

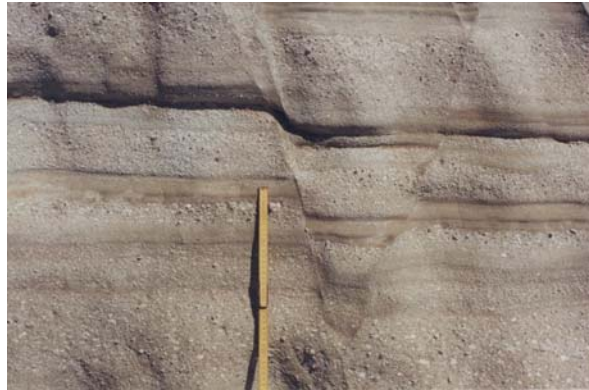
ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

I. Βαρδουλάκης και X. Γεωργιάδης

Τομέας Μηχανικής
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

1 Γενικευμένες Θεωρίες Συνεχούς Μέσου

Το 1987 οι Mühlhaus & Vardoulakis επανέφεραν στο προσκήνιο του ενδιαφέροντος διεθνώς τη Θεωρία Cosserat, με τη σύνδεση που επέτυχαν μεταξύ της θεωρίας αυτής και του προβλήματος του εντοπισμού της παραμορφώσεως και αστοχίας των κοκκωδών υλικών κατά μήκος λεπτών ζωνών ολίσθησης, πάχους ορισμένων κόκκων (Εικ. 1-1). Ακολούθησαν εργασίες του πρώτου εκ των συγγραφέων πάνω σε θεωρίες πλαστικότητας τύπου Cosserat και βαθμίδας που συνοψίστηκαν στη μονογραφία των Vardoulakis & Sulem, “Bifurcation Analysis in Geomechanics” (1995). Κατά την τελευταία δεκαετία, η περιοχή της μηχανικής των υλικών με μικροδομή αναπτύχθηκε σε βάθος και συστηματικά από τους συγγραφείς και παρουσιάστηκε σε αντίστοιχο αριθμό δημοσιεύσεων και διδακτορικών διατριβών και στηρίχθηκε από σειρά ερευνητικών προγραμμάτων που συνοψίζονται στις επόμενες ενότητες του παρόντος.



Εικ. 1-1: Συζυγείς ζώνες ολίσθησης σε περλίτη (Σαρακίνα Μήλου¹)

Κοκκώδη υλικά, υλικά οπλισμένα με ίνες, στρωσιγενή σύνθετα υλικά και κυψελοειδή υλικά είναι τυπικά παραδείγματα υλικών στα οποία, κάτω από συνθήκες, η μικροδομή μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά φαινόμενα κλίμακας καθόσον στη κλίμακα που αντιστοιχεί στις διαστάσεις των επί μέρους μικροδομών (τ.ε. κόκκων, ινών, εγκλεισμάτων, στρώσεων κ.λπ.) τα υλικά αυτά είναι σαφώς ετερογενή. Η μετάβαση από τη κλίμακα όπου η μικροδομή είναι διακριτή στη κλίμακα όπου η μηχανικές ιδιότητες μπορούν να θεωρηθούν ως συνεχείς συναρτήσεις της θέσης δεν είναι ούτε προφανής ούτε τετριμμένη διαδικασία. Μια τέτοια διαδικασία βασίζεται εν πολλοίς σε κατάλληλες τοπολογικές παραδοχές ομοιότητας και σε αντίστοιχες μεθόδους ομογενοποιήσεως, όπως αυτές εφαρμόζονται σε κάποιες εργασίες του πρώτου εκ των

¹Vardoulakis I. Behavior of Granular Materials. In: Handbook of Materials Behavior Models (Jean Lemaitre Ed.) Chapter 11.4, Academic Press, 2001.

συγγραφέων και συνεργατών. Οι μελέτες του δεύτερου εκ των συγγραφέων και συνεργατών επικεντρώνονται κυρίως σε προβλήματα συγκέντρωσης τάσεων, θραύσης και διάδοσης ελαστικών κυμάτων σε ελαστικά υλικά με μικροδομή. Το κοινό πλαίσιο στις προσπάθειες αυτές της ερευνητικής ομάδας του Τομέα Μηχανικής Ε.Μ.Π. για την προσομοίωση των μικροδομικών υλικών είναι οι «Γενικευμένες Θεωρίες Συνεχούς Μέσου». Οι θεωρίες αυτές ενσωματώνουν τις κατάλληλες εσωτερικές κλίμακες μήκους λαμβάνοντας υπ' όψιν βαθμίδες παραμόρφωσης ανώτερης τάξης ή/και θεωρώντας πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας στις καταστατικές σχέσεις και τις εξισώσεις πεδίου. Ως συνέπεια, οι Γενικευμένες Θεωρίες έχουν εγγενώς 'μη-τοπικό' χαρακτήρα. Επίσης, χρησιμοποιούνται κατάλληλες κινηματικές ποσότητες που συνδέουν την μικρο- με την μακρο-κλίμακα, ενώ εισάγεται επιπροσθέτως η έννοια των διπολικών δυνάμεων και τάσεων, οι οποίες προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων του μικροδομικού υλικού.

Ένα γενικό συμπέρασμα όλης αυτής της ερευνητικής προσπάθειας είναι ότι οι δυναμικές και κινηματικές εξισώσεις των κλασικών θεωριών της Μηχανικής του Συνεχούς Μέσου δεν μπορούν να περιγράψουν επαρκώς την παραμόρφωση και την ένταση σε υλικά με μικροδομή. Για το λόγο αυτό άλλωστε η Μηχανική των υλικών με μικροδομή είναι ένα από τα βασικά προβλήματα αιχμής στη σύγχρονη Μηχανική. Αντίστοιχα κλασικές καταστατικές εξισώσεις που καλούνται να περιγράψουν την μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών, μη διαθέτοντας κάποιο χαρακτηριστικό μήκος που να εξαρτάται από τη μικροδομή, αδυνατούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, βάσει της κλασικής θεωρίας Ελαστικότητας οι προβλέψεις για τη συμπεριφορά και την ένταση των τάσεων στο άκρο ρωγμής σε μικροδομικά υλικά αποκλίνουν σημαντικά σε σχέση με πειραματικά δεδομένα. Επίσης, κατά τη διάδοση κυμάτων σε εφαρμογές μικρο-ηλεκτρονικής, οι συχνότητες των επιφανειακών κυμάτων είναι συνήθως της τάξης μερικών GHz και τα μήκη κύματος είναι αντιστοίχως της τάξης μερικών μm . Σε αυτές τις περιπτώσεις φαινόμενα διασποράς σε υψηλές συχνότητες μπορούν να ερμηνευτούν μόνο στα πλαίσια θεωριών που λαμβάνουν υπ' όψιν την μικροδομή του υλικού.

2 Δημοσιεύσεις (1997-2007)²

1. I. VARDOULAKIS and H.G. GEORGIADIS (1997) SH surface waves in a homogeneous gradient-elastic half-space with surface energy, *Journal of Elasticity* 47, 147-165.
2. G. EXADAKTYLOS and I. VARDOULAKIS (1998) Surface instability in gradient elasticity with surface energy, *International Journal of Solids and Structures* 35, 2251-2281.
3. H.G. GEORGIADIS and I. VARDOULAKIS (1998) Anti-plane shear Lamb's problem treated by gradient elasticity with surface energy, *Wave Motion* 28, 353-366.
4. I. VARDOULAKIS, G. EXADAKTYLOS and S. KOURKOULIS (1998) Bending of marble with intrinsic length scales: a gradient theory with surface energy and size effects, *Journal de Physique IV* 8, 399-406.
5. H.G. GEORGIADIS, I. VARDOULAKIS and G. LYKOTRAFITIS (2000) Torsional surface waves in a gradient-elastic half-space, *Wave Motion* 31, 333-348.

² Το παρακάτω δημοσιευμένο έργο έχει επί του παρόντος 226 αναφορές στο Web of Science.

6. A. ZERVOS, I. VARDOULAKIS, M. JEAN and P. LERAT (2000) Numerical investigation of granular interfaces kinematics, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 5, 305-324.
7. J. BARDET and I. VARDOULAKIS (2001) The asymmetry of stress in granular media, *International Journal of Solids and Structures* 38, 353-367.
8. A. ZERVOS, P. PAPANASTASIOU and I. VARDOULAKIS (2001) A finite element displacement formulation for gradient elastoplasticity, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 50, 1369-1388.
9. A. ZERVOS, P. PAPANASTASIOU and I. VARDOULAKIS (2001) Modelling of localization and scale effect in thick-walled cylinders with gradient elastoplasticity. *Int. J. Solids Structures*, 38, 5081-5095.
10. G. EXADAKTYLOS, I. VARDOULAKIS and S. KOURKOULIS (2001) Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams - ii. characterization of dionysos marble, *International Journal of Solids and Structures* 38, 4119-4145.
11. G. EXADAKTYLOS, I. VARDOULAKIS and S. KOURKOULIS (2001) Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams - i. technical theory, *International Journal of Solids and Structures* 38, 4091-4117.
12. A. ZERVOS, P. PAPANASTASIOU and I. VARDOULAKIS (2001) Modelling of localisation and scale effect in thick-walled cylinders with gradient elastoplasticity, *International Journal of Solids and Structures* 38, 5081-5095.
13. G. EXADAKTYLOS and I. VARDOULAKIS (2001) Microstructure in linear elasticity and scale effects: a reconsideration of basic rock mechanics and rock fracture mechanics, *Tectonophysics* 335, 81-109.
14. H.G. GEORGIADIS and E.G. VELGAKI (2003) High-frequency Rayleigh waves in materials with microstructure and couple-stress effects, *International Journal of Solids and Structures* 40, 2501-2520.
15. H.G. GEORGIADIS (2003) The mode III crack problem in microstructured solids governed by dipolar gradient elasticity: Static and dynamic analysis, *ASME Journal of Applied Mechanics* 70, 517-530.
16. H.G. GEORGIADIS, I. VARDOULAKIS and E.G. VELGAKI (2004) Dispersive Rayleigh-wave propagation in microstructured solids characterized by dipolar gradient elasticity, *Journal of Elasticity* 74, 17-45.
17. C.G. GRENTZELOU and H.G. GEORGIADIS (2005) Uniqueness for plane crack problems in dipolar gradient elasticity and in couple-stress elasticity, *International Journal of Solids and Structures* 42, 6226-6244.
18. F. ALONSO-MARROQUIN, S. LUDING, H.J. HERRMANN and I. VARDOULAKIS (2005). Role of anisotropy in the elastoplastic response of a polygonal packing. *Physical Review E*, 71 (5): art. no. 051304 Part 1
19. H.G. GEORGIADIS and C.G. GRENTZELOU (2006) Energy theorems and the J integral in dipolar gradient elasticity, *International Journal of Solids and Structures* 43, 5690-5712.
20. I. VARDOULAKIS and A. GIANNAKOPOULOS (2006) An example of double forces taken from structural analysis, *International Journal of Solids and Structures* 43, 4047-4062.
21. F. FROIIO, G. TOMASSETTI and I. VARDOULAKIS (2006) Mechanics of granular materials: the discrete and the continuum descriptions juxtaposed, *International Journal of Solids and Structures* 43, 7684-7720.
22. F. ALONSO-MARROQUIN, I. VARDOULAKIS, H.J. HERRMANN, D. WEATHERLEY, and P. MORA (2006). Effect of rolling on dissipation in fault gouges, *Physical Review E*, 74, 031306.

23. H.G. GEORGIADIS and D.S. ANAGNOSTOU (2007) Problems of the Flamant-Boussinesq and Kelvin type in dipolar gradient elasticity, *Journal of Elasticity*, in press.
24. C.G. GRENTZELOU and H.G. GEORGIADIS (2007) Balance laws and energy release rates for cracks in dipolar gradient elasticity, *International Journal of Solids and Structures*, in press.
25. P.A. GOURGIOTIS and H.G. GEORGIADIS (2007) Distributed dislocation approach for cracks in couple-stress elasticity: Shear Modes, *International Journal of Fracture*, in press.
26. I. STEFANOY, J. SULEM and I. VARDOULAKIS (2007) Three-dimensional Cosserat homogenization of masonry structures: Elasticity, *Acta Geotechnica*, in press.
27. F. FROOIO, A. ZERVOS, and I. VARDOULAKIS. (2007). On boundary value problems in linear 2nd-grade elasticity: theory and numerics. *International Journal of Solids and Structures*, submitted.
28. A. ZERVOS, S.-A. PAPANICOLOPOULOS and I. VARDOULAKIS (2007). Two finite element discretizations for gradient elasticity. *ASCE J. Eng. Mech.*, submitted.

3 Διδακτορικές Διατριβές

1. Α. Ζερβός, (2001) Μικροδομική προσέγγιση και υπολογιστική ανάλυση των φαινομένων εντοπισμού παραμόρφωσης και κλίμακας σε γεωυλικά με τροπική χαλάρωση: Θεωρία Ελαστοπλαστικότητας Δεύτερης Βαθμίδας. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π..
2. Χ. Γρέντζελου, (2006) *Ενεργειακά Θεωρήματα στις Θεωρίες Βαθμίδας και Εφαρμογές τους σε Προβλήματα Ρωγμών*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
3. Μ. Σιφναίου, (2007) *Ασυμπτωτική Ανάλυση Προβλημάτων Εγκοπών και Ρωγμών στα Πλαίσια της Διπολικής Ελαστικής Θεωρίας Βαθμίδας*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

4 Εν Εξελίξει Διδακτορικές Διατριβές

1. Δ. Αναγνώστου, Προβλήματα Συγκεντρωμένων Φορτίων στα Πλαίσια της Θεωρίας Βαθμίδας Ελαστικότητας για Μικροδομικά Υλικά. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
2. Ε. Γερολυμάτου, *Μικροπολικές θεωρίες συνεχούς μέσου με εφαρμογή σε προβλήματα ροής και παραμόρφωσης κοκκωδών υλικών*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π..
3. Π. Γουργιώτης, *Προβλήματα Ρωγμών και Εξαρμώσεων στα Πλαίσια Γενικευμένων Θεωριών Συνεχούς Μέσου*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
4. Ι. Νεοκλέους, *Διάδοση επιφανειακών κυμάτων σε υλικά με μικροδομή*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
5. Σ. Παπανικολόπουλος, *Αναλυτικές και Αριθμητικές Μέθοδοι σε Προβλήματα Επαφών Υλικών με Μικροδομή*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π..
6. Ι. Στεφάνου, *Μηχανική Προσομοίωση Κατασκευών από Δομικούς Λίθους με Χρήση Διακριτών Στοιχείων και Μηχανική τύπου Cosserat*. Τομέας Μηχανικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π..

5 Ερευνητικά Προγράμματα

1. Experimental, Theoretical and Numerical Modelling of Soil-Structure Interfaces³ . EEC SCIENCE Program (SC1-CT91-0659, 1991-1994).
2. Μηχανική Συμπεριφορά Συγχρόνων Κεραμικών Υλικών-Σχέση Χαλαρώσεως και Μικροδομής. Γ.Γ.Ε.Τ.-ΠΕΝΕΔ (1994-1996)
3. Αριθμητική Προσομοίωση Διατμητικών Διεπιφανειών Κατασκευής /Κοκκώδους Υλικού με την Θεωρία του Μικροπολικού Μέσου. Γ.Γ.Ε.Τ.- ΠΕΝΕΔ (1996-1998, Δρχ. 8,000,000.).
4. Characterization of Mechanical Properties and Damage of Natural Building Stones in Historical Monuments. EEC Standards Measurements and Testing Program (SMT4-CT96-2130) (1997-2000).
5. ΠΕΝΕΔ, ‘Υλικά με Μικροδομή: Καταστατική Προσομοίωση και Υπολογιστικές Τεχνικές’ (2000-2002) [ΓΤΕΤ]
6. Πρόγραμμα Βασικής Έρευνας ‘Θαλής’, ‘Μηχανική Υλικών με Μικροδομή’ (2002-2003) [ΕΜΠ, Επιτροπή Ερευνών]
7. Πρόγραμμα Βασικής Έρευνας ‘Πρωταγόρας’, ‘Μηχανική Θραύσεων και Επαφών για Υλικά με Μικροδομή’ (2003-2004) [ΕΜΠ, Επιτροπή Ερευνών].
8. EU RTN ‘*Degradation and Instabilities in Geomaterials with Application to Hazard Mitigation (DIGA)*’ (2002-2006) [EU 5th Fifth Framework Programme (HPRN-CT-2002-00220) (<http://diga.mechan.ntua.gr>)].
9. Πρόγραμμα Βασικής Έρευνας ‘Πυθαγόρας / ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ’, ‘Μικρομηχανική των Επαφών και της Διάχυσης της Υγρασίας σε Κοκκώδη Γεωυλικά’ (2005-2007) [ΥΠΕΠΘ].
10. Πρόγραμμα Βασικής Έρευνας ‘Λεύκιππος’, ‘Μηχανική Θραύσεων και Εξαρμώσεων για Υλικά με Μικροδομή’ (2005-2007) [ΕΜΠ, Επιτροπή Ερευνών].

³ Untereiner P., Lerat P., Vardoulakis I., Schlosser F., Delaure E. and Belmont G. (1993). Appareil de cisaillement simple annulaire, Rubrique Francaise.