

اثر عامل حالت در بهبود پیش بینی رخداد نوار برشی در خاک های دانه ای

علی لشکری^۱ و منوچهر لطیفی^{۲*}

(تاریخ دریافت ۸۶/۲/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۳/۲۷، تاریخ تصویب ۸۷/۸/۷)

J

واژه های کلیدی:

مقدمه

Been & Jefferies

Rudnicki & Rice

:[]

$$\psi = e - e_c \quad ()$$

.[]

e_c

e

()

Wood

Latifi Manzari & Dafalias

.[-]

$$\dot{\varepsilon}_q^e = \frac{\dot{q}}{G} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_v^e = \frac{\dot{p}}{K} \quad (2)$$

$$K = \frac{G}{1-2\nu}$$

$$G = G_0 p_{ref} \frac{(2.973-e)^2}{1+e} \sqrt{\frac{p}{p_{ref}}} \quad (3)$$

$$K = G \frac{1}{1-2\nu} \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_q^p = \Lambda \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \Lambda d$$

$$d = \frac{\dot{\varepsilon}_v^p}{\dot{\varepsilon}_q^p} \quad (6)$$

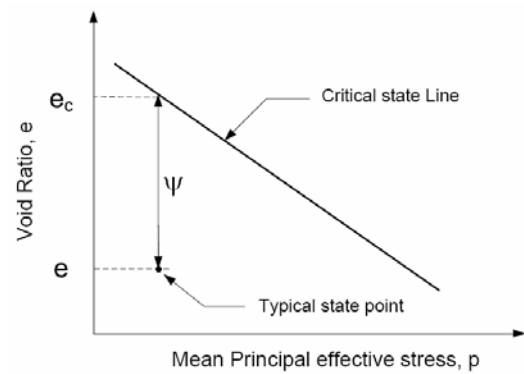
$$\Lambda = \frac{1}{K_p} \left(\frac{\partial f}{\partial p} \dot{p} + \frac{\partial f}{\partial q} \dot{q} \right) = \frac{1}{K_p} p \dot{\eta} \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}_q^p = \frac{p \dot{\eta}}{K_p} \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \frac{p \dot{\eta}}{K_p} d \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}_q = \dot{\varepsilon}_q^e + \dot{\varepsilon}_q^p \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_v^e + \dot{\varepsilon}_v^p \quad (11)$$



شکل ۱: تعریف پارامتر حالت (برگرفته از [۱]).

مدل رفتاری تابع حالت

[] Li & Dafalias

$$f = q - \eta p = 0 \quad (12)$$

$$(\hat{\sigma}_1) \quad (q) \quad (p) \quad (13)$$

$$(\hat{\sigma}_3) \quad (14)$$

$$q = \frac{\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_3}{2} \quad (15)$$

$$p = \frac{\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_3}{2} \quad (16)$$

$$\eta = q/p$$

$$\dot{\varepsilon}_q = \dot{\varepsilon}_q^e + \dot{\varepsilon}_q^p \quad (17)$$

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_v^e + \dot{\varepsilon}_v^p \quad (18)$$

$$\varepsilon_v \quad \varepsilon_q$$

"p" "e"

$$(\quad) (\quad)$$

$$\begin{matrix} \dot{\epsilon}_{11} & \dot{\epsilon}_{31} \\ \dot{\sigma}_{33} & \dot{\sigma}_{22} \end{matrix} \quad \Delta$$

[] Lade

C

$$\Delta \dot{\epsilon} = C \Delta \dot{\sigma}$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\epsilon}_{33} = 0 \\ \Delta \dot{\epsilon}_{22} = 0 \end{cases} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{cases} \Delta \dot{\sigma}_{33} \neq 0 \\ \Delta \dot{\sigma}_{22} \neq 0 \end{cases} \quad ()$$

$$\det C = 0$$

$$C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21} = 0 \quad ()$$

شرایط اختصاصی با توجه به مدل رفتاری پیشنهادی

$$\dot{\epsilon}_{22}^e = \frac{\dot{\sigma}_{22}}{E} - \frac{\nu}{E}(\dot{\sigma}_{11} + \dot{\sigma}_{33}) \quad ()$$

$$\dot{\epsilon}_{33}^e = \frac{\dot{\sigma}_{33}}{E} - \frac{\nu}{E}(\dot{\sigma}_{11} + \dot{\sigma}_{22})$$

$$E (= 2(1+\nu) G) \quad ()$$

$$\Delta \dot{\epsilon}_{22}^e = \frac{\Delta \dot{\sigma}_{22}}{E} - \frac{\nu}{E}(\Delta \dot{\sigma}_{11} + \Delta \dot{\sigma}_{33}) \quad ()$$

$$\Delta \dot{\epsilon}_{33}^e = \frac{\Delta \dot{\sigma}_{33}}{E} - \frac{\nu}{E}(\Delta \dot{\sigma}_{11} + \Delta \dot{\sigma}_{22})$$

$$\dot{\epsilon}_q = \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_p} \right) \dot{q} - \frac{\eta}{K_p} \dot{p} \quad ()$$

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{\dot{p}}{K} + d \dot{\epsilon}_q^p$$

Li & Dafalias

[]

$$d = \frac{d_0}{M} (\eta_{pt} - \eta) \quad ()$$

η_{pt}

$$\eta_{pt} = M \exp(m\psi)$$

$$K_p = (h_1 - h_2 e) G \left(\frac{M}{\eta} - \exp(n\psi) \right) \quad ()$$

M n, m, h₂, h₁

M

() ()

اعمال شرط ناپایداری

شرط عمومی

()

$$\partial f / \partial \sigma_{22} = \partial g / \partial \sigma_{22} = 0$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{22}^p = 0$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{33}^p = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \Delta \dot{\sigma}_{33} \quad (-)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\varepsilon}_{22} \\ \Delta \dot{\varepsilon}_{33} \end{array} \right\} = \left(\begin{array}{cc} 1/E & -v/E \\ -v/E & 1/E+1/K_p \end{array} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \right) \left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\sigma}_{22} \\ \Delta \dot{\sigma}_{33} \end{array} \right\} \quad ()$$

$$K_p = \frac{-E}{1-v^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \quad ()$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} = \frac{\partial f}{\partial \hat{\sigma}_1} \cdot \frac{\partial \hat{\sigma}_1}{\partial \sigma_{33}} + \frac{\partial f}{\partial \hat{\sigma}_3} \cdot \frac{\partial \hat{\sigma}_3}{\partial \sigma_{33}} \quad ()$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} = \frac{\partial g}{\partial \hat{\sigma}_1} \cdot \frac{\partial \hat{\sigma}_1}{\partial \sigma_{33}} + \frac{\partial g}{\partial \hat{\sigma}_3} \cdot \frac{\partial \hat{\sigma}_3}{\partial \sigma_{33}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\sigma}_1 \\ \hat{\sigma}_3 \end{array} \right\} = \frac{1}{2} (\sigma_{11} + \sigma_{33}) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2} \right)^2 + \sigma_{13}^2} \quad ()$$

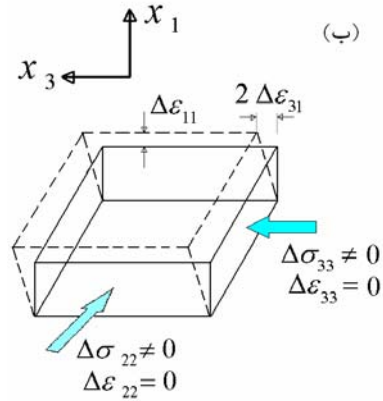
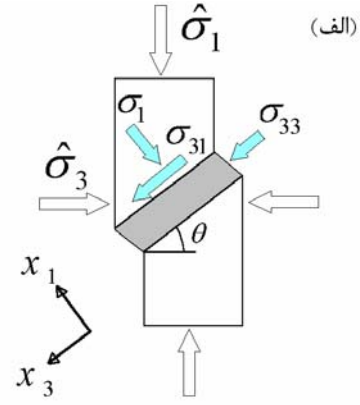
$$\left\{ \begin{array}{l} \partial \hat{\sigma}_1 / \partial \sigma_{33} \\ \partial \hat{\sigma}_3 / \partial \sigma_{33} \end{array} \right\} = \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \cos 2\theta \quad ()$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial f / \partial \hat{\sigma}_1 \\ \partial f / \partial \hat{\sigma}_3 \end{array} \right\} = \pm \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \eta \quad ()$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} = -\frac{1}{2} (\eta + \cos 2\theta) \quad ()$$

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \dot{\varepsilon}_1^p + \dot{\varepsilon}_3^p = \Lambda (\partial g / \partial \hat{\sigma}_1 + \partial g / \partial \hat{\sigma}_3) \quad ()$$

$$\dot{\varepsilon}_q^p = \dot{\varepsilon}_1^p - \dot{\varepsilon}_3^p = \Lambda (\partial g / \partial \hat{\sigma}_1 - \partial g / \partial \hat{\sigma}_3) \quad ()$$



شکل ۲: (الف) نیروهای خارجی مؤثر و مؤلفه های متناظر تنش برای یک المان مکعبی در آزمایش کرنش مسطح. (ب) نمایش اختلاف بین نرخ مؤلفه های تنش و کرنش در خارج و داخل برشی.

$$\Delta \dot{\sigma}_{11} = 0 \quad ()$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\varepsilon}_{22}^e \\ \Delta \dot{\varepsilon}_{33}^e \end{array} \right\} = \left(\begin{array}{cc} 1/E & -v/E \\ -v/E & 1/E \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\sigma}_{22} \\ \Delta \dot{\sigma}_{33} \end{array} \right\} \quad ()$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \left(\frac{1}{K_p} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \cdot \dot{\sigma}_{kl} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad ()$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \left(\frac{1}{K_p} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \Delta \dot{\sigma}_{kl} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad ()$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{22}^p = \frac{1}{K_p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{22}} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}} \Delta \dot{\sigma}_{22} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \Delta \dot{\sigma}_{33} \right)$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{33}^p = \frac{1}{K_p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}} \Delta \dot{\sigma}_{22} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \Delta \dot{\sigma}_{33} \right) \quad (-)$$

$(e_c - p)$
 (ψ_{pt})
 $\frac{1}{\psi_{pt}} \ln\left(\frac{\eta_{pt}}{M}\right)$
 m
 (ψ_{pk})
 n
 $\frac{1}{\psi_{pk}} \ln\left(\frac{\eta_{pk}}{M}\right)$
 m
 d_0
 (\quad)
 $\dot{p} = \dot{q}$
 K_p
 $(\quad -)$
 $K_p = \frac{1 - \eta}{\left(\frac{\dot{\epsilon}_q}{\dot{q}} - \frac{1}{G}\right)}$
 (\quad)
 $h_2 \quad h_1 \quad (\quad) (\quad)$

$$\begin{aligned} \partial g / \partial \hat{\sigma}_1 - \partial g / \partial \hat{\sigma}_3 &= \partial f / \partial \hat{\sigma}_1 - \partial f / \partial \hat{\sigma}_3 = 1 & (\quad) \\ &: & (\quad) \\ \partial g / \partial \hat{\sigma}_1 + \partial g / \partial \hat{\sigma}_3 &= d & (\quad) \\ &: & (\quad) (\quad) \\ \left\{ \begin{array}{l} \partial g / \partial \hat{\sigma}_1 \\ \partial g / \partial \hat{\sigma}_3 \end{array} \right\} &= \pm \frac{1}{2} + \frac{1}{2} d & (\quad) \\ &: & (\quad) (\quad) (\quad) \\ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} &= \frac{1}{2} (d - \cos 2\theta) & (\quad) \\ &: & (\quad) (\quad) (\quad) \\ K_p &= \frac{E}{4(1 - \nu^2)} (\eta + \cos 2\theta)(d - \cos 2\theta) & (\quad) \\ &\theta & \\ &: & K_p \\ \theta_c &= \pm \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{d - \eta}{2} \right) & (\quad) \\ &(\quad) & \theta_c \\ &: & \\ (K_p)_c &= \frac{E}{16(1 - \nu^2)} (\eta + d)^2 & (\quad) \end{aligned}$$

چگونگی تعیین مشخصه های مدل

ارزیابی مدل در شبیه سازی شرایط وقوع نوار
برشی

$\nu \quad G_0$
 Bender element
 G_0

Desrues & Hammad

(-)

(-)

[]

ν

M

()

Hostun RF

100, 200, 400 & 800 kPa

$$K_p > (K_p)_c$$

[]

Hostun RF

$$0 \leq K_p \leq (K_p)_c$$

$$C_u = 1.7 \quad D_{50} = 0.32 \text{ mm}$$

$$13.24 \text{ kN/m}^3$$

$$15.99 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_s = 2.65 \text{ kN/m}^3$$

$$K_p < 0$$

Hostun RF

$$e \approx 0.64$$

[]

()

()

(θ)

()

()

$$\eta_p = 0.467 \quad n = 0$$

()

()

)

(

)

(

θ

) ()

()

()

جدول ۱: عوامل به کار رفته در شبیه سازی های ارائه شده در شکل های ۳ تا ۵.

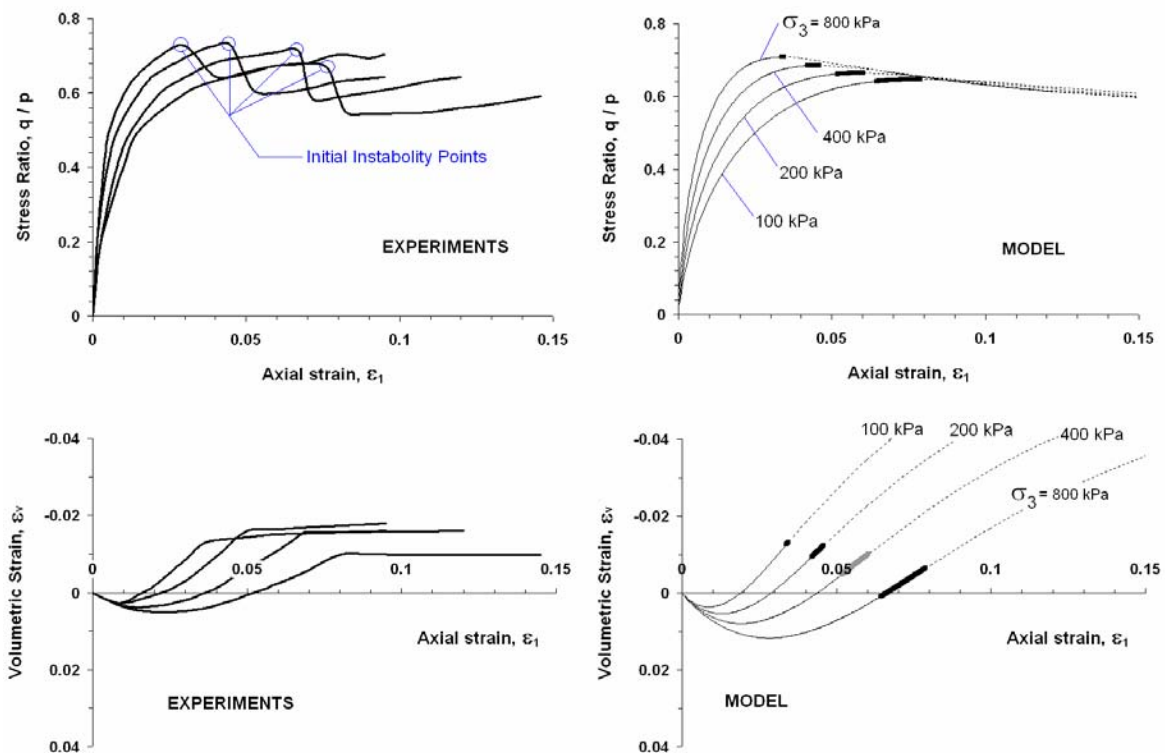
Elastic	$G_0 = 130$
	$\nu = 0.15$
Critical State	$M = 0.544$
	$e_c = 0.969 - 0.03 \ln p$
Dilatancy	$d_0 = 1.5$
State Parameter	$m = 1.0$
	$n = 2.0$
Hardening	$h_1 = 0.75$
	$h_2 = 0.75$

جدول ۲: کران های پیش بینی شده برای زاویه θ توسط مدل تابع حالت.

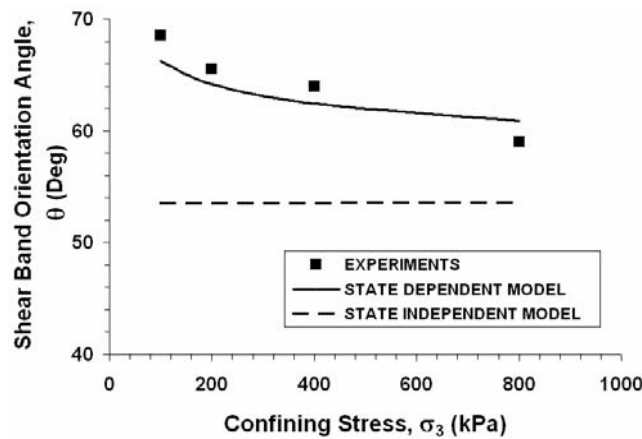
σ_3 (kPa)	θ	θ
100	66.19^0	66.20^0
200	64.148^0	64.15^0
400	62.389^0	62.40^0
800	60.84^0	60.92^0

()

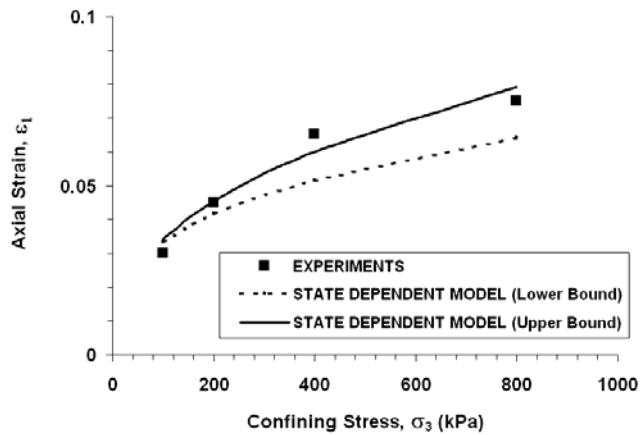
()



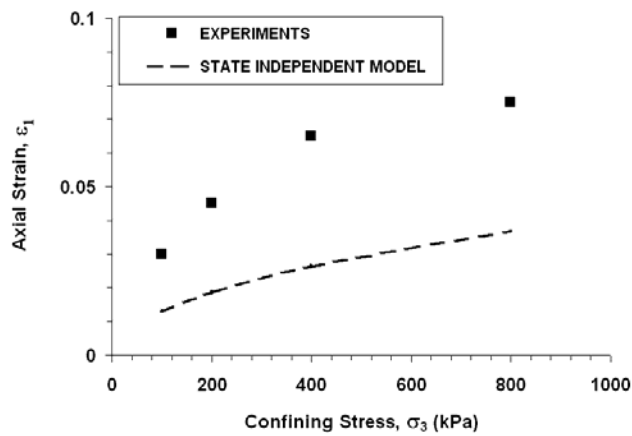
شکل ۳: رفتار پیش بینی شده ۴ نمونه ماسه در مقایسه با مقادیر تجربی متناظر در آزمایش کرنش مسطح. در پیش بینی ها، نواحی مساعد برای رخ دادن نوار برشی تیره تر و با خطوط ضخیم نشان داده شده (داده های تجربی برگرفته از مرجع [۹]).



شکل ۴: مقایسه نتایج پیش بینی مدل با داده های تجربی برای شیب نوار برشی با صفحه تنش اصلی بیشینه (داده های تجربی برگرفته از مرجع [۹]).



شکل ۵: مقایسه پیش بینی های مدل با داده های تجربی برای کرانه های بالا و پایین کرنش محوری که در آن ناپایداری رخ می دهد با استفاده از مدل تابع حالت خاک (داده های تجربی برگرفته از مرجع [۹]).



شکل ۶: مقایسه پیش بینی های مدل با داده های تجربی برای کران پایین کرنش محوری که در آن ناپایداری رخ می دهد با استفاده از مدل مستقل از حالت خاک (داده های تجربی برگرفته از مرجع [۹]).

()

بحث و نتیجه گیری

() ()

()

Papamichos & Vardoulakis

[]

[] Rudnicki & Rice

)

.([] []

مراجع

- 1 - Been, K. and Jefferies, M. G. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, Vol. 35, No. 2, PP. 99-112.
- 2 - Wood, D. M., Belkheir, K. and Liu, D. F. (1994). Strain softening and state parameter for sand modeling. *Géotechnique*, Vol. 44, No. 2, PP. 335-339.
- 3 - Manzari, M. T. and Dafalias, Y. F. (1997). A critical state two surface plasticity model for sands. *Géotechnique*, Vol. 47, No. 2, PP. 255-272.
- 4 - Latifi, M. (1998). A Multi-Yield surface model in reference state soil mechanics for cohesionless soils and liquefaction problems. Thesis submitted to the University of Alberta in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy.
- 5- Rudnicki, J. W. and Rice, J. R. (1975). "Conditions for localization of the deformation in pressure sensitive materials." *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 23, PP. 371-394.
- 6 - Li, X. S. and Dafalias, Y. F. (2000). Dilatancy for cohesionless soils. *Géotechnique*, Vol. 50, No. 4, PP. 449-460.
- 7 - Lade, P. V. (2003). "Analysis and prediction of shear banding under 3-D conditions in granular media." *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 4, P. 161-172.
- 8 - Bardet, J. P. (1991). "Orientation of shear bands in frictional soils." *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 7, PP. 1466-1484.
- 9 - Desrues, J. and Hammad, W. (1989). Shear stress dependency on mean stress level in sand. In: 2nd International Workshop on Numerical Methods for Localization and Bifurcation of Granular Bodies. Dembicki E., Gudehus, G & Sikora, Z. (eds.), Technical University of Gdansk, Gdansk, Poland, PP. 57-67.
- 10 - Wood, D. M. and Gajo, A. (2005). "Hierarchical critical state models. Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration." *ASCE Geotechnical Special Publication No. 128*, Yamamuro, J. A. & Kaliakin V. N. (eds.), PP. 459-482.
- 11 - Papamichos, E. and Vardoulakis, I. (1995). Shear band formation in sand according to non-coaxial plasticity model. *Géotechnique*, Vol. 45, No. 4, PP. 649-661.
- 12 - Zbib, H. M. and Aifantis, E. C. (1989). "A gradient dependent flow theory of plasticity: application to metal and soil instabilities." *Applied Mechanics Review*, Vol. 42, No. 11, PP. 295-304.
- 13- Mülhaus, H. B. and Vardoulakis, I. (1987). The thickness of shear band in granular soils. *Géotechnique*, Vol. 37, No. 3, PP. 271-283.