

Μικροσκοπική Ανάλυση του Σχήματος των Κόκκων Άμμων

Microscopic Analysis of the Particle Shape of Sands

ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Β.Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π.
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το σχήμα των κόκκων δύο άμμων οι οποίες εμφανίζουν έντονα διαφορετική απόκριση σε στρεπτική διάτμηση αν και έχουν την ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση. Η αποτίμηση του σχήματος των κόκκων στις τρεις διαστάσεις γίνεται με διαφορετικές μεθόδους και διατυπώνονται οι δυνατότητες και οι περιορισμοί των μεθόδων. Φαίνεται ότι οι κόκκοι της μίας άμμου έχουν στρογγυλεμένες επιφάνειες ενώ της άλλης εμφανίζουν γωνιώδεις απολήξεις στην επιφάνειά τους που κατά πάσα πιθανότητα ευθύνονται για τη διαφορετικότητα στη συμπεριφορά των άμμων.

ABSTRACT: In this paper the shape of the particles of two sands exhibiting dramatically different response to torsional loading is examined. The sands have identical gradations. The three dimensional shape of the particles is investigated, microscopy being used to provide accurate and quantitative data and to give a better idea of the influence of the particle shape on subsequent sand behaviour. It appears that one sand consists of rounded particles and the other of angular particles and this fact could account for the differences observed in the sands' behaviour.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

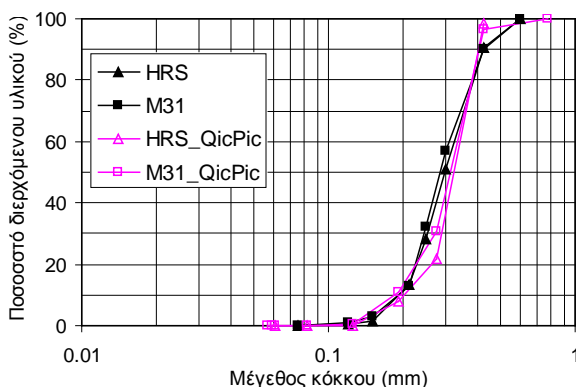
Πρόσφατα έχει αναγνωριστεί ότι το σχήμα των κόκκων είναι μια σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει την μηχανική συμπεριφορά της άμμου (Cho et al., 2006, Georgiannou, 2006). Η σύγκριση κόκκων διαφορετικού σχήματος μεταξύ τους δεν είναι εύκολη. Ένα πρωτόλειο διάγραμμα κατάταξης με βάση το σχήμα των κόκκων είχε προταθεί από τον Powers (1953). Ο χαρακτηρισμός μίας άμμου με ανάλογα διαγράμματα ενέχει τα εξής προβλήματα: αφενός είναι σπάνιο να βρεθούν άμμοι με κόκκους μίας κατηγορίας αλλά συνήθως εμφανίζεται ένας συνδυασμός σχημάτων και αφετέρου η δισδιάστατη απεικόνιση του κόκκου δεν είναι αντιπροσωπευτική. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δίνει την ολοκληρωμένη εικόνα ενός ή μερικών κόκκων όμως για την κατάταξη μίας άμμου με βάση το σχήμα των κόκκων της απαιτείται να γίνει συστηματική καταγραφή των

κόκκων στο σύνολό τους και στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων για να έχουμε μία ποσοτική εκτίμηση του σχήματός τους. Στην παρούσα εργασία διαφορετικές τεχνικές μικροσκοπικής ανάλυσης, πλέον του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, (συσσκευή QicPic και Interferometer) χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί το σχήμα των κόκκων δύο άμμων οι οποίες έχουν την ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση όμως, εμφανίζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά όταν υποβάλλονται σε στρεπτική διάτμηση κάτω από τις ίδιες εργαστηριακές συνθήκες. Η αποτίμηση του σχήματος των κόκκων στις τρεις διαστάσεις γίνεται με διαφορετικές μεθόδους των οποίων εκτιμώνται οι δυνατότητες και διατυπώνονται οι περιορισμοί. Φαίνεται ότι η παρουσία στρογγυλεμένων ή γωνιωδών απολήξεων στην επιφάνεια των κόκκων της άμμου συνδέεται άμεσα με τη μηχανική της συμπεριφορά.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Οι δοκιμές στρεπτικής διάτμησης έγιναν στη συσκευή στρέψης κοίλου δοκιμίου (Georgiannou et al., 2008) και τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με την ίδια μέθοδο της “εμβάπτισης σε νερό” σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνουν οι Bishop & Henkel (1957) και υποβλήθηκαν στις ίδιες συνθήκες στερεοποίησης και τεχνικές φόρτισης σε διάτμηση όπως αυτές περιγράφονται από τους Georgiannou et al. (2008) και Tsomokos & Georgiannou (2009).

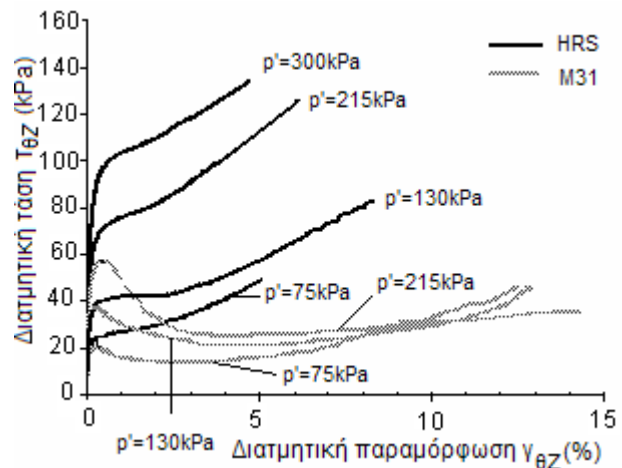
Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν δύο λεπτόκοκκες και ομοιόμορφες άμμοι, η άμμος Ham River (HRS) και η άμμος M31. Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων των άμμων είναι ίσος με $e_{min}=0.526$, 0.528 και $e_{max}=0.870$, αντίστοιχα, ενώ το αδιάστατο ειδικό βάρος στερεών κόκκων $G_s=2.66$, 2.65 αντίστοιχα. Οι δύο άμμοι έχουν την ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Οι καμπύλες που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 1 και ονομάζονται QicPic θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμων.
Figure 1. Grain size distribution curves for sands.

Οι δείκτες πόρων, e_i , των δοκιμίων μετά από την ισότροπη στερεοποίηση σε διάφορες μέσες ενεργές τάσεις p'_c (75, 130, 215 και 300kPa) και πριν από τη διάτμηση έλαβαν τιμές από 0.729 έως 0.735 για την άμμο HRS και από 0.731 έως 0.733 για την άμμο M31.

Αν και οι άμμοι έχουν την ίδια κοκκομετρία, και τα δοκίμια υποβάλλονται στις ίδιες εργαστηριακές συνθήκες και έχουν την ίδια πυκνότητα η απόκρισή τους σε στρεπτική διάτμηση υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης είναι διαφορετική όπως φαίνεται



Σχήμα 2. Δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Καμπύλες διατμητικών τάσεων ως προς τις διατμητικές παραμορφώσεις.

Figure 2. Undrained torsional hollow cylinder tests. Shear stress against shear strain curves.

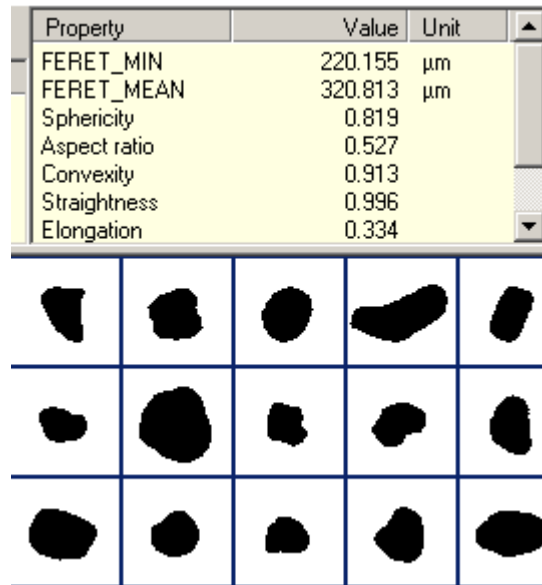
στο Σχήμα 2 όπου απεικονίζονται οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων. Η άμμος M31 δείχνει ασταθή συμπεριφορά με μείωση της διατμητικής τάσης μετά μια μέγιστη τιμή ενώ αντίθετα η άμμος HRS δείχνει συνεχή αύξηση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση.

Η εκτίμηση του σχήματος των κόκκων των δύο άμμων, ως πιθανής αιτίας της παρατηρούμενης συμπεριφοράς, έγινε με αναλύσεις μέσω των συσκευών QicPic και Interferometer του Imperial College. Η συσκευή QicPic βασίζει τη λειτουργία της στην ανάλυση κόκκων μεγέθους από 1μm έως 20mm. Επιτυγχάνει τη δυναμική ανάλυση εικόνων εξετάζοντας τη ροή κινούμενων κόκκων. Έτσι επιτυγχάνεται η ανάλυση ικανού αριθμού κόκκων, οι κόκκοι εξετάζονται σε τυχαίες διευθύνσεις και η πιθανότητα επικάλυψης των κόκκων μειώνεται. Η μονάδα επεξεργασίας του δοκιμίου απομακρύνει τους κόκκους μεταξύ τους και δημιουργεί ροή των κόκκων μέσα από ακτίνες Laser. Η αποτύπωση των κόκκων γίνεται με συχνότητα 500 λήψεων ανά δευτερόλεπτο επιτρέποντας την καταγραφή μεγάλου αριθμού κόκκων σε μικρή χρονική διάρκεια. Η συσκευή διαθέτει λογισμικό για την καταγραφή και ανάλυση των μετρήσεων που βασίζονται στην εικόνα του κάθε κόκκου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Από τις καταγραφές γίνεται η αποτύπωση του μεγέθους και σχήματος των κόκκων και προσδιορίζεται η

κοκκομετρική σύσταση της άμμου και σειρά άλλων παραμέτρων.

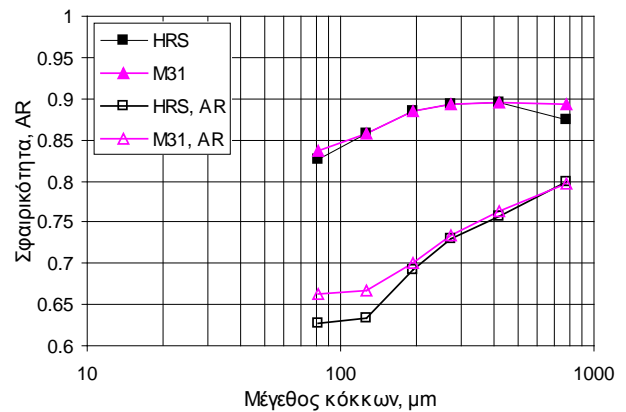
Το λογισμικό περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρους έκφρασης του σχήματος των κόκκων. Η πρώτη παράμετρος EQPC αναφέρεται στη διάμετρο του ισοδύναμου κύκλου με την ίδια επιφάνεια όπως και η εικόνα του κόκκου. Επίσης, ορίζονται διάφορες διάμετροι Feret. Η χρήση της διαμέτρου Feret-minimum για τον προσδιορισμό της κοκκομετρίας δίνει για τα περισσότερα εδάφη τα πλησιέστερα αποτελέσματα με την κλασική ανάλυση μέσω κοσκίνων και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Πρόκειται για την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο παραλλήλων ευθειών που εφάπτονται σε απέναντι πλευρές στη δισδιάστατη εικόνα του κόκκου. Στο Σχήμα 1 φαίνονται οι κοκκομετρικές αναλύσεις των άμμων της παρούσας εργασίας αφενός με την κλασική μέθοδο και αφετέρου με χρήση της συσκευής QicPic. Για την κάθε μέθοδο οι κοκκομετρικές καμπύλες των δύο άμμων συμπίπτουν ενώ η κλασική μέθοδος φαίνεται να έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση της καμπύλης προς τα αριστερά υποεκτιμώντας το μέγεθος των κόκκων.

Μία άλλη παράμετρος που υπολογίζεται είναι ο λόγος AR (aspect ratio) της διαμέτρου Feret-minimum προς τη Feret-maximum όπως επίσης και η παράμετρος της σφαιρικότητας των κόκκων, S, η οποία ισούται με τον λόγο της περιμέτρου του ισοδύναμου κύκλου, PEQPC, προς την πραγματική περίμετρο, Pr. Η σφαιρικότητα του κόκκου σύμφωνα με τον ανωτέρω ορισμό ισούται με την τετραγωνική ρίζα της κυκλικότητας του κόκκου όπως αυτή ορίζεται από τον κανονισμό International Standard ISO/DIS 2006 (Cavarretta et al., 2009).



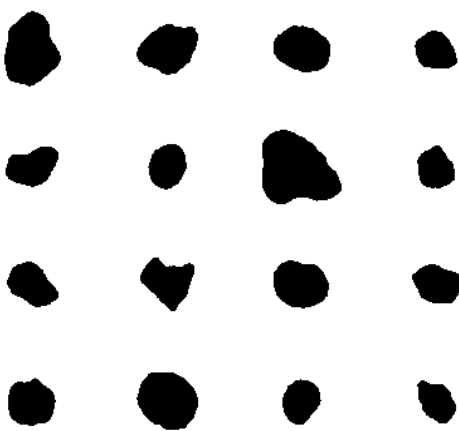
Σχήμα 3. Απεικόνιση κόκκων HRS στη συσκευή QicPic.

Figure 3. Particle gallery_QicPic, HRS.

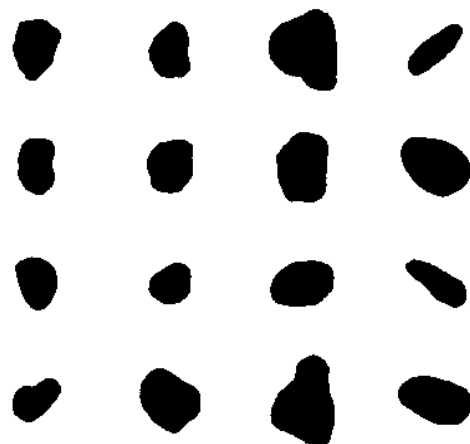


Σχήμα 4. Σφαιρικότητα και λόγος AR κόκκων.

Figure 4. Particle sphericity and aspect ratio.



(α)



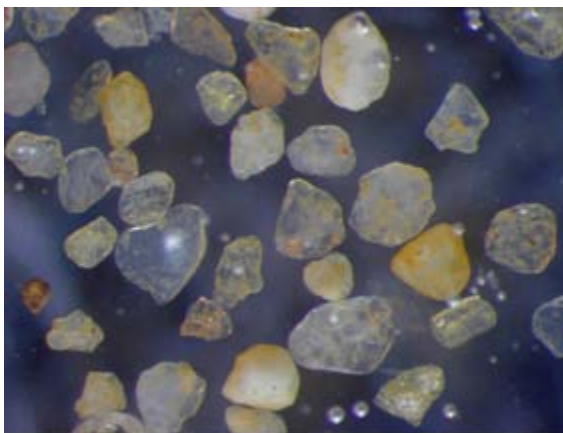
(β)

Σχήμα 5. Τυπική δισδιάστατη απεικόνιση κόκκων άμμου (α) HRS και (β) M31.

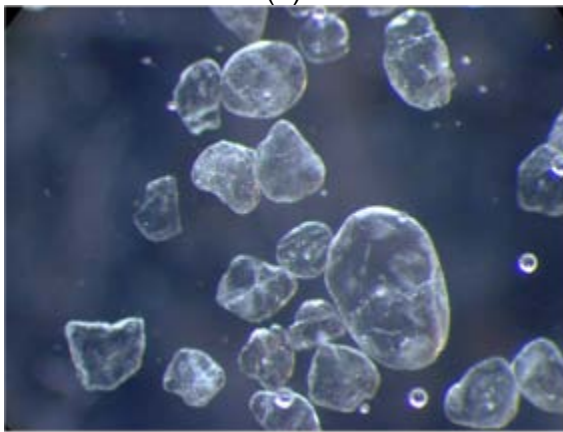
Figure 5. Examples of 2D particle shapes for (a) HRS and (b) M31.

Στα Σχήματα 4 και 5 οι δύο άμμοι συγκρίνονται ως προς την σφαιρικότητα και τον λόγο AR των κόκκων και την δισδιάστατη απεικόνιση μερικών από τους κόκκους. Αν και η άμμος HRS φαίνεται να έχει περισσότερο ακανόνιστους και γωνιώδεις κόκκους (Σχήμα 5) η διαφορά μεταξύ τους δεν είναι ευκρινής. Ομοίως, η διαφορά στην σφαιρικότητα και τον λόγο AR των κόκκων δεν είναι σημαντική (Σχήμα 4).

Όμως, η εικόνα των κόκκων κάτω από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο είναι διαφορετική. Στο Σχήμα 6(α) οι κόκκοι της άμμου HRS φαίνεται να έχουν γωνιώδεις απολήξεις σε σχέση με τους περισσότερο στρογγυλευμένους κόκκους της άμμου M31 (Σχήμα 6(β)).



(α)

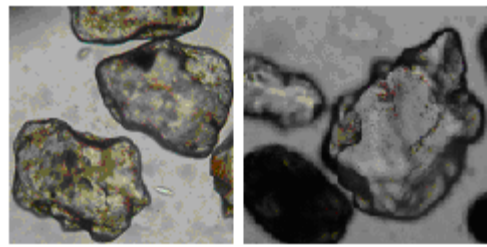


(β)

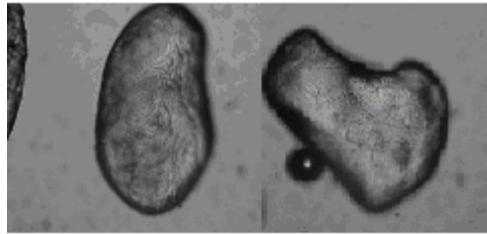
Σχήμα 6. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (α) Άμμος HRS; (β) Άμμος M31.

Figure 6. Visual inspection under the electron scanning microscope; (a) HRS; (b) M31 sand.

Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στο Σχήμα 7 οι κόκκοι της άμμου HRS δείχνουν γωνιακές απολήξεις στην πολυεπίπεδη επιφάνειά τους σε αντίθεση με την άμμο M31 που δείχνει μία εντελώς στρογγυλευμένη επιφάνεια.



(α)



(β)

Σχήμα 7. Εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (συντελεστής μεγέθυνσης x100); (α) Άμμος HRS; (β) Άμμος M31.

Figure 7. Visual inspection under the electron scanning microscope (magnification factor x100); (a) HRS; (b) M31 sand.

Διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη απεικόνιση κόκκων άμμου (Content & Ville, 1995, Smith, 1999). Η συσκευή Interferometer χρησιμοποιείται για την ανάλυση της επιφάνειας του κόκκου. Μία τρισδιάστατη εικόνα του κόκκου μετατρέπεται σε ένα χάρτη υψομέτρων (elevation map). Από μία απεικόνιση το ύψος κάθε εικονοστοιχείου προσδιορίζεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα με ακρίβεια 3nm (Fogale, 2005). Στην παρούσα εργασία για τον περιορισμό του χρόνου επεξεργασίας η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν 15.7nm.

Διάφορες παράμετροι υπολογίζονται στατιστικά σε μία επιφάνεια η προβολή της οποίας στην παρούσα εργασία ήταν 10μm*10μm. Οι κύριες παράμετροι που προσδιορίστηκαν ήταν: α) S_a (Εξίσωση 1) ίση με τον μέσο όρο των αποκλίσεων από το μέσο ύψος και β) S_q (Εξίσωση 2) ίση με την τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των αποκλίσεων από το μέσο ύψος (Sacerdotti et al., 2000).

$$S_a = \frac{1}{m * n} \sum_{ij} |Z_{ij}| \quad (1)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{m * n} \sum_{ij} Z_{ij}^2} \quad (2)$$

όπου m και n είναι ο αριθμός των σημείων στις διαστάσεις x και y αντίστοιχα και Z είναι η

απόκλιση σε κάθε σημείο από την τιμή του μέσου ύψους.

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του μεγέθους του κόκκου ή του σχήματός του γίνεται μία διόρθωση στις τιμές των S_a και S_q οι οποίες υπολογίζονται σχετικά ως προς μία λεία επιφάνεια, αντί της επιφάνειας προβολής ($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) που προαναφέρθηκε, θεωρώντας ένα μέσο ύψος λόγω σχήματος της λείας επιφάνειας $5.02\mu\text{m}$.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των τιμών S_a , S_q μετά την επεξεργασία που απομακρύνει την επιρροή του σχήματος του κόκκου φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τιμές παραμέτρων S_a , S_q
Table 1. Statistical parameters S_a , S_q

	S_a (nm)	S_q (nm)
HRS	200	298
M31	30	41

Οι τιμές των παραμέτρων S_a και S_q για την άμμο M31 είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για την άμμο HRS γεγονός που αντανάκλα την στρογγυλευμένη και λεία επιφάνεια των κόκκων της άμμου M31 σε αντίθεση με τις γωνιώδεις επιφάνειες της άμμου HRS, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μικροσκοπική ανάλυση του σχήματος των κόκκων δύο άμμων (HRS και M31) οι οποίες έχουν την ίδια κοκκομετρία αλλά διαφορετική απόκριση σε στρεπτική διάτμηση έδειξε ότι:

- Στην ανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και τη συσκευή interferometer η άμμος HRS εμφανίζει κόκκους με γωνιώδεις απολήξεις στην επιφάνειά τους ενώ η άμμος M31 εμφανίζει κόκκους με στρογγυλευμένη επιφάνεια.
- Στην ανάλυση στη συσκευή QicPic οι δύο άμμοι εμφανίζουν κόκκους με παρόμοια δισδιάστατη εικόνα χωρίς να είναι δυνατή η αποτύπωση της επιφάνειάς τους. Επίσης, η κοκκομετρική ανάλυση των δύο άμμων στην ίδια συσκευή επιβεβαίωσε την ομοιότητά τους ως προς το μέγεθος των κόκκων.

Φαίνεται ότι καθώς οι εργαστηριακές συνθήκες προετοιμασίας και φόρτισης των δύο άμμων ήταν κοινές η διαφορετική τους απόκριση σε στρεπτική διάτμηση μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό σχήμα των κόκκων τους.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bishop, A. W., and Henkel, D. J. (1957), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Ed. Arnold, London, p. 190.
- Cavarretta, I., O'Sullivan, K. and Coop, M.R. (2009), "Applying 2D shape analysis techniques to regular materials with 3D particle geometries", Powders and grains, Proc. of Int. Conf. on Micromechanics of Granular Media, Nakagawa, M. & Luding, S. (Eds). American Institute of Physics, pp. 833-836.
- Cho, G., Dodds, J., and Santamarina, J. C. 2006, "Particle shape effects on packing density, stiffness and strength: natural and crushed sands", Journal of Geotech. and Geoenviron. Engrg, ASCE, Vol. 132, No 5, pp. 591-602.
- Content, P. and Ville, J.F. (1995), "Surfscan 3D_An industrial 3D surface texture characterisation instrument", Int. J. Mech. Tools Manuf. Vol. 35, pp. 151-156.
- Fogale (2005), "Fogale nanotech user manual", Version 1.5.
- Georgiannou, V.N. (2006), "The undrained response of sands with additions of particles of various shapes and sizes", Geotechnique, Vol. 56, No. 9, pp. 639-649.
- Georgiannou, V.N., Tsomokos, A., and Stavrou, K. 2008, "Monotonic and cyclic behaviour of sand under torsional loading", Geotechnique, Vol. 58, No. 2, pp. 111-122.
- Georgiannou, V.N., and Tsomokos, A. (2008), "Comparison of two fine sands under torsional loading", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, No. 12, pp. 1659-1672.
- Powers, M.C. (1953), "A new roundness scale for sedimentary particles", Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 23, No. 2, pp. 117-119.
- Sacerdotti, F., Griffiths, B., Benati, F. and Kang, H. (2000), "The variability of functional and amplitude three-dimensional roughness parameters for electron-beam and electro-discharged textured surfaces", Meas. Sci. Technol. Vol. 11, pp. 171-177.
- Smith, M.I. (1999), "The analysis of surface texture using photometric stereo acquisition and gradient space domain mapping", Image Vis. Comput. Vol. 17, pp. 1009-1019.
- Tsomokos, A. and Georgiannou, V.N. (2009), "The effect of sand angularity on the undrained response of fine sands", Canadian Geotechnical Journal, (δεκτό προς δημοσίευση).

