۱۳۸۰ /۴/ ۲۰

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیم به مدارک

دانشگاه تهران

عنوان:

مطالعهٔ رفتار ماسه‌ها در شرایط زهکشی نشده و اصلاح یک مدل الاستوپلاستیک

توسط: محمد ذوالفقاری

استاد راهنما: منوچهر لطیفی

012418

پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

مهندسی عمران

۳۵۶۹۴

دانشکده فنی

دانشگاه تهران
دانشکده فنی
گروه مهندسی عمران

خرداد ۱۳۸۰

پیشگفتار :

تأمین فاکتورهای اقتصادی و ایمنی در طراحی سازه‌های خاکی یا هر سازهٔ دیگری مستلزم درک و تحلیل صحیحی از رفتار محیط خاکی، تحت شرایط گوناگون محیطی و بارگذاری است.

پیشرفت‌های سخت‌افزاری در زمینهٔ کاوش و تحلیل، بخصوص در دو دههٔ اخیر، ابزارهای مناسبی برای انجام تحلیل‌های مفصل و دقیق از رفتار خاک را در اختیار طراح قرار می‌دهد. جزء بسیار اساسی در این تحلیلها روابط رفتاری (روابط بین تنش و کرنش) می‌باشد که در واقع شاخصه‌ای یگانه برای هر نوع مادهٔ خاص (اینجا هر خاک خاص) می‌باشد. بصورتیکه یک تحلیل بسیار پیچیدهٔ تئوریکی که اندرکنش پیچیده‌ای از بارگذاریهای مختلف و شرایط محیطی را در برمی‌گیرد با یک رابطهٔ رفتاری ضعیف به تحلیلی ضعیف تبدیل می‌شود، همان نتیجه‌ای که مثلاً از کاوشهای ابتدایی ضعیف حاصل می‌آید. بنابراین توسعهٔ روابط رفتاری دقیقتر نه یک علاقهٔ تئوریک بلکه بخشی ضروری در این گونه مطالعات است. برای رسیدن به این هدف درک درستی از رفتار ماسه تحت شرایط مختلف و شناسایی عوامل مؤثر و اندرکنش آنها در جهت‌دهی رفتار، اولین قدم به شمار می‌رود.

پس از شناسایی رفتار، مولفه‌های این شناخت با استفاده از ابزار و چارچوب‌های مناسب به صورت فرمولهای قابل استفاده در تحلیل‌های مهندسی تبدیل می‌شوند باید توجه داشت که یک شناخت دقیق در صورت استفاده از چارچوب‌های نامناسب برای تبدیل به روابط ریاضیاتی ارزش بالایی نخواهد داشت. چارچوب پلاستیسیتهٔ کلاسیک به علت قدرت و تناوری حاصل از دهه‌های متمادی کار تئوریک و تجربی بر روی فلزات یکی از این ابزار مناسب است.

خصوصاً ایده‌های قوی دیگری که در درون پلاستیسیتهٔ کلاسیک برای تشریح رفتار فلزات تحت بارگذاریهای پیچیده شکل گرفته‌اند یا با الهام از آن متولد شده‌اند. ابزار مناسبی برای مدلسازی رفتار خاک ارائه می‌دهند.

در این پایان‌امه نیز سعی شده است هر دو مورد ضروری عنوان شده (شناخت - ابزار) در بررسی مدلهای رفتاری برای ماسه‌ها مطالعه گردد. بنابراین ضمن مطالعهٔ مفصل از ایدهٔ پلاستیسیتهٔ کلاسیک و دیگر ایده‌های مرتبط، چارچوب پلاستیسیتهٔ عمومی که با الهام از پلاستیسیتهٔ کلاسیک ارائه شده است نیز مورد مطالعه قرارگرفته است به این امر در فصل اول و اوائل فصل سوم اشاره شده است ضمناً سعی

۳۸۹۹۴

گردیده است که رفتار ماسه نیز به طور تفصیلی در شرایط زهکشی نشده مورد مطالعه قرار گیرد تا درک صحیحی از عملکرد مدلها و جهت مورد توجه در ارائه آنها، حاصل آید. بخشی از نتایج مطالعه رفتار ماسه‌ها در فصل دوم و پیوست دوم آورده شده است در فصل سوم نیز مطالعهٔ یک مدل خاص در چارچوب پلاستیسیتهٔ عمومی و کالیبراسیون آن برای ماسهٔ تویرا (ژاپن) صورت گرفته است تا بتوان نتایج پیش‌بینی شده را با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار داد. ضمن آنکه اصلاح کوچکی نیز در این امدل پیشنهاد گردیده است. همچنین با استفاده از ویژگیهای خاص این مدل اصلاح کوچکی نیز در یکی از روابط ارائه شده برای ماسه‌ها (نشانهٔ حالت ایشی‌ها را ۱۹۹۳) صورت گرفته است.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول : درآمدی بر پلاستیسیته

۱-۱- مکانیک و مکانیک خاک در پرتوپلاستیسیته ۱-۱۱

۱-۲- پلاستیسیته کلاسیک ۱۱-۱۲

۱-۲-۱- تجزیه کرنش به دو مولفه ۱۱-۱۲

۱-۲-۲- سطح تسلیم ۱۳-۱۴

۱-۲-۳- سخت شوندگی ۱۴-۲۴

۱-۲-۳-۱- سخت شوندگی همسان ۱۶-۲۰

۱-۲-۳-۲- سخت شوندگی‌های غیرهمسان ۲۰-۲۴

۱-۲-۳-۲-۱- سخت شوندگی‌های سینماتیک ۲۰-۲۳

۱-۲-۳-۲-۲- سخت شوندگی سینماتیک و همسان ترکیبی ۲۳-۲۴

۱-۲-۴- قانون جریان ۲۴-۳۰

۱-۲-۵- حافظه و مدلسازی تاریخچه ۳۰-۳۱

۱-۳- ایده‌های دیگر در پلاستیسیتهٔ کلاسیک ۳۲-۴۲

۱-۳- مدل چند سطحی ۳۴-۳۶

۱-۳-۲- مدل سطح حدی ۳۶-۴۲

فصل دوم : درآمدی بر رفتار ماسه‌ها در شرایط زهکشی‌نشده

۲-۱- رفتار ماسه‌ها تحت بارگذاری یک سویه در حالت زهکشی نشده ۴۳-۶۵

۲-۱- الف - نمونه‌های روانگرا شونده ۴۵-۴۶

۲-۱- ب - نمونه‌های اتساع یابنده ۴۶-۴۷

۲-۱- ج - نمونه‌های باروانگرایی محدود ۴۷-۵۳

۲-۱-۱- حالت ۵۳-۵۳

عنوان | صفحه

۲-۱-۲- تغییر شکل در حالت یکنواخت ۵۳-۵۴

۲-۱-۳- خط تغییر فاز ۵۴-۵۶

۲-۱-۴ حالت تغییر شکل شبه‌یکنواخت ۵۶-۶۰

۲-۱-۵- تأثیر ساختار ماسه و غیرهمسانی ۶۰-۶۵

۲-۲- رفتار ماسه‌ها تحت بارگذاری مکرر ۶۵-۷۶

۲-۲-۱- ارتباط بین بارگذاری مکرر و بارگذاری یک سویه ۶۷-۶۹

۲-۲-۱- الف - حالت مرز حدی (SBS) برای مسیر تنش بارگذاری مکرر ۶۷-۶۸

۲-۲-۱- ب - نقش خط فاز ۶۸-۶۹

۲-۲-۲- عوض شدن علامت تنش برشی ۶۹-۷۵

۲-۲-۳- رفتار ماسه‌ها تحت بارگذاری مکرر محوری ۷۰-۷۶

۲-۲-۳-۱- ماسهٔ اتساعی ۷۰-۷۱

۲-۲-۳-۲- نمونه‌های انقباضی - اتساعی ۷۱-۷۳

۲-۲-۳-۳- ماسهٔ انقباضی ۷۳-۷۶

۲-۳- پارامترهای حالت ۷۶-۷۷

۲-۳-۱- پارامترهای حالت معمول ۷۶-۸۸

۲-۴- استفاده از پارامتر حالت در مدلسازی رفتار ماسه‌ها ۸۸-۹۰

فصل ۳: بررسی ساختار و عملکرد یک مدل خاص برای ماسه‌ها

۳-۱- چارچوب پلاستیسیتهٔ عمومی ۹۱-۹۶

۳-۲- بررسی مدل (Pastor,Zienkiewicz,chan 1990) و کالیبراسیون آن و بحث در نتایج به دست آمده ۹۷-۱۲۴

۳-۲-۱- تشریح مدل ۹۷-۱۰۸

۳-۲-۱-۱- تعریف جهت بارگذاری - باربرداری و جهت جریان ۹۸-۱۰۳

عنوان | صفحه

۳-۲-۱-۲- تعریف مدول پلاستیک ۱۰۳-۱۰۶

۳-۲-۱-۳- الگوریتم مدل ۱۰۶-۱۰۸

۳-۲-۲- تشریح نحوهٔ کالیبراسیون مدل برای ماسهٔ تویرا ۱۰۸-۱۱۲

۳-۲-۳- بررسی نتایج حاصل از کالیبراسیون ۱۱۳-۱۲۴

۳-۲-۳-۱- ضعف‌های کالیبراسیون مقالهٔ ۱۹۹۰ و راه‌های بهبود آن ۱۱۳-۱۱۵

۳-۲-۳-۲-کالیبراسیون مدل برای ماسهٔ تویرا به روش مولفان‌مدل ۱۱۵-۱۱۶

۳-۲-۳-۳-کالیبراسیون دوم (ثابت فرض کردن همهٔ پارامترها) ۱۱۶-۱۱۷

۳-۲-۳-۴-کالیبراسیون سوم (تعریف مکانیزمی برای تولید پارامترهای متغیر
فرض شده در روش مولفین) ۱۱۷-۱۲۴

۳-۲-۳-۴-۱- تعریف مکانیزمی برای تولید (Mg) ۱۱۹-۱۲۰

۳-۲-۳-۴-۲- تعریف مکانیزمی جهت تعریف ۱۲۰-۱۲۴

۳-۲-۳-۵- بررسی قابلیت مدل در پیش‌بینی رفتار ماسهٔ تویرا در حالت زهکشی
شده ۱۲۵-۱۲۶

۲-۲-۳-۶- بررسی قابلیت مدل در برآورد رفتار ماسه در حین بارگذاری
مکرر ۱۲۶-۱۲۸

فهرست شکلها

عنوان صفحه

فصل اول)

شکل ۱-۱) سد طراحی شده توسط Grundy (1766) ۲

شکل ۱-۲) تغییر سطوح تسلیم در بارگذاری‌های مجدد (Naghdi.et.al 1958)..... ۱۵

شکل ۱-۳) رفتار ماسهٔ انقباضی - اتساعی در حالت زهکشی نشده ۱۹

شکل ۱-۴) جابجایی نقاط تسلیم با فرض سخت شوندگی سینماتیک خطی در بارگذاری محوری..... ۲۲

شکل ۱-۵) قانون حافظه برای مواد (Mroz 1982) ۳۰

شکل ۱-۶) نتایج تجربی در بارگذاری محوری سیکلیک (Dafalias 1975) ۳۲

شکل ۱-۷) ایدهٔ مدلهای چندسطحی در بارگذاری محوری..... ۳۴

شکل ۱-۸) ایدهٔ مدل‌های با بی‌نهایت سطح بارریزی (Mroz.et.al 1982)..... ۴۱

فصل دوم)

شکل ۲-۱) رفتار ماسه‌ها در شرایط زهکشی نشده (Healy 1963)..... ۴۳

شکل ۲-۲) رفتار طبقه‌نبدی شده برای ماسه‌ها منطبق بر حالت اولیه نمونه (Costro 1969).. ۴۶

شکل ۲-۳) تأثیر همزمان نشانهٔ خلاء و فشار همه جانبه اولیه در رفتا (Castro 1969)..... ۴۸

شکل ۲-۴) رفتار نمونه در نشانهٔ خلأ یکسان در فشارهای اولیه مختلف (Guzman 1988)... ۴۹

شکل ۲-۵) خط تغییر فاز در فضای تنشهای (Ishihara 1989) ۵۵

شکل ۲-۶) حالت تغییر شکل شبه‌یکنواخت (Ishihara 1993) ۵۶

شکل ۲-۷) خط تغییر شکل شبه یکنواخت در دیاگرام حالت (Ishihara 1993)..... ۵۷

شکل ۲-۸) خط مستقیم حالت (Ishihara 1993)..... ۵۹

شکل ۲-۹) رفتار ماسه‌ها تحت جهت گیری‌های مختلف محورهای اصلی تنش Symes.et.al (1984)..... ۶۱

عنوان | صفحه

شکل ۲-۱۰) رفتار ماسه‌ها در صورت چرخش محورهای اصلی در حین بارگذاری (Symes.et.al 1984) ۶۲

شکل ۲-۱۱) مرز حالت برای تبین غیرهمسانی موجودر در نمونه (Symes.et.al 1984) ۶۳

شکل ۲-۱۲) اثر چرخش سیکلیک محورهای اصلی تنش (Symes.et.al 1984) ۶۴

شکل ۲-۱۳) رفتار ماسه‌ها تحت اثر بارگذاری مکرر (Seed-Lee 1966) ۶۶

شکل ۲-۱۴) مرز حالت برای مسیر تنش بارگذاری مکرر (guzman.et.al 1988) ۶۸

شکل ۲-۱۵) رفتار ماسهٔ اتساعی تحت تنش‌های مکرر با تنش‌های استاتیکی (Vaid, Chern 1993) ۷۰

شکل ۲-۱۶) رفتار ماسه انقباضی - اتساعی تحت تنش‌های مکرر (Guzman.et.al 1988) .. ۷۲

شکل ۲-۱۷) رفتار ماسه انقباضی تحت تنش مکررکل بزرگتر از مقاومت حالت یکنواخت (Guzman.et.al 1988) ۷۳

شکل ۲-۱۸) رفتار ماسه انقباضی تحت تنش مکررکل کوچکتر از مقاومت حالت یکنواخت (Guzman.et.al 1988) ۷۴

شکل ۲-۱۹) وقوع تغییرات‌حجمی‌شدیدتر در طی سیکل اول بارگذاری مکرر (Vaid, chern 1993)

شکل ۲-۲۰) رفتار ماسه مسیر تنش بیضوی (Ishihara, Yamada 1993) ۷۵

شکل ۲-۲۱) تعریف پارامتر حالت (Been,Jefferies 1985) ۷۷

شکل ۲-۲۲) قابلیت پارامتر حالت در طبقه‌بندی رفتار ماسه‌ها (Been,Jefferies 1985) ۷۹

شکل ۲-۲۳) ایدهٔ پارامتر ایده‌آل ۸۰

شکل ۲-۲۴) تعریف نشانهٔ حالت (I_s)(Ishihava 1993) ۸۱

شکل ۲-۲۵) خطوط با نشانه حالت ثابت Ishihara 1993 ..... ۸۲

شکل ۲-۲۶) قابلیت نشانه حالت در طبقه‌بندی رفتار ماسه تویرا Ishihara 1993 ..... ۸۳

عنوان | صفحه

شکل ۲-۲۷) رابطه بین نسبت حالت اولیه (r_c) نشانه حالت (I_s)Ishihava 1993 ..... ۸۴

شکل ۲-۲۸) حرکت خط تغییر شکل شبه یکنواخت در دیاگرام حالت (Ishihara 1993) ... ۸۷

فصل ۳)

شکل ۳-۱) سطح تسلیم و سطح پتانسیل برای یک ماسه انقباضی خاص ۱۰۱

شکل ۳-۲) شکل سطح پتانسیل اصلاح شده توسط Nova(Nova 1982) ۱۰۲

شکل ۳-۳) مقایسهٔ نتایج ارایه شده در مقاله با عملکرد برنامهٔ مورد استفاده در پایان نامه. ... ۱۲۹

شکل ۳-۴) نتایج ارائه شده در مقالهٔ مؤلفین برای پیش‌بینی نتایج کاسترو (۱۹۶۹) ۱۳۰

شکل ۳-۵) دو آزمایش مورد استفاده درکالیبراسیون مدل برای ماسهٔ تویرا ۱۳۱

شکل ۳-۶) ۱۳۲

شکل ۳-۷) شبیه‌سازی رفتار ماسهٔ تویرا با استفاده از روش کالیبراسیون مؤلفین ... ۱۳۳-۱۳۵

شکل ۳-۸) عملکرد مدل با فرض ثابت بودن تمام پارامترهای مدل

۳-۸-a) استفاده از مقدار میانگین آزمایشها برای پارامترهای متغیر مدل ۱۳۶

۳-۸-b) استفاده از یکی از مقادیر آزمایشها برای پارامترهای متغیر مدل ۱۳۷

شکل ۳-۹) عملکرد مدل در شرایط زهکشی نشده با مکانیزم اصلاحی پیشنهاد شده ... ۱۳۸-۱۴۱

شکل ۳-۱۰) رفتار ماسهٔ تویرا در بارگذاری یک سویه در شرایط زهکشی شده ۱۴۲

شکل ۳-۱۱) عملکرد مدل در شرایط زهکشی شده با فرض ثابت بودن همه پارامترها

شکل ۳-۱۲) عملکرد مدل در شرایط زهکشی شده با مکانیزم اصلاحی پیشنهاد شده

لازم به ذکر است مسیر حالت برنامه قطع شده است و در صورت ادامه برنامه نقطه حالت

در وضعیت بحرانی متوقف نخواهد شد. ۱۴۳

شکل ۳-۱۳) مقایسه نتیجه مولفین (ارائه شده در مقاله) با برنامه مورد استفاده در پایان

نامه، با پارامترهای یکسان (جهت تأیید عملکرد برنامه در حالت بارگذاری مکرر) ۱۴۴

شکل ۳-۱۴) برخلاف نتایج تجربی، با تغییر فشارهمه جانبه اولیه، تغییری در کیفیت رفتاری پیش بینی شده توسط مدل رخ نمی‌دهد. ۱۴۵
شکل ۳-۱۵)مسیر تنش پیش بینی شده توسط مدل در حالت بارگذاری یک سویه به عنوان مرز حدی برای مسیر تنش بارگذاری مکرر عمل می‌کند. ۱۴۶
شکل ۳-۱۶) عملکرد مدل در پیش‌بینی رفتار با فرض مقادیر مختلف برای پارامتر حافظهٔ مجزا. . . ۱۴۷
شکل ۳-۱۷) ضعف مدل در ارایه پدیدهٔ نرم شدگی دینامیکی ۱۴۸

فصل اول :

درآمدی بر پلاستیسیته

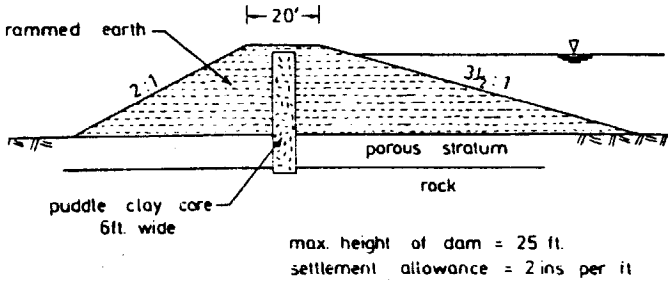
۱-۱- مکانیک و مکانیک خاک در پرتو پلاستیسیته

از همان دوران اولیه انسان در پی کشف قوانین حاکم بر پدیده‌های طبیعی و روشهای تأثیرگذاری و تسلط بر آنها بود. با پیشرفت تمدن که همزاد این کنجکاوی ذاتی انسان بود، انگیزهٔ او برای مطالعهٔ طبیعت برای آفرینش ابزار زندگی راحت‌تر افزایش یافت. بنابراین مکانیک در معنای عام آن از مهم‌ترین مبحث‌هایی بوده که از همان اوان، ذهن انسان کاوشگر را به خود مشغول کرده بود. اما شاید بتوان گفت مطالعهٔ جدی مکانیک در معنای خاص امروزین آن، با کار Gallile (1625) برروی تیرهای طره‌ای آغاز گردید. هرچند Gallile از موضوع تغییر شکل‌ها که مبحث الاستیسیته و پلاستیسیته برای تبیین آن ایجاد شده‌اند، به علت نبود ابزار سنجش مناسب صرف‌نظر کرد، اما آغازگر راهی بود که می‌توان به جرأت عنوان نمود که انسان سال ۲۰۰۰ نیز درابتدای آن قرار دارد. با اینحال مبحث تغییرشکل‌ها به علت اهمیت خاص آن (بخصوص در صنایع ساعت‌سازی و درشکه‌سازی) از همان دوران موردتوجه بود. ایدهٔ ارتباط خطی بین نیرو و جابجایی درمورد مصالح فنری از هرچه که باشد: فلز، چوب، سنگ، سفال، مو، شاخ!، ابریشم، سیم‌ساز، شیشه و مواد مشابه محصول مستقیم این علاقه بود که توسط Hooke (1662) کشف گردید. اما این ایده مهم مکانیک به علت خواست Hooke مبنی بر ثبت اختراع آن و استفاده انتفاعی از فواید آن تا دو دههٔ بعد مسکوت ماند و تنها به صورت رمزی و مقلوب "Ceiiinosssttuu"[۱] آشکار گردیده بود. Mariotte (1680) به صورت مستقلی این ایده را عنوان کرد و برای اولین‌بار در بررسی خمش تیرها از آن سود جست او علاوه بر جاگذاری صحیح تار خنثی در مسئله خمش تیرها، مبدع ایده‌ای درگسیختگی مصالح نیز بود. این اولین معیار گسیختگی بود و برطبق آن شکست یا تسلیم همواره در تغییرشکل معینی رخ می‌دهد.

تیرها به علت اهمیت فوق تصور آنها در صنعت ساختمان و هنر پیچیده معماری آن زمان مبحث تحلیل‌های اولیه مکانیکی بود. اما پرسشی که به چگونگی مقدار جابجایی یک تیری پرداخت به علت فقدان ایدهٔ تعادل نیروها و گشتاورها و عدم وجود روابط رفتاری (تنش-کرنش) تا حدود ۱۵۰ سال پس از زمان Mariotte هم، بدون جواب ماند. در این فاصله زمانی پیشرفت‌های چشمگیری درزمینه‌های مختلف مکانیک روی داده بود که از مهمترین آنها مقالهٔ چشمگیر Coulomb (1776) بود. همچنین این

۱- اصل عبارت "ut-tensio sic vis" به معنای جابجایی متناسب با نیرو است

مقاله‌سرآغاز دوره‌ای درمکانیک خاک گردیدکه‌عنوان پرطمطراق کلاسیک‌رابر آن نهادند(Skempton 1979). (لازم بذکر است مکانیک خاک یا به عبارت صحیح‌تر طبیعت و رفتار خاک به عنوان یکی از دم‌دست‌ترین مصالح موجود و بخش اتصالی لاینفک باهر سازه‌ای از دوران پیش از این هم مورد توجه بود از همان اوایل قرن ۱۸، افرادی چون Gauter 1717، Belidor 1729، Grundy 1766 و Perronet 1769 سهم انکارناپذیری در آفرینش مکانیک خاک داشته‌اند. شکل (۱-۱) سد طراحی شده در سال (۱۷۷۶) توسط Grundy را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ : سد طراحی شده توسط Grundy(1766) [Skempton 1979]

از این آثار به عنوان کارهای غیرکلاسیک مکانیک خاک یاد می‌گردد) (Skempton 1979).

به هر روی کار Coulomb از چنان اهمیت وافری برخوردار است که پایان آن دوران تلقی می‌شود. این مقاله نه تنها در مکانیک خاک بلکه در بسیاری از مباحث مکانیکی از اهمیت پایه‌ای برخوردار است.

در این مقاله به مقاومت برشی مصالح اصطکاکی همچون مصالح بنایی و خاک (معیار گسیختگی)، فشار زمین، پایداری گنبدها و مقاومت تیرها پرداخته شده است. Coulomb مقاومت برشی را که می‌تواند در سطح خاک یا مصالح بنایی (که تحت فشار قائم N قرار دارند) بسیج شود را تابع چسبندگی و جزء ناشی از اصطکاک دانسته است:

$$S = Ca + \frac{1}{n}N$$

C: چسبندگی در واحد سطح a: سطح -N: فشار قائم $\frac{1}{n}$ جزء مؤثر فشار قائم:

اما از زمان چاپ مقالهٔ Coulomb تا اواخر قرن ۱۸ توجه زیادی به آن نشد. علت علاوه بر استدلالهای بدیع و نتایج فوق‌العاده (نسبت به سال ۱۷۷۶) علامت‌گذاری سخت و طولانی و پیچیده

شدن فرمولهای استخراج شده بود. که سالها پس از آن (۱۸۰۴) با جاگذاری $\tan\theta = \frac{1}{n}$ بسیار ساده‌تر شدند.

سالهای اولیه قرن ۱۹ با تاکید بیشتر روی تجربیات ناشی از مقاومت و تغییر شکل‌ها همراه بود. Yang 1807 در سری مقالاتی، ضریب الاستیکی معرفی کرد که با آنچه ما امروزه استفاده می‌کنیم متفاوت است. اما نکتهٔ قابل ذکر این است که او به صورت روشنی بین الاستیسیته و مقاومت فرق قائل شدو ...

دو دههٔ بعد Navier 1827 حالت کلی معادلات تعادل را بدست آورد و سال بعد Cauchy 1828 معادلات الاستیک خطی با ۲ پارامتر ثابت را ارائه کرد، معادلاتی که هنوز هم به همان صورتی که او ارائه کرد مورد استفاده قرار می‌گیرند. با ارائه معادلات تعادل و معادلات رفتاری الاستیک راه برای بررسی رفتار مواد گوناگون تحت کرنش‌های کوچک هموار گردید.

تقریباً نیم قرن با این مشغولیت و توسعهٔ روزافزون تئوری الاستیسیته سپری شد. تانکاه‌ها بار دیگر به سوی حل مسئله تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر معطوف گردد. هرچند از همان تجربیات اولیه وجود تغییر شکل‌های دائمی امری پذیرفته شده در رفتار مواد بود و حتی گامهای بزرگی همانند بررسی کیفیت رفتار الاستیک پس از مشاهدهٔ تغییر شکل دائمی نیز برداشته شده بود. مثلاً Couloumb 1787 ثبت کرده است که پس از تغییر شکل دائمی ناشی از پیچش، با افزایش بارگذاری بازهم تغییر شکل ارتجاعی ایجاد می‌گردد و یا Gerstner 1833 دریافته بود که تغییر شکل‌های الاستیک همراه با تغییر شکل‌های دائمی، هنوز متناسب با مقدار نیروی وارده است و تغییر شکلهای دائمی علاوه بر آن است. نکتهٔ مهم‌تر این بود که او دریافت در حین باربرداری و بارگذاری مجدد تا سطح بیشترین نیروی قبلی، هیچ‌گونه تغییر شکل دائمی رخ نمی‌دهد این مشاهده به وضوح بخشی از پروسه‌ای است که امروزه سخت‌شوندگی الاستوپلاستیک نامیده می‌شود. درحالیکه آزمایشات روی تغییر شکل‌های دائمی یا گسیختگی فلزات تحت بارگذاریهای مختلف در این ایام ادامه داشت کارهای تئوریک نیز روی ایدهٔ مقدماتی پلاستیسیته شروع شد. بررسی علمی پلاستیسیته فلزات از حدود سالهای ۱۸۶۴ میلادی آغاز گردید سالی که متناظر با انتشار یک سری مقالات از Tresca در مطالعهٔ تجربی پدیده‌های (Punching) و (Extrucion) در فلزات شکل‌پذیر (همچون سرب و روی) است. این تجربیات او را به این ایده رهنمون کرد: فلزات

هنگامی به گسیختگی (تسلیم) می‌رسند که تنش برشی ماکزیمم به مقدار بحرانی معینی برسد. این اولین ایدهٔ تسلیم (گسیختگی) برای فلزات به شمار می‌رود و Tresca احتمالاً در ابراز آن تحت‌تأثیر Coulomb بوده که سالها پیش از او معیار گسیختگی (تسلیم) برای خاک ارائه کرده بود. اما بهر حال کار چندان با ارزشی قبل از Tresca درمورد فلزات صورت نگرفته بود (Hill 1950).

جایگزینی فولاد نرم به جای فولاد خشک، که به صورت ناگهانی گسیخته می‌شد و مشکلات زیادی در صنعت آن زمان بوجود می‌آورد لزوم توجه به تئوری پلاستیسیته را بیشتر کرد. زیرا فولاد قبل از این که گسیخته شود به طریق پیچیده‌ای تغییر شکل‌های دائمی بزرگی را متحمل می‌شد این مکانیسم جذب انرژی برای بسیاری از سازه‌ها دارای اهمیت فراوان بود زیرا خرابی در آنها به صورت ناگهانی و حادثه‌ای بوقوع نمی‌پیوست. برای تشریح این رفتار فولاد لغت پلاستیک بدون تعریف دقیقی از حدود سالهای ۱۸۴۰ در ادبیات الاستیسیته شایع شده بود.

درمورد مکانیک خاک گفتنی است که به استثنای کار Coulomb، رفتار حین گسیختگی خاک‌ها ازلحاظ تجربی و تئوریک تا این زمان مورد مطالعه قرار نگرفته بود و تنها Rankin 1857 با استفاده از تئوری Coulomb، سطوح گسیختگی (خطوط لغزش Slip-Line) را در پشت دیوارهای حائل تعیین نمود S.Venant 1870,72 با استفاده از ایدهٔ تسلیم Tresca پیشنهاد نمود که با تشکیل سیستمی از ۵ معادله (که عبارت از ۳ معادلهٔ تعادل، معادلهٔ جریان غیرمتراکم و رابطهٔ تسلیم ترسکا بود) مسائل پلاستیسیته فلزات را می‌توان حل نمود. S.Venant برای ساده‌تر شدن مسائل فرض کرد که در تغییر شکل‌های با سرعت پائین می‌توان از گرادیان سرعت چشم پوشید. و با فرض مادهٔ الاستوپلاستیک ایده‌آل سیستم معادلات خود را برای تعیین تنش‌ها در یک استوانه جزئی پلاستیک شده و یک تیوپ کاملاً پلاستیک به کار برد و یک ناحیهٔ الاستیک خطی و یک ناحیهٔ پلاستیک شدهٔ بیرونی را بدست آورد این اولین مسئله الاستوپلاستیک خطی بود که حل می‌شد.

S.Venant با درک این نکته که هیچ رابطهٔ یک به یکی بین تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک کل وجود ندارد، یک فرض اساسی نمود که برطبق آن جهت تنش برشی ماکزیمم در هر لحظه منطبق بر جهت نرخ کرنش (پلاستیک) برشی ماکزیمم است این اولین قانون جریان پلاستیسیته بود که ارائه شد و به این خاطر قانون جریان نامیده شد که در پلاستیسیتهٔ ایده‌آل فرض می‌شود در حالت تنش‌های ثابت (پس از