

مدل الاستوپلاستیک مناسب برای مصالح ژئوتکنیک با تأکید بر رفتار بتن آسفالتی

رضا پورحسینی
استادیار
دانشگاه یزد

سید عبدالعظیم امیر شاه کرمی
استادیار
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

صنعت و دانش امروز درگیر شناسایی دقیق رفتار و عملکرد مهندسی مصالح به منظور بهینه سازی رفتار مصالح در موارد استفاده آنها می باشد. مدل های کلاسیک شامل ترسکا، فن میسز، موهر - کلمب و دراکر - پراگر نمی توانند رفتار واقعی مصالح را در حوزه تنش های جانبی زیاد بیان کنند. از این رو در این مقاله مدل الاستوپلاستیک با کلاهکی ارائه شده است تا بتوان رفتار واقعی مصالح و آسفالت را در مسیر تنش های مختلف و در وضعیت تنشهای کشش - برشی - فشاری با دقت بسیاری خوبی نشان داد. این مدل رفتاری با توجه به خصوصیات محاسبات عددی سازه ها را با سهولت و دقت بیشتر امکان پذیر نموده است و با توجه به خواص آسفالت و بار گذارهای اعمالی بر روسازی راه هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد و به طور رضایت بخشی می توان از آن در تحلیل و پیش بینی رفتار روسازی راه استفاده نمود. در تحقیق حاضر سه موضوع به صورت موادی و پوسته انجام گرفته است:

- ۱ - ارائه مدل رفتاری، تفاوت این مدل با مدل های کلاسیک دار موجود عدم وقوع دیده نقاط تکین singularity در محل برخورد کلاسیک با پوسته آن بوده و رویه نسلیم به گونه ای ابداع گردیده تا این دو در محل برخورد مماس باشند.
- ۲ - تهیه برنامه کامپیوتری POLYMAT با استفاده از روش عددی مبتنی بر مدل ارائه شده، این برنامه قادر است شرایط مختلف بارگذاری Stress Path و شرایط مختلف رفتاری مصالح در حالت های الاستیک، الاستوپلاستیک، ویسکوالاستوپلاستیک و مدل های ترکیبی را در برگرد.
- ۳ - تهیه برنامه کامپیوتری Back Analysis و مقایسه نتایج حاصل از مدل ارائه شده با دو مدل دیگر. آنالیزهای برگشتی انجام شده براساس نتایج آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی تطابق بهتری نسبت به برنامه های ADINA و NOSTRUM بدست داد.

Appropriate Elasto-Plastic Model for Geotechnical Materials with Emphasis on Asphalt Concrete Behaviour

S. A. Amir Shah Karami
Assistant Professor
University of Technology Amirkabir

R. PorHossieni
Assistant Professor
University Yazd

Abstract

Today's science and technology involves in identifying exact behaviour and performance in engineering materials for the purpose of optimizing the material behaviour: Classical models such as Tresca Vonmises Moher-Coloumb and Drucker-Prager are not able to present the actual behaviour of materials in high lateral stress positions:

In this research an elasto-plastic cap model has been introduced to show the actual behaviour of materials and asphalt concrete in various stress paths which include tensile shear and compression stress positions This behavioral model makes the numerical computations of structures easier and more exact for the sake of its own specifications This model conforms itself to the asphalt concrete properties and is in line with lab results and can be used satisfactorily in pavement analyses and performance predictions:

Three subjects have been studied parallelly and with constant follow-up in this research as under:

1- Giving a new behavioral model that is the difference between this model and the already existing cap models which is the non-occurrence of singularity at the cap and intersection Also the yield surface has here been formulated in such a way to make the cap and body tangent at intersection

2- Writing a computer program namely POLYMAT using finite element method. This program can include various stress paths and also all different material behaviours such as elastic elasto-plastic visco elasto-plastic and overlay models

3- Back analysis and comparison between the results obtained from the model given and the other two models according to the lab results the back analysis shows more accurate conformation than the ADINA and NOSTRUM ones

مقدمه

در تحلیل‌های غیر خطی مصالح می‌توان از مدل‌های رفتاری برای بررسی خصوصیات مکانیکی مصالح در ناحیه الاستوپلاستیک استفاده نمود. هر مدلی با توجه به اهدافی که برای آن تعیین می‌گردد می‌تواند عملکرد مصالح مشخصی را در مسیر تنش‌های معینی (Stress-Path) نشان دهد. مدل‌های الاستوپلاستیک از بخش‌های زیر تشکیل شده‌اند [۳]:

۱- پارامترهای الاستیک

۲- سطح تسلیم (Yield-Surface)

۳- سخت‌شوندگی (Hardening)

۴- قانون جریان (Flow rule)

سطح تسلیم بدنه اصلی مدل و تفکیک‌کننده محدوده ارتجاعی از محدوده الاستوپلاستیک می‌باشد. معیارهای تسلیم متنوعی برای فلزات و مصالح ژئوتکنیکی تهیه شده است، اما می‌توان همه آنها را به دو دسته کلی تقسیم نمود:

۱- مدل‌های بدون اصطکاک

۲- مدل‌های اصطکاکی

و به لحاظ رعایت وضعیت پلاستیک تحت تنش‌های فشاری زیاد می‌توان مدل‌ها را به دو دسته زیر تقسیم کرد:

۱- مدل‌های بدون کلاهد

۲- مدل‌های با کلاهد

رفتار الاستوپلاستیک بسیاری از مصالح را می‌توان بطور قابل قبولی با استفاده از چهار الگوی تسلیم اشاره شده در زیر

بررسی نمود، این مدل‌ها به مدل‌های کلاسیک معروف شده‌اند:

۱- ترسکا

۲- فن میسز

۳- موهر - کلمب

۴- دراگر - پراگر

لیکن برای بسیاری از مصالح مهندسی بعنوان نمونه مانند بتن، سنگ، خاکها و بتن آسفالتی سطوح تسلیم فوق‌الذکر که در مدل‌های بدون کلاهد مورد استفاده قرار می‌گیرند در برخی از مسیر تنش‌ها (با تنش جانبی زیاد) جوابگو نبوده و بایست اصلاحاتی بر روی آنها انجام گیرد و یا فرض جدیدی برای مدل تسلیم در نظر گرفته شود [۵]. برای خاک‌ها و یا بطور کلی تر برای مصالح ژئوتکنیکی استفاده از معیارهای موهر - کلمب و دراگر - پراگر دو نقیصه به همراه دارد. اول اینکه فرض قانون جریان متحد ($F \equiv Q$) در حوزه تنش‌های جانبی زیاد سبب بوجود آمدن اتساع (dilatancy) بیش از حد مورد انتظار خواهد شد و دوم اینکه به دلیل نداشتن کلاهد هر دو مدل بالا می‌توانند بطور نامحدودی در برابر تنش‌های حجمی فشاری مقاومت کنند که با مشاهدات آزمایشگاهی - تجربی مغایرت دارد. (F, Q به ترتیب تابع پتانسیل پلاستیک و تابع تسلیم می‌باشند.)

می‌توان این دو نقطه ضعف را با استفاده از مدل حالت حد بحرانی (Critical State Model یا C.S.M) بر طرف نمود. نمونه ای از این مدل که در دستگاه مختصات σ_{11}, σ_{33} ترسیم شده است در شکل ۱ آمده است. در اینجا سعی بر این است که مدل مناسبی برای وضعیت الاستوپلاستیک بتن آسفالتی ارائه نماییم. سطح تسلیم مدل مورد بحث از سه بخش تشکیل شده است. $F_1 = 0$ معیار دراگر - پراگر که گسیختگی برشی را نشان می‌دهد، $F_2 = 0$ کلاهد مدل می‌باشد که گسیختگی حجمی بر روی آن رخ می‌دهد و $F_3 = 0$ ناحیه انقطاع کشش به منظور محدود کردن تنش‌های کششی در نظر گرفته شده است. مفصلاً در بخش‌های بعدی در رابطه با این سطح تسلیم بحث خواهد شد.

۱- ساختار معادلات حاکمه

مدل‌های رفتاری از معادلات یک‌ای تشکیل گردیده‌اند که رابطه بین تغییرات تنش و تغییرات کرنش را معین می‌کنند [۶]. در حالت تعمیم یافته از تانسور تنش σ_{ij} و تانسور کرنش ϵ_{ij} استفاده می‌کنیم و تغییرات آنها را توسط $\dot{\epsilon}_{ij}$ ، $\dot{\sigma}_{ij}$ نشان می‌دهیم. در اینجا فرض شده است که بتوان تغییرات کرنش را به صورت جمع عوامل الاستیک و پلاستیک نوشت.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p$$

(۱)

فرض دیگر مبنی بر ایزوترپ بودن مصالح است که استفاده از نامتغیرهای تنش و کرنش را در معادلات رفتاری مجاز می‌کند. معادلات الاستیسیته را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\epsilon}_{KK}^e = \frac{1}{3K} \dot{\sigma}_{KK} \quad , \quad \dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{2G} \dot{s}_{ij} \quad (2)$$

که K و G به ترتیب مدول حجمی بالک و مدول برشی می‌باشند و \dot{s}_{ij} ، $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ به ترتیب عوامل تفاضلی $\dot{\sigma}_{ij}$ و $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ بوده و به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_{KK} \delta_{ij} \quad , \quad \dot{s}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\sigma}_{KK} \delta_{ij} \quad (2)$$

مؤلفه های تغییرات کرنش پلاستیک $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ طبق روابط کلاسیک عبارتند از:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

در رابطه بالا، F تابع تسلیم و λ ضریب مثبت می‌باشد. فرض گردیده مدل به صورت همسان (Associate) است و تابع تسلیم، فقط وابسته به نامتغیرهای اول و دوم تنش می‌باشد. نامتغیر اول تنش σ_m بعنوان تنش قائم متوسط و نامتغیر دوم تنش های تفاضلی S به عنوان تنش برش موثر به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{KK} \quad (1-5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} (s_{ij} s_{ij})} = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{KK}^2)} \quad (2-5)$$

با توجه به تعاریف فوق معادله (4) به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial \sigma_{ij}} \right] \quad (6)$$

با مشتق گیری از روابط (5) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad , \quad \frac{\partial S}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{2S} S_{ij} \quad (7)$$

با استفاده روابط بالا می‌توان نشان داد که تغییرات کرنش حجمی پلاستیک و تغییرات کرنش تفاضلی می‌توانند به صورت زیر نیز محاسبه می‌شوند:

$$\dot{\epsilon}_{KK}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_m} \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\lambda}{2S} \cdot \frac{\partial F}{\partial S} S_{ij} \quad (9)$$

عموماً سطوح تسلیم در فضا دو بعدی S, σ_m ترسیم می‌شوند و کرنش های همسان با آنها $\dot{\epsilon}_v, \dot{\epsilon}_v$ می‌باشند که به صورت زیر ارائه می‌گردند:

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{kk} \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{S} S_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (11)$$

باز هم می توان $\dot{\epsilon}_v, \dot{\epsilon}$ را به مؤلفه های الاستیک و پلاستیک تجزیه نمود.

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^e + \dot{\epsilon}_v^p \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p \quad (13)$$

با استفاده از روابط الاستیک ارائه شده در معادله (۲) خواهیم داشت:

$$\dot{\epsilon}_v^e = \frac{\dot{\sigma}_m}{K}, \quad \dot{\epsilon}^e = \frac{\dot{S}}{G} \quad (14)$$

همچنین با استفاده از قوانین جریان پلاستیک و رابطه (۸) داریم:

$$\dot{\epsilon}_v^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_m}, \quad \dot{\epsilon}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial S} \quad (15)$$

۲- معرفی بخش های مختلف تابع تسلیم مدل پیشنهادی

در مدل های رفتاری الاستوپلاستیک انتخاب سطح تسلیم اولین فرض به منظور پیش بینی رفتار مصالح می باشد هر اندازه سطح تسلیم جامع تر باشد مدل وابسته به آن نیز قوی تر خواهد بود. در اینجا توابع تسلیم در مدل بر حسب نامتغیرهای تنش S, σ_m نوشته شده اند. ناحیه الاستیک در فضای محدود بین سه تابع تسلیم مجزای $F_1=0, F_2=0, F_3=0$ نشان داده شده در شکل ۱ واقع است. (باید توجه داشت که همواره $S \geq 0$ می باشد.)
سه سطح تسلیم مجزا که با ترکیب آنها سطح تسلیم نهائی شکل می گیرد عبارتند از: $F_1=0$ معیار تسلیم دراکر - پراگر که در وضعیت گسیختگی برشی فعال می گردد، $F_2=0$ کلاک بیضی شکلی است که بر خط دراکر - پراگر مماس است و در وضعیت تنش های جانبی زیاد فعال خواهد شد، $F_3=0$ سطح تسلیم ناحیه کشش در نظر گرفته شده که از نقطه حداکثر مقاومت کششی، عبور کرده و به شکل بیضی می باشد. برای مصالحی که تاب کششی پایینی دارند می توان $\sigma_m^T = 0$ را برگزید. معیار تسلیم دراکر - پراگر به صورت زیر نوشته می شود:

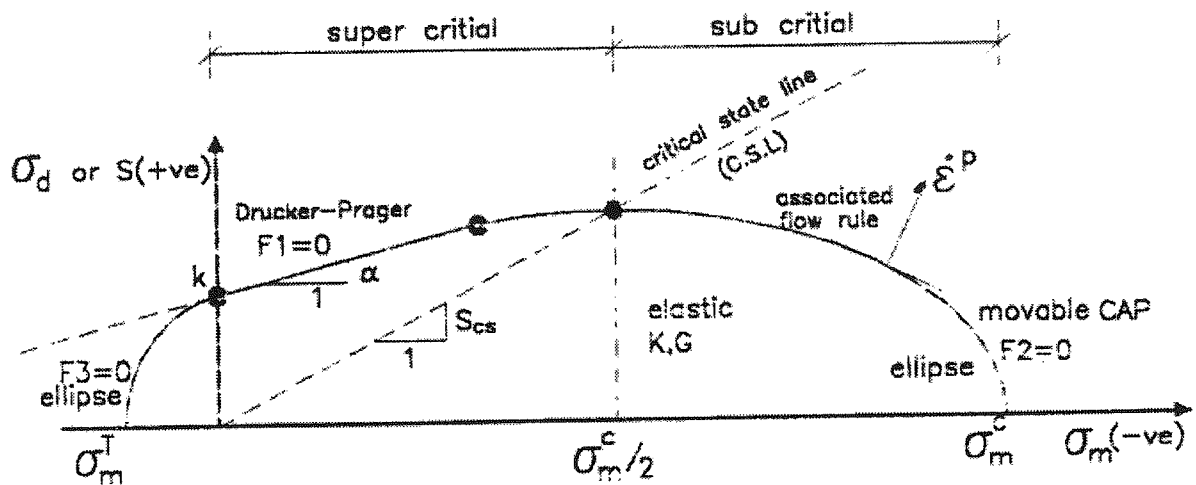
$$F_1 = \alpha \sigma_m + S - k = 0 \quad (16)$$

k, α پارامترهای مدل هستند که به ترتیب بر حسب زاویه اصطکاک داخلی ϕ و ضریب چسبندگی C ارائه می شوند.

$$\alpha = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)}, \quad k = \frac{6 C \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad (17)$$

برای این قسمت از مدل سخت شونده در نظر گرفته نشده است و همانگونه که از رابطه ارائه شده نیز بر می آید معیار تسلیم در این بخش فقط به نامتغیرهای تنش وابسته است لذا موقعیت این بخش از سطح تسلیم در فضای تنش ثابت خواهد ماند. در مدل حاضر کلاک به شکل بیضی در نظر گرفته شده است که بر خط دراکر - پراگر مماس است و از مبدأ مختصات و σ_m^c نیز عبور می کند.

$$F_2 = \frac{\sigma_m (\sigma_m - \sigma_m^c) + R^2 S^2}{R^2 S - R \sigma_m^c / 2} = 0 \quad (18 - الف)$$



شکل (۱) سطح تسلیم برای مدل ارائه شده.

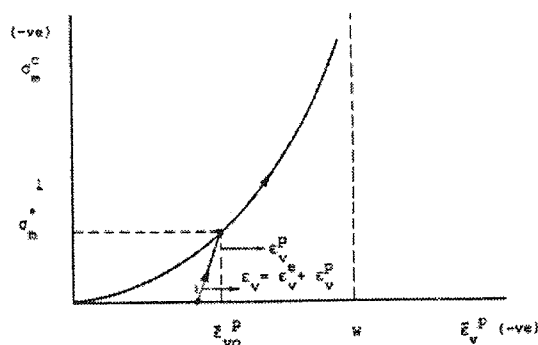
$$R_2 = \frac{(\sigma_m^c)^2}{4k(k - \alpha \sigma_m^c)} \quad (۱۸-ب)$$

برای این قسمت از سطح سیلان سخت شوندهگی غیر خطی در نظر گرفته شده است. در این مدل پارامتر سخت شوندهگی به کرنش حجمی پلاستیک وابسته گردیده است. میزان تراکم اولیه با $\bar{\epsilon}_v^p$ مشخص گردیده است. با این حساب میزان افزایش تراکم (افزایش کرنش حجمی پلاستیک) به علت بارگذاری برابر است با:

$$\bar{\epsilon}_v^p = \bar{\epsilon}_v^p + \epsilon_v^p \quad (۱۹-الف)$$

$$\bar{\epsilon}_v^p = W [1 - \exp(D\sigma_m^c)] \quad (۱۹-ب)$$

رابطه بالا بصورت تریسیمی در شکل ۲ نشان داده شده است، این شکل بطور واضحی جایگاه و اهمیت پارامترهای W و D را نشان می دهد. W حداکثر کرنش حجمی پلاستیک مصالح قبل از شکستن دانه ها می باشد.



شکل (۲) منحنی سخت شوندهگی غیر خطی برای کلاهدک.

سخت شوندهگی و بزرگ شدن سطح تسلیم هنگامی به وجود می آید که $\bar{\epsilon}_v^p$ منفی باشد بنابراین هنگامی که مسیر تنش به ربع بیضی در محدوده $\sigma_m^c/2$ ، σ_m^c برخورد کند سخت شوندهگی خواهیم داشت اما در محدوده تلاقی بیضی با خط دراکر-پراگر و $\sigma_m^c/2$ سخت شوندهگی در نظر گرفته نمی شود و رفتار به صورت الاستیک کاملاً پلاستیک می باشد. در برنامه کامپیوتری ADINA که توسط Bathe et al [۷] تهیه شده است کلاهدک مدل $F_3 = \sigma_m^c - \sigma_m = 0$ به شکل خط

مستقیم در نظر گرفته شده است. این کلاهک در محل تلاقی با خط دراگر - پراگر تحت اثر برخی از مسیر تنش ها به وضعیت نقاط تکین می رسد و جواب ها پایداری خود را از دست می دهند و قانون جریان پلاستیک در تعیین بردار کرنش پلاستیک با مشکل مواجه می شود، که به دلیل عدم ارضای شرط پایداری دراگر می باشد. شرط پایداری ارائه شده توسط دراگر طبق رابطه زیر است [۶]:

$$\dot{S} \dot{\epsilon} + \dot{\sigma}_m \dot{\epsilon} v \geq 0 \quad (20)$$

ناحیه انقطاع کشش $F_3=0$ معیار تسلیمی است که در وضعیت تنش های کششی مورد استفاده قرار می گیرد. چنانچه ادامه معیار دراگر - پراگر را در ناحیه کششی در نظر بگیریم به مقاومت کششی بیشتر از مقدار واقعی می رسیم که مطلوب نمی باشد. به لحاظ هندسی شکل سطح تسلیم در ناحیه کشش را به صورت بیضی در نظر می گیریم که از نقطه $(S=0, \sigma_m = \sigma_m^T)$ عبور کرده و در نقطه $(S=k, \sigma_m = 0)$ بر معیار دراگر - پراگر مماس می باشد.

$$F_3 = \frac{(k - 2\alpha \sigma_m^T)}{(\sigma_m^T)^2} \cdot \left(\sigma_m - \frac{\alpha (\sigma_m^T)^2}{k - 2\alpha \sigma_m^T} \right)^2 + \frac{S^2}{k} - \frac{k - \alpha \sigma_m^T}{k - 2\alpha \sigma_m^T} = 0 \quad (21)$$

با توجه به وضعیت سطح تسلیم ارائه شده که به صورت هموار می باشد می توان نشان داد که در تمام بخش های آن شرط پایداری دراگر برقرار است و در هیچ نقطه ای Singularity بوجود نمی آید.

۳- حل معادلات الاستوپلاستیک به روش الاستو-ویسکوپلاستیک

در اینجا حل مسئله الاستوپلاستیک با استفاده از تئوری الاستو-ویسکوپلاستیک انجام می گیرد. این روش به طور مفصل در مرجع شماره [۵] آمده است که در این نوشتار فقط به مراحل اصلی این روش اکتفا می شود. این مراحل به شرح ذیل می باشند. حل مسئله باید از شرایط اولیه معلوم در زمان $t=0$ شروع شود، در عمل این شرایط اولیه از حل الاستیک و وضعیت استاتیک حاصل می شوند. در این مرحله $d^0, f^0, \sigma^0, \epsilon^0$ مشخص و $\dot{\epsilon} v p = 0$ می باشد (منظور از $\dot{\epsilon} v p$ تغییرات کرنش ویسکوپلاستیک در واحد زمان است). سپس زمان را به اندازه Δt_n نمو می دهیم و ادامه حل مسئله در این محدوده زمانی صورت می گیرد. مراحل متوالی حل مسئله در این فاصله زمانی مشخص به ترتیب زیر است. گام اول: فرض می شود در زمان $t=t_n$ جواب مسئله را داشته باشیم و مقادیر $d^n, \sigma^n, \epsilon^n, f^n$ محاسبه شده باشند، مقادیر زیر متوالیاً قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} \text{a) } B^n &= B_0 + B_{NL}(d^n) \\ \text{b) } C^n &= C^n(\sigma^n, \Delta t_n) \\ \text{c) } \hat{D}^n &= (D^{-1} + C^n)^{-1} \\ \text{d) } K_T^n &= \int_{\Omega} [B^n]^T \hat{D}^n B^n d\Omega \\ \text{e) } \dot{\epsilon} v p &= \lambda \langle \mathcal{O}(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (22)$$

در روابط بالا B^n ماتریس تبدیل تغییر شکل به کرنش، B_0 جزء ثابت و استاندارد، B_{NL} به منظور در نظر گرفتن مسئله غیر خطی هندسی، K_T^n ماتریس سختی مماسی در هر مرحله، λ پارامتر جریان ویسکوپلاستیک، F تابع سطح تسلیم، \mathcal{O} تابع همگرا کننده تدریجی می باشد. گام دوم: میزان نمو بوجود آمده در تغییر شکل ها به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta d^n = [K_T^n]^{-1} \Delta v^n \quad (23 - \text{الف})$$

$$\Delta V^n = \int_{\Omega} [B^n]^T \hat{D}^n \dot{\epsilon}_{VP}^n \Delta t_n d\Omega + \Delta f^n \quad (23-ب)$$

(ii) میزان نمو بوجود آمده در تنش از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\Delta \sigma^n = \hat{D}^n (B^n \Delta d^n - \dot{\epsilon}_{VP}^n \Delta t_n) \quad (23-ج)$$

گام سوم: تغییر شکلها و تنش های تجمعی با افزودن نمو آنها به مقادیر متناظر آنها در مرحله قبل تعیین می شود.

$$d^{n+1} = d^n + \Delta d^n \quad (24-الف)$$

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + \Delta \sigma^n \quad (24-ب)$$

گام چهارم: تغییرات در واحد زمان کرنش ویسکوپلاستیک از قانون جریان ویسکو پلاستیک بدست می آید.

$$\dot{\epsilon}_{VP}^{n+1} = \lambda \langle \Phi(F) \rangle a^{n+1} \quad (25-الف)$$

$$a^{n+1} = \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^{n+1} \quad (25-ب)$$

گام پنجم: در این مرحله اصلاح معادلات تعادل انجام می پذیرد بدین صورت که ابتدا B^{n+1} با توجه به تغییر مکان محاسبه شده و میزان نیروی پس ماند به نحو زیر تعیین می گردد.

$$\psi^{n+1} = \int_{\Omega} B^{n+1} \sigma^{n+1} d\Omega + f^{n+1} \quad (26)$$

این بردار نیرو به بردار نیروهای موجود در فاصل زمانی جدید افزوده می شود.

$$\Delta V^{n+1} = \int_{\Omega} [B^{n+1}]^T \hat{D}^{n+1} \dot{\epsilon}_{VP}^{n+1} \Delta t_{n+1} d\Omega + \psi^{n+1} + \Delta f^{n+1} \quad (27)$$

گام ششم: برای تعیین زمان رسیدن به وضعیت پایدار تحقیق نمایید آیا سرعت کرنش ویسکو پلاستیک $\dot{\epsilon}_{VP}^{n+1}$ به اندازه کافی در هر نقطه گوس به صفر نزدیک شده یا در محدوده قابل قبول قرار گرفته است؟ اگر جواب مثبت باشد انتظار داریم که جواب همگرا شده باشد و در اینجا حل مسئله خاتمه یافته و یا اینکه مرحله بارگذاری جدید شروع می شود. اگر $\dot{\epsilon}_{VP}^{n+1}$ به اندازه کافی کوچک نباشد لازم است به گام اول مراجعه و کل مرحل فوق الذکر برای مرحله زمانی بعدی اجرا شود. مدل الاستوپلاستیک مورد بحث در این نوشتار به همراه روش حل الاستو - ویسکوپلاستیک در برنامه POLYMAT گنجانیده شده است.

۴- برنامه کامپیوتری POLYMAT

برنامه کامپیوتری اجزاء محدود POLY MAT

(POLY technic - MATerials) بر اساس مدل پیشنهادی ارائه شده توسط مؤلفین به منظور آنالیز عددی مسائل الاستوپلاستیک و ویسکوالاستوپلاستیک در سازه های مختلف مهندسی به زبان فرترن تهیه شده است. البته چون روش حل الاستو - ویسکوپلاستیک در برنامه مورد استفاده قرار گرفته است می توان با انتخاب پارامترهای خزش مناسب که از منحنی های خزش مصالح در شرایط مختلف بارگذاری و درجه حرارت های مختلف حاصل می آید رفتار وابسته به زمان مصالح و سازه ها را بررسی نمود. در اینجا هدف ما بررسی رفتار الاستوپلاستیک بوده و بخش ویسکوزی (وابسته به زمان) مورد استفاده قرار نمی گیرد. این

برنامه کامپیوتری حاوی مدل های ترسکا، موهر - کلمب، فن میسز، دراگر - پراگر و نهایتاً مدل کلاهدار مورد بحث در این نوشتار می باشد. علامت تنش ها و کرنش های فشاری به صورت منفی و تنش ها و کرنش های کششی مثبت در نظر گرفته شده است.

با مدل رفتاری ارائه شده و برنامه POLYMAT می توان به بررسی خواص و عملکرد مصالح در مسیر تنش های مختلف در حوزه تنش های جانبی زیاد، تنش های جانبی کم و تنش های کششی پرداخت.

با این مدل همچنین می توان رفتار مصالح ژئوتکنیکی از قبیل بتن، سنگ، خاک، بتن آسفالتی و سازه هایی از قبیل روسازی راه، تونل، شمع و پی های گسترده را مورد آنالیز قرار داد.

در حال حاضر با امکانات موجود در برنامه مسائل دو بعدی در وضعیت تنش صفحه ای، کرنش صفحه ای و تقارن محوری قابل آنالیز می باشند اما می توان با انتخاب المان های مناسب آنالیز مسائل سه بعدی را نیز ممکن ساخت.

۵. نتایج عددی

به منظور بررسی دقت مدل و برنامه تهیه شده، نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از برنامه مقایسه و میزان اعتبار نتایج عددی به دست آمده سنجیده می شوند.

نتایج مشاهدات آزمایشگاهی Sandler و Dimaggio بر روی ماسه Mc Cormack Ranch در وضعیت محصور شده تحت بارگذاری محوری (کرنش یک بعدی) توسط محققین زیادی مورد استفاده واقع شده است. نمونه ماسه مورد آزمایش دارای قطر ۱ اینچ و ارتفاع ۵/۰ اینچ می باشد. با توجه به اینکه هندسه و بارگذاری نمونه از تقارن محوری برخوردار می باشد، این نمونه در وضعیت تقارن محوری مدل سازی شده است.

پارامترهای مدل برای انطباق بهتر با مشاهدات آزمایشگاهی به صورت زیر انتخاب شده اند:

$$K = 6607 \text{ Ksi} \quad G = 40 \text{ Ksi}$$

$$W = 0.077 \quad D = 1.2 \quad \varepsilon_{V_0}^P = 0.002$$

$$C = 0.085 \text{ Ksi} \quad j = 2.75^\circ$$

$$\sigma_m^T = 0.0 \quad l = 0.011/\text{sec}$$

ضمناً تابع $\phi(F)$ به صورت زیر انتخاب شده است:

$$\phi(F) = \frac{F - F_0}{F_0} \quad (28)$$

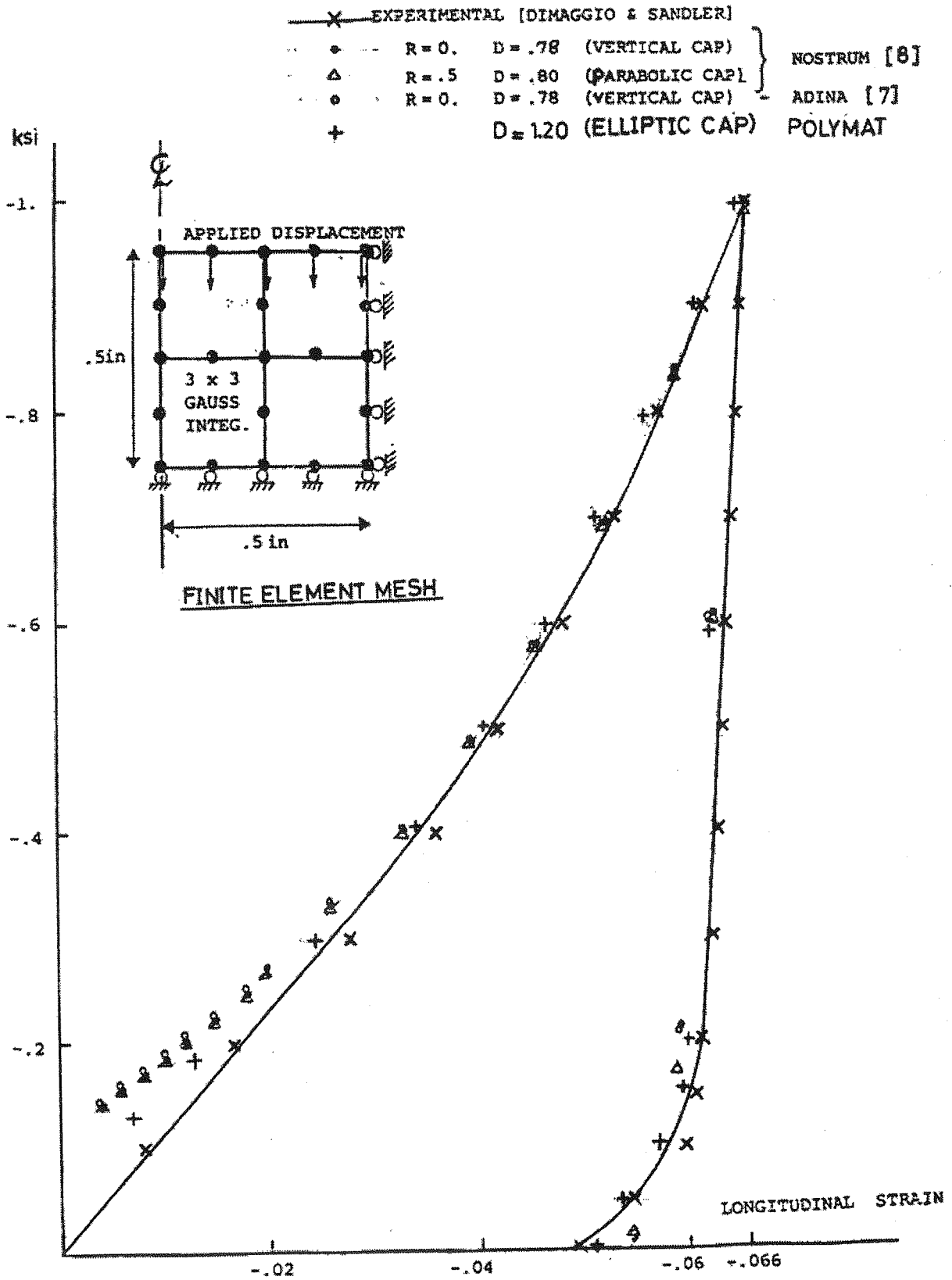
در وضعیت تسلیم بر روی کلاهدار $F_0 = \sigma_m^c$ و برای معیار تسلیم دراگر - پراگر $F_0 = k$ در نظر گرفته شده است. نتایج عددی به همراه مشاهدات آزمایشگاهی در شکل ۳ منعکس گردیده است. همانطور که در شکل شماره ۳ مشاهده می شود نتایج تطابق خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی دارد ولی اختلاف هایی بین این دو در ابتدای منحنی و همچنین در قسمت انتهایی منحنی باربرداری مشاهده می شود که دلایل عمده آن عبارتند از:

۱- عدم مدل سازی دقیق اندر کنش بین نمونه ماسه و جداره قالب، (تنش اصطکاکی بین قالب مدل نشده است.) به منظور رفع این نقیصه می توان یکسری فنر قائم در مرز بین قالب و نمونه در نظر گرفت.

۲- پارامترهای الاستیک را بایست به صورت غیر خطی مدل سازی نمود، به طوری که با افزایش تنش های حجمی مدول الاستیسیته نیز افزایش یابد. در مصالح دانه ای مدول الاستیسیته را می توان به تنش متوسط قائم مرتبط نمود.

$$E = K_1 (\sigma_m)^{K_2} \quad (29)$$

K_1 و K_2 ثوابت مصالح می باشد که در جدول ۱- حدود مقادیر آنها داده شده است.



شکل (۳) آزمایش کرنش یک بعدی برای ماسه McCormack Ranch [۲] و نتایج حاصل از برنامه کامپیوتری ADINA، NOSTRUM و POLYMAT

در شکل شماره ۴ مسیر تنش مسئله فوق نشان داده شده است. مقایسه دیگری بین نتایج عددی حاصل از برنامه POLYMAT و برنامه ADINA در وضعیت بارگذاری سه محوری تناسبی ($\sigma_3 = 0.1 \sigma_1$) جهت بررسی قابلیت مدل در ارائه تغییر شکل های برش پلاستیک نامحدود تحت تاثیر تنش ثابت (حالت حد بحرانی) انجام می گیرد. این مسیر تنش در نهایت به نقطه ای ختم می شود که در آن $\epsilon^p_V = 0$ می باشد و تراکم نمونه از این مرحله به بعد ثابت می شود. شکل ۵ نتایج عددی حاصل از مدل را در این مسیر تنش نشان می دهد.

نتیجه گیری

مدل ارائه شده از سه بخش تشکیل شده است. دو بخش از سطح تسلیم بدون سخت شوندگی و رفتار بر روی آنها به صورت آلاستیک کاملاً پلاستیک می باشد، تنها مسیر تنش های ختم شده به کلاهدک و در محدوده $\sigma_m^c / 2$ ، σ_m^c سخت شوندگی دارند. بر اثر سخت شوندگی سطح تسلیم بزرگتر می شود. مدل انتخابی به نحوی است که نقاط تکین در هیچ مسیر تنش وجود نمی آید از اینرو محاسبات کامپیوتری با سهولت و دقت بیشتری انجام می شود و با توجه به اینکه شرط پایداری دراکر ارضا می شود همگرایی جواب ها نیز تضمین می گردد.

همانگونه که از مسیر تنش های مثال های بخش قبل مشاهده می شود، هر دو مسیر تنش به نقطه رأس بیضی فشاری ختم می شود ولی به علت تفاوت دو مسیر تنش عملکرد مصالح نیز فرق می کند، بنابراین براحتی می توان تاثیر مسیر تنش بر عملکرد مصالح را نشان داد.

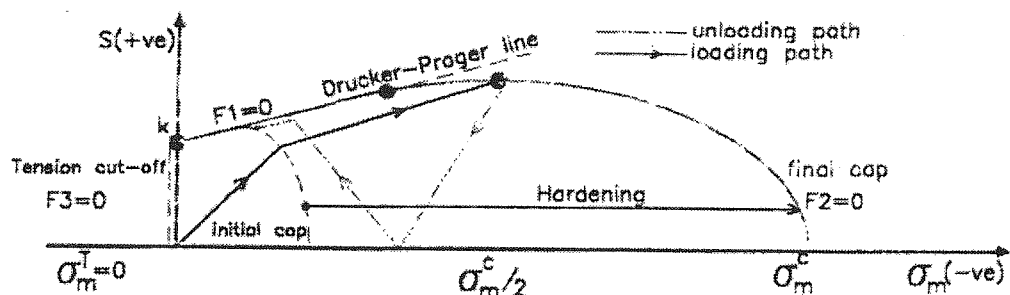
با مدل ارائه شده می توان رفتار سازه ها را در سه ناحیه گسیختگی برشی - حجمی، کششی بررسی کرد، عملکرد سازه هایی چون شمع، پی های گسترده، تونل و روسازی راه با این مدل قابل آنالیز و تحلیل است. تحت تاثیر تنش های جانبی بزرگتر و در محدوده گسیختگی برشی میزان اتساع (dilatancy) بوجود آمده از معیار دراکر - پراگر بالنسبه کمتر است که این با واقعیت هماهنگی بیشتری دارد. میزان اتساع با افزایش تنش های جانبی به سمت صفر میل می کند که بسیار مطلوب است.

جدول (۱) ثوابت K_1 و K_2 برای مصالح دانه ای.

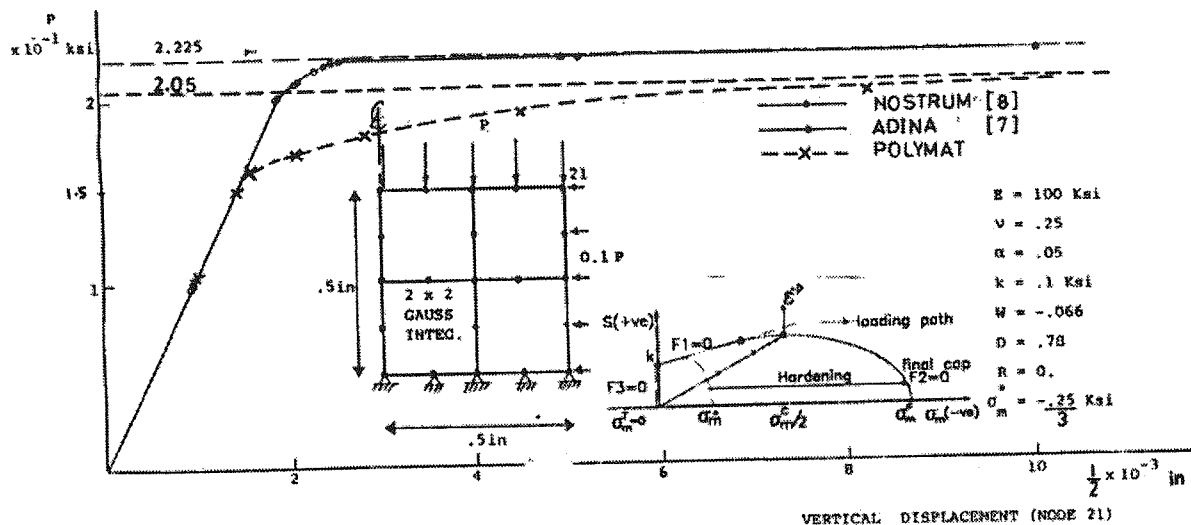
Material type	No. of data points	K_1 (psi)		K_2	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Silty sand	8	1620	78	0.62	0.13
Sand-gravel	37	4480	4300	0.53	0.17
Sand-aggregate blend	78	4350	2630	0.59	0.13
Crushed stone	115	7210	7490	0.45	0.23

Note. 1 psi = 6.9 kPa.

Source. After Rada and Witczak (1981).



شکل (۴) مسیر تنش بوجود آمده در آزمایش ماسه محصور شده.



شکل (۵) مقایسه نتایج عددی برنامه های ADINA, PolyMAT و NOSTRUM در آزمایش سه محوری متناسب به همراه پارامترها و شرایط مرزی مدل.

مراجع

- [1] Lu, Y. and Wright; P, J., Temperature Related Visco-Elasto Plastic Properties of Asphalt Mixtures J. Transp. Engrg., ASCE 126 (1) , 58-65, 2000.
- [2] Dimaggio, F. L. and Sandler, I. S., Material Model for Granular Soils. J. Eng. Mech. Div., ASCE, 97, (EM3), 935-950, 1971.
- [3] Nelson, I. "Constitutive for Use in Numerical Computation: "PROC of conf. on Dynamical Methods in Soil and Mechanics, (Edited by Gadeius), A.A. Balkema 1978.
- [4] DRUCKER, D.C. and PRAGER, W., "Soil Mechanics and Plastic Analyse or Limit Design," 10, 157-175, 1952.
- [5] Owen, D.R.J, and Hinton. E. "Finite Elements In Plasticity" pinerdge Press Limited Swansea, U.K., 1980.
- [6] Drucker, D.C. "on Uniqueness in Theory of Plasticity", Quarterly Applied Mathematics, 14, 35-92, 1956.
- [7] Bathe, K.J., "ADINA-A Finite Element Propram for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis" Report AVL 82448-1, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts institute of Tech, May 1975 (revised December 1978).
- [8] Griffin, T.B., "NOSTRUM - A finite element program for nonlinear structural mechanics", Technical Report No.18, Nonlinear structural Mechanics Research unit. University of Capetown, June 1982.
- [9] Huang, Yang H., "Pavement Analysis and Design" Pretice Hall Engle Zood Cliffs, Newjersey, 1993.
- [10] Zienkiewicz, O. C. and Corneau, I.C., "Visco Plasticity - Plasticity and Creep in Elastic Solids - A Unified Numerical Solution Approach", Int. J.Num. Meth. Engng. 8, 821-845 (1974).
- [11] Lu, Y. and Wruight, P.J., "Temperature Related Visco-Elasto Plastic Properties of Asphalt Mixtures" J. Transp. Engrg., ASCE 126(1), 2000.
- [12] Adachi, T. and Oka, F. and Zhang, G., F., "An Elasto-Visco Plastic Constitutive Model With Strain Softening", Proc of the sixth INT. SYMP. On Numerical Models In Geomechanics-NUMOG VI/MONTRAL/QUEBEC/CANADA/2-4 JULY 1997.