیده می‌شوند که شامل بزرگ‌ترین تنش اصلی (σ_1)، کوچک‌ترین تنش اصلی (σ_3) و تنش اصلی متوسط (σ_2) است که معمولاً رابطه $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ بین آنها برقرار می‌باشد. سه صفحه‌ای که بر تنش اصلی عمود می‌باشند صفحات اصلی تنش^۲ نامیده می‌شوند.

معمولاً با حذف تنش اصلی متوسط (σ_2)، بسیاری از مسایل مربوط به تنش را می‌توان از طریق معادلات مربوطه حل نمود. در مسایل مربوط به تنش معمولاً محورهای اصلی تنش معادل با مؤلفه‌های تنش می‌باشند یعنی:

$$\sigma_{xx} = \sigma_1 \quad \sigma_{zz} = \sigma_3 \quad ۱۲-۱$$

1. Principal Stress

2. Principal Planes of Stress