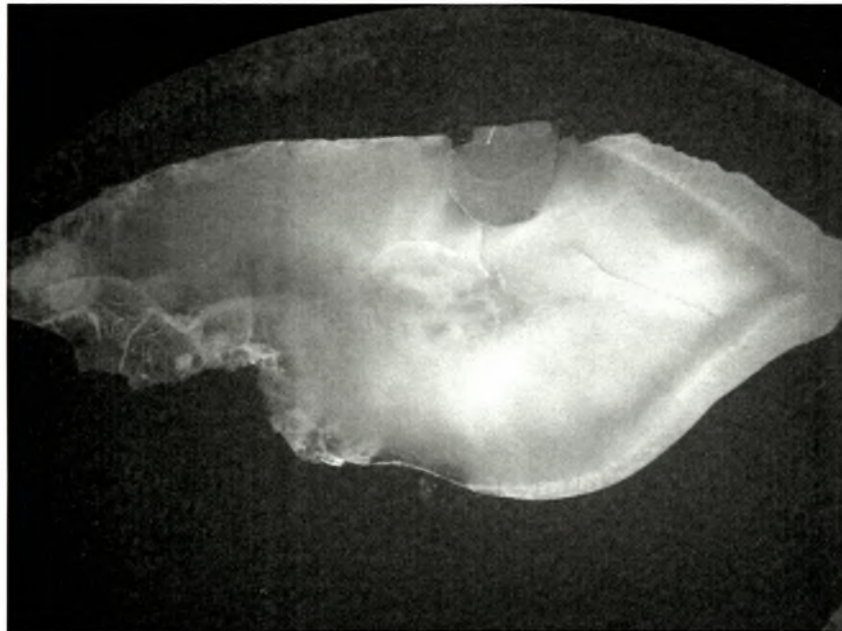




Διπλωματική Εργασία

**Μετρήσεις της μικροσκληρότητας και του μέτρου ελαστικότητας στο ανθρώπινο σμάλτο και στην οδοντίνη με την χρήση τεχνικής με διείσδυση**



υπό

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΑΡΑΣΤΟΓΙΑΝΝΗ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7544/1  
Ημερ. Εισ.: 05-11-2009  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2009  
ΚΑΡ

© 2009 Παναγιώτα Καραστογιάννη

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης  
Δρ. Μεταλλουργός μηχανικός, εξειδικευμένη τεχνική υποστήριξη τμήματος,  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω πολλές ευχαριστίες στην Δρ. Άννα Ζερβάκη, μέλος του εργαστηρίου υλικών για την πολύτιμη βοήθεια της, την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές της. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Δρ. Αλέξιο Κερμανίδη και Δρ. Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. Γιαννακόπουλο, καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για το ιδιαίτερα χρήσιμο υλικό που μου παραχώρησε. Ευχαριστώ τις συναδέλφους και φίλες Γεωργία, Πολύμνια και Αναστασία για την βοήθεια και την ηθική υποστήριξη τους. Επίσης, ευχαριστώ την Αλέξανδρο για την κατανόησή του και την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε Πάνω απ' όλα, ευχαριστώ την οικογένειά μου που ήταν πάντα δίπλα μου και με στήριζε σε κάθε μου προσπάθεια με ιδιαίτερη αγάπη και υπομονή.

Παναγιώτα Καραστογιάννη

# Μετρήσεις της μικροσκληρότητας και του μέτρου ελαστικότητας στο ανθρώπινο σμάλτο και στην οδοντίνη με την χρήση τεχνικής με διείσδυση

ΚΑΡΑΣΤΟΓΙΑΝΝΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Περίληψη

Οι συμβατικές ισοστατικές και δυναμικές μέθοδοι δοκιμών συνοδεύονται από αριθμό περιορισμών κατά τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σμάλτου και της οδοντίνης. Αυτό οφείλεται στην πολύπλοκη δομή των δοντιών και στο ιδιαίτερα μικρό μέγεθος των δοκιμίων.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται τεχνική με διείσδυση με σκοπό τον υπολογισμό της σκληρότητας και του μέτρου ελαστικότητας στο ανθρώπινο σμάλτο και την οδοντίνη. Υπολογίζονται οι διαγώνιοι των αποτυπωμάτων από την μικροσκληρομέτρηση και με τη βοήθεια αυτών καταλήγουμε στον υπολογισμό των παραπάνω μηχανικών ιδιοτήτων για κάθε ίχνος.

Κάποιες από τις τιμές στις οποίες καταλήξαμε παρουσιάζουν αποκλίσεις από τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών γι' αυτό γίνεται προσπάθεια ανάδειξης των προβλημάτων που εντοπίστηκαν και των αιτιών από τις οποίες προήλθαν. Ωστόσο η πλειοψηφία των μετρήσεων ήταν συμβατή με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή-Στόχος εργασίας .....</b>	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....</b>	<b>2</b>
2.1. Ανατομία των ανθρώπινων δοντιών .....	2
2.1.1. Το σμάλτο των ανθρώπινων δοντιών και οι μηχανικές του ιδιότητες .....	4
2.1.2. Η οδοντίνη των ανθρώπινων δοντιών και οι μηχανικές της ιδιότητες .....	5
2.2. Μηχανικές ιδιότητες δοντιών .....	6
2.3. Διεσδυτής Κnoop .....	10
2.3.1. Γενικά.....	10
2.3.2. Υπολογισμός του ίχνους.....	12
2.3.3. Καθορισμός της τιμής σκληρότητας.....	12
<b>Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία .....</b>	<b>13</b>
3.1. Μεθοδολογία.....	13
3.1.1. Προετοιμασία δοκιμίων.....	13
3.1.2. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε .....	14
3.1.3. Μεθοδολογία Μετρήσεων .....	15
<b>Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα .....</b>	<b>16</b>
4.1. Δομή δοντιών.....	16
4.2. Profiles μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers και Κnoop. ....	18
4.3. Υπολογισμός μικροσκληρότητας, μέτρου ελαστικότητας (1 <sup>ο</sup> profil) .....	19
4.4. Αποτελέσματα από Προφίλ 2 μικροσκληρομέτρησης κατά Κnoop .....	38
4.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων από το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> Profile .....	49
4.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων με βιβλιογραφία (Meredith).....	52
<b>Κεφάλαιο 5. Συζήτηση αποτελεσμάτων .....</b>	<b>57</b>
<b>Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα .....</b>	<b>59</b>
<b>Κεφάλαιο 7. Προτεινόμενη έρευνα.....</b>	<b>60</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>61</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης.....	31
Πίνακας 4.2. Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας για $\alpha_1=0,34, 0,45, 1,5$ . .....	35
Πίνακας 4.3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης.....	44
Πίνακας 4.4. Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας για $\alpha_1=0,34, 0,45, 1,5$ .....	47
Πίνακας 4.5. Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοντιού) στο σμάλτο όπως αυτές υπολογίσθηκαν από τον Meredith .....	53
Πίνακας 4.6. Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοντιού) στο σμάλτο .....	54
Πίνακας 4.7 Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την αμυλοδοντική συμβολή) στην οδοντίνη όπως αυτές υπολογίσθηκαν από τον Meredith .....	55
Πίνακας 4.8 Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την αμυλοδοντική συμβολή) στην οδοντίνη .....	56



# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Ανατομία του Ανθρώπινου δοντιού [5] .....	3
Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της μικροδομής του σμάλτου [4] .....	4
Σχήμα 2.3 Ίχνος από διεισδυτή Κnoop, όπου φαίνονται οι διαγώνιοι b και a σε κατάσταση πλήρους φόρτισης [2] .....	7
Σχήμα 2.4 Ίχνος από διεισδυτή Κnoop, όπου φαίνονται οι διαγώνιοι b' και a' μετά από πλήρη επαναφορά .....	8
Σχήμα 2.5 Διακύμανση διαστάσεων των υπολειμματικών αποτυπωμάτων κατά Κnoop ως προς τον λόγο σκληρότητας προς μέτρο ελαστικότητας (H/E). [2] .....	8
Σχήμα 2.6 Διεισδυτής Κnoop, φαίνονται οι γωνίες ανάμεσα στα άκρα του σημείου σε σχήμα πυραμίδας. Οι αναλογίες: μήκος:πλάτος=7.1:1 και μήκος :βάθος=30:1. ....	11
Σχήμα 4.1 Φωτογραφία τομής δοντιού από στερεοσκόπιο. ....	16
Σχήμα 4.2 Φωτογραφία της μικροδομής της οδοντίνης.....	17
Σχήμα 4.3 Profile μικροσκληρομέτρησης Vickers σε ανθρώπινο δόντι .....	18
Σχήμα 4.4 Profiles μικροσκληρομέτρησης Κnoop σε ανθρώπινο δόντι.....	19
Σχήμα 4.5 Φωτογραφία (1000x) από το πρώτο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile) .....	20
Σχήμα 4.6 Φωτογραφία (1000x) από το δεύτερο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile).....	20
Σχήμα 4.7 Φωτογραφία (1000x) από το τρίτο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile) .....	21
Σχήμα 4.8 Φωτογραφία (1000x) από το τέταρτο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile).....	21
Σχήμα 4.9 Φωτογραφία (1000x) από το πέμπτο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile).....	22
Σχήμα 4.10 Φωτογραφία (1000x) από το έκτο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile).....	22
Σχήμα 4.11 Φωτογραφία (1000x) από το έβδομο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile) .....	23
Σχήμα 4.12 Φωτογραφία (1000x) από το όγδοο ίχνος στο σμάλτο (1 <sup>ο</sup> profile).....	23
Σχήμα 4.13 Φωτογραφία (1000x) από το πρώτο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	24
Σχήμα 4.14 Φωτογραφία (1000x) από το δεύτερο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	24
Σχήμα 4.15 Φωτογραφία (1000x) από το τρίτο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile).....	25
Σχήμα 4.16 Φωτογραφία (1000x) από το τέταρτο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	25
Σχήμα 4.17 Φωτογραφία (1000x) από το πέμπτο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile).....	26
Σχήμα 4.18 Φωτογραφία (1000x) από το έκτο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile).....	26
Σχήμα 4.19 Φωτογραφία (1000x) από το έβδομο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	27
Σχήμα 4.20 Φωτογραφία (1000x) από το όγδοο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile).....	27
Σχήμα 4.21 Φωτογραφία (1000x) από το ένατο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	28
Σχήμα 4.22 Φωτογραφία (1000x) από το δέκατο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile).....	28
Σχήμα 4.23 Φωτογραφία (1000x) από το ενδέκατο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	29
Σχήμα 4.24 Φωτογραφία (1000x) από το δωδέκατο ίχνος στην οδοντίνη (1 <sup>ο</sup> profile) .....	29
Σχήμα 4.25 Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στο σμάλτο σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια του δοντιού .....	33
Σχήμα 4.26 Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στην οδοντίνη σε σχέση με την απόσταση από την αμυλοδοντική συμβολή .....	34
Σχήμα 4.27 Τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε για $a_1=0,34$ , $a_1=0,45$ και $a_1=1,5$ συναρτήσει της απόστασης των ιχνών από την επιφάνεια του δοντιού. ....	37
Σχήμα 4.28 Φωτογραφία (500x) από το πρώτο και δεύτερο ίχνος στο σμάλτο (2 <sup>ο</sup> profile) .....	38
Σχήμα 4.29 Φωτογραφία (500x) από το τρίτο και τέταρτο ίχνος στο σμάλτο (2 <sup>ο</sup> profile).....	39
Σχήμα 4.30 Φωτογραφία (500x) από το πέμπτο και έκτο ίχνος στο σμάλτο (2 <sup>ο</sup> profile).....	39
Σχήμα 4.31 Φωτογραφία (500x) από το έβδομο και όγδοο ίχνος στο σμάλτο (2 <sup>ο</sup> profile).....	40
Σχήμα 4.32 Φωτογραφία (500x) από το ένατο και δέκατο ίχνος στο σμάλτο (2 <sup>ο</sup> profile).....	40
Σχήμα 4.33 Φωτογραφία (500x) από δέκατο ίχνος στο σμάλτο και πρώτο ίχνος στην οδοντίνη (2 <sup>ο</sup> profile).....	41
Σχήμα 4.34 Φωτογραφία (500x) από πρώτο και δεύτερο ίχνος στην οδοντίνη (2 <sup>ο</sup> profile) .....	41
Σχήμα 4.35 Φωτογραφία (500x) από τρίτο και τέταρτο ίχνος στην οδοντίνη (2 <sup>ο</sup> profile).....	42
Σχήμα 4.36 Φωτογραφία (500x) από πέμπτο και έκτο ίχνος στην οδοντίνη (2 <sup>ο</sup> profile). ....	42
Σχήμα 4.37 Φωτογραφία (500x) από έβδομο και όγδοο ίχνος στην οδοντίνη (2 <sup>ο</sup> profile). ....	43
Σχήμα 4.38 Φωτογραφία (500x) από ένατο και δέκατο ίχνος στην οδοντίνη (2 <sup>ο</sup> profile) .....	43
Σχήμα 4.39 Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στο σμάλτο σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια του δοντιού.....	46
Σχήμα 4.40 Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στην οδοντίνη σε σχέση με την απόσταση από την αμυλοδοντική συμβολή .....	46

Σχήμα 4.41 Τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε για $\alpha_1=0,34$ , $\alpha_1=0,45$ και $\alpha_1=1,5$ συναρτήσει της απόστασης των ιχνών από την επιφάνεια του δοντιού .....	48
Σχήμα 4.42 Σύγκριση των τιμών σκληρότητας Knoop για Προφίλ 1 και 2 στην περιοχή του σμάλτου.....	49
Σχήμα 4.43 Σύγκριση των τιμών σκληρότητας Knoop για Προφίλ 1 και 2 στην περιοχή της οδοντίνης.....	50
Σχήμα 4.44 Σύγκριση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E για Προφίλ 1 και 2 με $\alpha_1=0,34$ .....	51
Σχήμα 4.45 Σύγκριση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E για Προφίλ 1 και 2 με $\alpha_1=0,45$ .....	51
Σχήμα 4.46 Σύγκριση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E για Προφίλ 1 και 2 με $\alpha_1=1,5$ .....	52

# ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΔΟΝΤΙΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ  
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΜΑΛΤΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΟΔΟΝΤΙΝΗ ΜΕ  
ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ

## Κεφάλαιο 1.Εισαγωγή-Στόχος εργασίας

Η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και των ιδιαίτερων μικροσκοπικών χαρακτηριστικών των ανθρώπινων δοντιών είναι πολύ χρήσιμη στην προσπάθεια κατανόησης της συμπεριφοράς τους σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Οι πιο σημαντικές από τις ιδιότητες αυτές είναι η μικροσκληρότητα, η αντοχή καθώς και το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus).

Οι συμβατικές ισοστατικές και δυναμικές μέθοδοι δοκιμών παρουσιάζουν περιορισμούς όταν χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σμάλτου και της οδοντίνης. Αυτοί οφείλονται στην πολύπλοκη δομή των ανθρώπινων δοντιών και στο μικρό μέγεθος των δοκιμίων.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας ανθρώπινων δοντιών χρησιμοποιώντας τεχνική μικροσκληρομετρήσεων Κnoop στις διακριτές περιοχές (σμάλτο και οδοντίνη) του δοντιού.

Χρησιμοποιήθηκαν δόντια από ενήλικες τα οποία προέκυψαν από οδοντιατρική εξαγωγή. Η μικροδομή τους μελετήθηκε σε εγκάρσιες τομές με Οπτική Μικροσκοπία. Εφαρμόστηκε επίσης μεθοδολογία που επιτρέπει τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας σε συγκεκριμένες περιοχές του δοντιού λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές μικροσκληρότητας, την αρχική γεωμετρία του διεισδυτή Κnoop καθώς και τα χαρακτηριστικά της προβολής του αποτυπώματος μετά από κάθε μέτρηση.

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Ανατομία των ανθρώπινων δοντιών

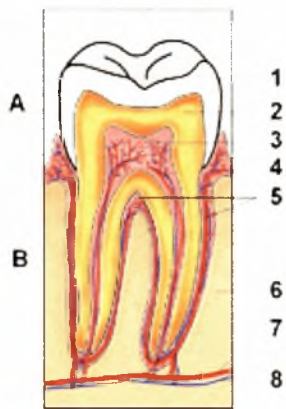
Το δόντι αποτελεί όργανο του γαστρεντερικού συστήματος που βρίσκεται μέσα στην στοματική κοιλότητα και στηρίζεται στο οστό των γνάθων. Τα δόντια οργανώνονται σε στοίχους, τις οδοντοστοιχίες, και έτσι έχουμε την άνω και κάτω οδοντοστοιχία για την άνω και κάτω γνάθο αντίστοιχα. [5]

Η ανατολή μιας σειράς δοντιών από το οστό των γνάθων ονομάζεται οδοντοφυΐα. Στον άνθρωπο υπάρχουν δύο οδοντοφυΐες, η νεογιλή και η μόνιμη. Η νεογιλή ή παιδική οδοντοφυΐα αποτελείται από 20 δόντια από τα οποία το πρώτο εμφανίζεται στην στοματική κοιλότητα τον έβδομο μήνα της ζωής και το τελευταίο αποπίπτει (πέφτει) στην ηλικία των 12 ετών περίπου. Τα νεογιλά δόντια αρχίζουν να αντικαθίστανται από τα μόνιμα στην ηλικία των 6 περίπου ετών. Η μόνιμη οδοντοφυΐα αποτελείται από 32 δόντια και ολοκληρώνεται στην ηλικία των 18 ετών με την ανατολή και του τελευταίου μόνιμου δοντιού, του σωφρονιστήρα ή φρονιμίτη. [5]

Τα δόντια ανάλογα με την εξωτερική τους μορφολογία αλλά και την θέση τους στις γνάθους διακρίνονται στις εξής ομάδες:

1. Τομείς (κεντρικός και πλάγιος)
2. Κυνόδοντες
3. Προγόμφιοι (1<sup>ος</sup> και 2<sup>ος</sup>)
4. Γομφίοι (1<sup>ος</sup>, 2<sup>ος</sup> και 3<sup>ος</sup> ή φρονιμίτης) [5]

Χαρακτηριστική εικόνα της ανατομίας των δοντιών παρατίθεται στο Σχήμα 2.1 όπου παρουσιάζεται σχηματικά τομή τυπικού ανθρώπινου δοντιού.



**Σχήμα 2.1 Ανατομία του  
Ανθρώπινου δοντιού [5]**

#### **A. Μύλη**

1. Αδαμαντίνη
2. Οδοντίνη
3. Πολφός
4. Ούλα

#### **B. Ρίζα**

5. Οστεΐνη
6. Οστό της γνάθου
7. Φατνιακά αγγεία
8. Φατνιακά νεύρα

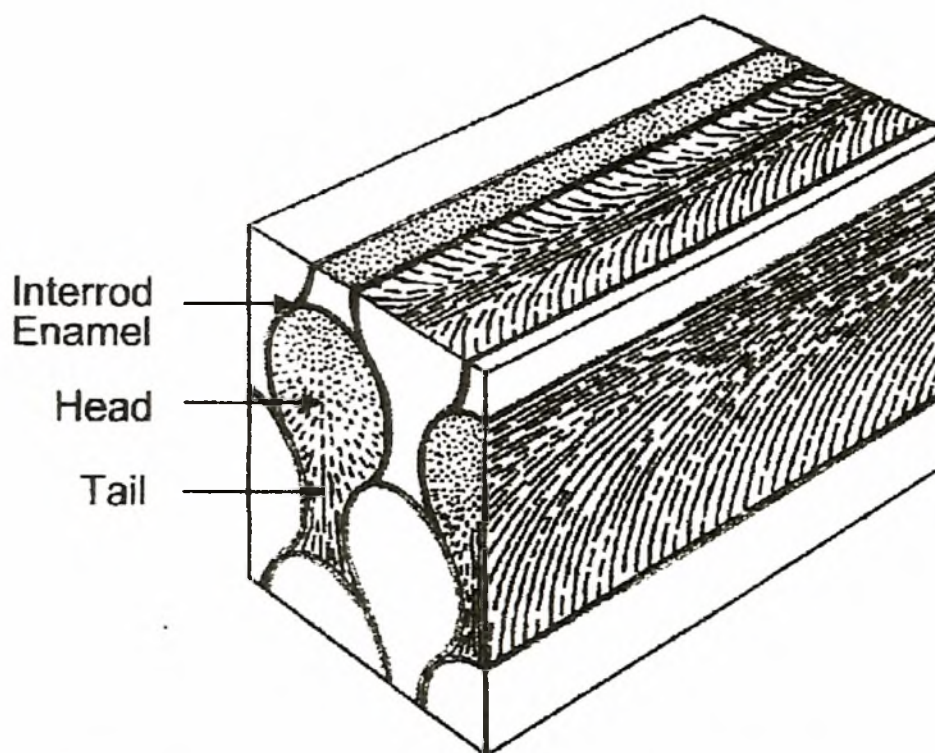
Το δόντι εμφανίζει δύο τμήματα: την μύλη και την ρίζα. Η μύλη αποτελεί το τμήμα του δοντιού που φαίνεται μέσα στην στοματική κοιλότητα ενώ η ρίζα είναι το τμήμα του δοντιού που βρίσκεται μέσα στο οστό της γνάθου. Η μύλη με την ρίζα διαχωρίζονται με μια νοητή γραμμή που ονομάζεται αυχένας του δοντιού. [5]

Κάθε δόντι αποτελείται από τέσσερις επιμέρους ιστούς: την οδοντίνη, την αδαμαντίνη, την οστεΐνη και τον πολφό. Η οδοντίνη βρίσκεται τόσο στην μύλη όσο και στην ρίζα. Η αδαμαντίνη καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια της οδοντίνης στην μύλη ενώ η οστεΐνη καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια της οδοντίνης στην ρίζα. Η οδοντίνη στο εσωτερικό της εμφανίζει μια κοιλότητα η οποία υποδέχεται τον πολφό. Ο πολφός αποτελείται από αγγεία και νεύρα και χρησιμεύει στην θρέψη του δοντιού. [5]

Τέλος οι περισσότερες παθολογικές καταστάσεις των δοντιών όπως η νόσος τερηδόνα, η αποτριβή, η διάβρωση αλλά και τα κατάγματα των δοντιών έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια σκληρών οδοντικών ιστών (αδαμαντίνη και οδοντίνη). [5]

### 2.1.1 Το σμάλτο των ανθρώπινων δοντιών και οι μηχανικές του ιδιότητες

Η μικροδομή του σμάλτου αποτελείται από ευθυγραμμισμένα πρίσματα ή ράβδους τα οποία κατευθύνονται σχεδόν κατακόρυφα στην συμβολή οδοντίνης-σμάλτου προς την επιφάνεια του δοντιού. Η ιδανική δομή αυτών των ράβδων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 μοιάζει με κλειδαρότρυπα με μέσο πλάτος της τάξης των 5 μm. Η κάθε ράβδος αποτελείται από κρυστάλλους υδροξυαπατίτη άνθρακα σφιχτά στοιβαγμένους. Οι κρύσταλλοι αυτοί επικαλύπτονται με ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα αδαμαντίνης και είναι προσανατολισμένοι κατά μήκος του άξονα των πρισμάτων. Η εσωτερική περιοχή ανάμεσα στις ράβδους ορίζεται σμάλτο (ανάμεσα στις ράβδους). Η περιοχή αυτή είναι πλούσια σε πρωτεΐνες και είναι κυρίως αποτέλεσμα της ασυναρτησίας των κρυστάλλων διαφορετικού προσανατολισμού στην περιοχή. [4]



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της μικροδομής του σμάλτου [4]

Η υψηλού προσανατολισμού μικροδομή του σμάλτου ευθύνεται για την ανισοτροπία των μηχανικών του ιδιοτήτων. Μακροσκοπικές μέθοδοι όπως καμπτικές και στρεπτικές δοκιμές έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ελαστικότητας, της δύναμης και της σκληρότητας των οδοντικών ιστών. Η συμπεριφορά του ανθρώπινου δοντιού κατά τη διάρκεια θραύσης μελετήθηκε εντατικά από τον Rasmussen ο οποίος παρατήρησε πως τόσο το σμάλτο όσο και η οδοντίνη σπάνε

με τρόπο ανάλογο με αυτόν των ψαθυρών υλικών. Ωστόσο το μόνο σμάλτο είναι αυτό που εμφανίζει έναν ιδιαίτερα ανισοτροπικό τρόπο θραύσης. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις και την θεωρία των σύνθετων υλικών (κραμάτων) οι ρωγμές τείνουν να ακολουθούν επιφάνειες με ατέλειες (αδυναμίες). Έτσι η διάδοση των ρωγμών γίνεται κυρίως κατά μήκος των διαστημάτων ανάμεσα στις εσωτερικές πλευρές των ράβδων, παράλληλα στους άξονές τους. [4]

### **2.1.2 Η οδοντίνη των ανθρώπινων δοντιών και οι μηχανικές της ιδιότητες**

Η οδοντίνη, ο ορυκτοποιημένος (mineralized) αυτός ιστός αποτελεί το κύριο μέρος του δοντιού. Παρουσιάζει χαρακτηριστική μικροδομή η οποία αποτελείται από μία ενυδατωμένη ρίζα κολλαγόνου τύπου I που εμπλουτίζεται από ανθρακούχους νανοκρυστάλλους απατίτη. Η μήτρα αυτή βρίσκεται ανάμεσα σε σχεδόν κυλινδρικούς σωλήνες που διατρέχουν το δόντι από την συμβολή οδοντίνης-σμάλτου μέχρι την περιοχή όπου βρίσκεται ο πολφός (pulp chamber). Οι σωλήνες αυτοί αποτελούν τα μονοπάτια για τα διαμορφωτικά οδοντοπλαστικά κύτταρα. Καθώς αυτά προχωρούν προς τα μέσα κατά τον σχηματισμό της κορυφής, η αριθμητική πυκνότητα των σωλήνων αυξάνεται 2 με 4 φορές όσο αυξάνεται το βάθος. Οι μικροσκοπικοί αγωγοί τροφοδοσίας (lumens) των σωλήνων τα οποία φτάνουν το 1μm σε διάμετρο περικυκλώνονται ή γεμίζουν από έναν υπερμεταλλικό κύλινδρο περισωληνοειδούς οδοντίνης η οποία συνίσταται κυρίως από απατίτη που φτάνει τα 0.5 με 1.5 μm σε πάχος. Ο σχηματισμός της περισωληνοειδούς οδοντίνης συμβαίνει μετά την ορυκτοποίηση της μήτρας και μπορεί να σχηματιστεί σαν μια παθητική καθίζηση παρά σαν ενεργό κομμάτι της διαδικασίας ορυκτοποίησης. Δεν έχει διαπιστωθεί εάν η περισωληνοειδής οδοντίνη συμβάλλει στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του ιστού.

## 2.2 Μηχανικές ιδιότητες δοντιών

Η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των δοντιών και ο ιστός από τον οποίο σχηματίζονται είναι σημαντικά για να μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τη μηχανική τους συμπεριφορά κάτω από κλινικές συνθήκες φόρτισης. Στις σημαντικότερες από αυτές τις ιδιότητες κατατάσσονται η σκληρότητα του υλικού, η δύναμη και ελαστικές ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας. Διάφορες ανασκοπήσεις έχουν πραγματευτεί πολλή από τη δουλειά που έχει πραγματοποιηθεί για τον καθορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του σμάλτου και της οδοντίνης. Μεγάλη ποικιλία οιονεί στατικών και δυναμικών δοκιμών εφαρμόστηκαν για τον καθορισμό των ελαστικών ιδιοτήτων του των δύο αυτών ιστών. [1]

Μελέτες βασισμένες σε οιονεί στατικές μετρήσεις αντιμετώπισαν δυσκολίες που εντοπίστηκαν κατά την προετοιμασία δειγμάτων κατάλληλου μεγέθους και γεωμετρίας για τα ανθρώπινα δόντια και αποκλίσεις αποδοτές σε ενδεχόμενη ανισοτροπία των δειγμάτων. Αν και οι μέθοδοι δυναμικών δοκιμών μπορούν να επιφέρουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων στη χρήση μικρότερων δειγμάτων και στην ύπαρξη μη κινούμενων τμημάτων, είναι αβέβαιο πώς το χαμηλό φορτίο και η πίεση που αναπτύχθηκαν (συχνά λιγότερο από  $0.1 \text{ MN}^{-2}$  και  $10^{-5} \text{ m}$ ) μπορούν να εφαρμοσθούν σε κλινικό περιβάλλον. [1]

Η σκληρότητα του σμάλτου και της οδοντίνης έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες που χρησιμοποίησαν σφαιρικούς διεισδυτές Vickers και Knoop εκ των οποίων ο δεύτερος αποτελεί την δημοφιλέστερη μέθοδο. Η μέθοδος σκληρομέτρησης Knoop υπολογίζει για το σμάλτο όπως παρατίθεται σε ποικίλη βιβλιογραφία από 272 έως 440 KHN και για την οδοντίνη από 50 έως 70 KHN. [1]

Προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί για τον συσχετισμό ανάμεσα στον προσανατολισμό και τις εκτιμήσεις της σκληρότητας των δειγμάτων αλλά οι Craig και Peyton δεν μπόρεσαν να καθορίσουν κάποια σχέση μεταξύ αυτών. Ωστόσο παρατήρησαν μείωση στο μήκος της μικρής διαγωνίου των ιχνών της μεθόδου Knoop στην οδοντίνη με την πάροδο του χρόνου, πράγμα το οποίο απέδωσαν στην ελαστική επαναφορά των δειγμάτων. [1]

Έχει αναφερθεί ότι κάποιες από τις ιδιότητες των υλικών, συμπεριλαμβανομένων του μέτρου ελαστικότητας και της "εργαστηριακής" σκληρότητας μπορούν να υπολογισθούν από τις μετρήσεις που πάρθηκαν από διεισδύσεις των μεθόδων Knoop και Vickers επιπρόσθετα με τις μετρήσεις σκληρότητας.

Ο D. B. Marshall εφήρμοσε μια απλή τεχνική για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας ως προς τον βαθμό σκληρότητας με χρήση διεισδυτή Knoop. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον υπολογισμό της ελαστικής επαναφοράς των ενδοεπιφανειακών διαστάσεων των ιχνών της διεισδύσης κατά Knoop. Σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, ο λόγος των διαγωνίων  $a$  και  $b$ ,

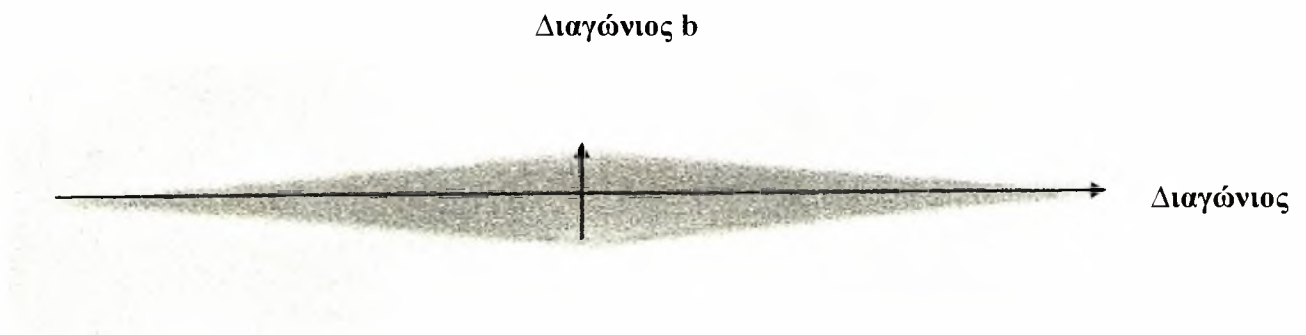


υπολογίζεται από την γεωμετρία του διεισδυτή,  $a/b=7.11$ . Ωστόσο, κατά την αποφόρτιση, η ελαστική επαναφορά έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του μήκους της μικρής διαγωνίου (όπως επίσης και του βάθους της διείσδυσης), ενώ η μεγάλη διαγώνιος παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη. Το μέγεθος της επαναφοράς εξαρτάται από την σκληρότητα και την αναλογία των διαγωνίων. Η επαναφορά είναι μεγαλύτερη σε ιδιαίτερα ελαστικά υλικά (υψηλό  $H/E$ ) και μηδενική σε ψαθυρά/πλαστικά υλικά (χαμηλό  $H/E$ ). Έτσι, το υπολειμματικό αποτύπωμα μετά την παραμόρφωση το οποίο προσδιορίζεται από την αναλογία  $b'/a'$  μας βοηθά στον υπολογισμό του  $H/E$ . [2]

. Η μείωση στο μήκος των διαγωνίων των ιχνών η οποία προέρχεται από την ελαστική επαναφορά του υλικού συσχετίστηκε από τον Marshall με την σκληρότητα μέσω της Εξίσωσης 2.1:

$$E = \frac{a_1 HK}{\left(\frac{b}{a} - \frac{b'}{a'}\right)} \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

όπου  $b/a$  ο λόγος των διαγωνίων διαστάσεων  $b$  και  $a$  σε κατάσταση πλήρους φόρτισης (Σχήμα 2.3) ο οποίος δίνεται από την σταθερά 0.140646. Το  $b'/a'$  είναι ο λόγος των διαστάσεων που έχουν μεταβληθεί μετά από πλήρη επαναφορά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 και  $a_1$  μια αναλογική σταθερά. Η  $a_1$  υπολογίστηκε θεωρητικά από τον Marshall (1982) στο 1,50 βασισμένος σε ελλειπτική διείσδυση. [1]



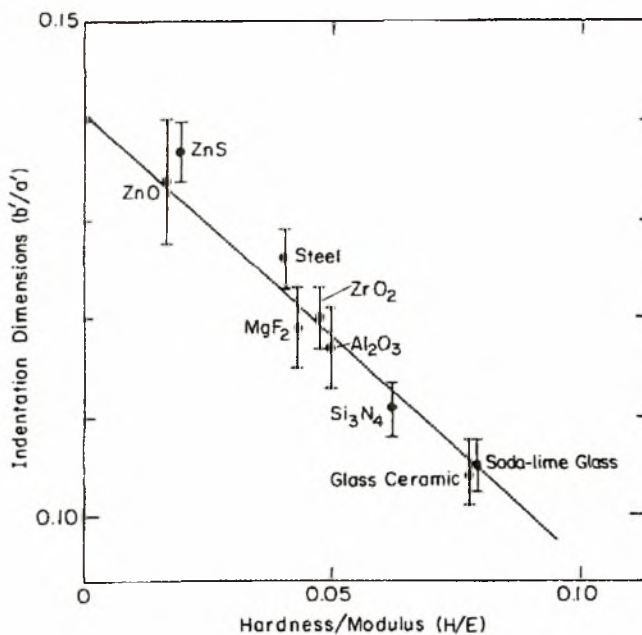
**Σχήμα 2.3. Ίχνος από διεισδυτή Knoorr, όπου φαίνονται οι διαγώνιοι  $b$  και  $a$  σε κατάσταση πλήρους φόρτισης [2]**

Διαγώνιος b'



Σχήμα 2.4. Ίχνος από διεισδυτή Κνοορ, όπου φαίνονται οι διαγώνιοι b' και a' μετά από πλήρη επαναφορά

Οι υπολογισμοί των διαστάσεων των υπολειμματικών ιχνών κατά Κνοορ που έκανε ο Marshall σε ποικιλία υλικών που καλύπτουν μεγάλη γκάμα  $H/E$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5. Τα στοιχεία αποκτήθηκαν μέσω οπτικής μικροσκοπίας ποικίλων ιχνών που δημιουργήθηκαν από διάφορα φορτία. Σε κάθε περίπτωση, ο λόγος  $b'/a'$  αποδείχθηκε ανεξάρτητος από τα φορτία που επιλέγησαν για την εκάστοτε μέτρηση. [2]



Σχήμα 2.5 Διακύμανση διαστάσεων των υπολειμματικών αποτυπωμάτων κατά Κνοορ ως προς τον λόγο σκληρότητας προς μέτρο ελαστικότητας ( $H/E$ ). [2]

Με την χρήση του Σχήματος 2.5 για την εκτίμηση του H/E μέσω των ιχνών από διείσδυση Κnoop σε συνδυασμό με την σκληρότητα των μετρήσεων με διείσδυση Vickers, ο Marshall κατάφερε να καθορίσει με δύο μόνο τεχνικές διείσδυσης (Κnoop και Vickers) τις τιμές των εξαιρετικής σημασίας μηχανικών ιδιοτήτων E, H και K<sub>C</sub> ικανοποιώντας τις απαιτήσεις υλικών μικρού μεγέθους. [2]

Μια ακόμα σημαντική έρευνα που αποτέλεσε εργαλείο για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αυτή που διεξήγαγε ο B. R. Lawn. Το θέμα της έρευνας αυτής αφορά την ελαστική επαναφορά στις σκληρομετρήσεις και συγκεκριμένα στην μικροσκληρομέτρηση κατά Vickers. Ωστόσο μέσω αυτής ήταν ευκολότερο για εμάς να κατανοήσουμε πως λειτουργούν οι μικροσκληρομετρήσεις εν γένει. Στην έρευνα του B. R. Lawn μελετήθηκε η μηχανική των τεχνικών διείσδυσης. Με την ανάπτυξη μιας διατύπωσης σαν μια λειτουργία των βασικών ιδιοτήτων σκληρότητας/ μέτρου ελαστικότητας (H/E) μέσω της συγκεκριμένης εργασίας επετεύχθη η ποσοτικοποίηση με ακρίβεια ορισμένων ελαστικών-πλαστικών παραμέτρων σε μια μορφή η οποία χαρακτηρίζει την αντίδραση των υλικών. Η παραπάνω ανάλυση προσφέρει έναν απλό τρόπο για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των παραμορφώσεων στα υλικά. [3]

Η απόδειξη πως ο ισχυρισμός ότι ο λόγος b'/a' σχετίζεται με την σκληρότητα ως προς το μέτρο της αναλογίας επιβεβαιώθηκε από τον Lawn με τον υπολογισμό της ελαστικής επαναφοράς με την απλή μέθοδο της γεωμετρίας του ίχνους.

Η μελέτη στην οποία βασίστηκε η παρούσα εργασία είναι αυτή που διεξήγαγε ο N. Meredith ο οποίος χρησιμοποίησε τεχνική μικροσκληρομέτρησης Κnoop. Παρατήρησε μείωση της μικρής διαγωνίου την οποία απέδωσε σε ελαστική επαναφορά ακολουθώντας την τακτική των Craig και Peyton (1958) που πρώτοι εντόπισαν αυτή την μεταβολή. Εφήρμοσε την Εξίσωση 2.2 που παρατίθεται παρακάτω η οποία αποτελεί μετασχηματισμό της Εξίσωσης 2.1 του Marshall. [1]

$$\frac{b'}{a'} = \frac{b}{a} - \alpha_1 \frac{H}{E} \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

όπου b/a ο λόγος των διαγωνίων a και b σε κατάσταση πλήρους φόρτισης που δίνεται από σταθερά ίση με 0,140646. Το b'/a' είναι ο λόγος των διαγωνίων μετά την ελαστική επαναφορά και α<sub>1</sub> μια αναλογική σταθερά . Οι δυνάμεις που χρησιμοποίησε για την αποτύπωση των ιχνών είναι 0,98N για την οδοντίνη και 4,9N για το σμάλτο. Υπολόγισε την μικροσκληρότητα Κnoop με εφαρμογή της Εξίσωσης 2.3 [1]

$$HK = \frac{1450 * F * 10^3}{a^2} \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

όπου HK η τιμή μικροσκληρότητας κατά Κνοορ, F η δύναμη που εφαρμόστηκε σε Newtons (0,98N τόσο για το σμάλτο όσο και για την οδοντίνη) και α το μήκος της μεγάλης διαγωνίου του ίχνους σε μm.

. Οι τιμές μικροσκληρότητας Κνοορ στις οποίες κατέληξε ο N. Meredith στην περιοχή του σμάλτου κυμαίνονται από 255 έως 290 KHN ενώ για την περιοχή της οδοντίνης υπολόγισε τιμές από 52 έως 65 KHN. Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.1 κατάφερε να εκτιμήσει το μέτρο ελαστικότητας του σμάλτου από 77 έως 416 GN/m<sup>2</sup> για α<sub>1</sub>=0,34, από 102 έως 551 GN/m<sup>2</sup> για α<sub>1</sub>=0,45 και από 340 έως 1838 GN/m<sup>2</sup> για α<sub>1</sub>=1,5. Με τον ίδιο τρόπο βρήκε για την οδοντίνη ότι το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 6,5 έως 8,6 GN/m<sup>2</sup> για α<sub>1</sub>=0,34, 8,7 έως 11,4 GN/m<sup>2</sup> α<sub>1</sub>=0,45 και από 29 μέχρι 38,1 GN/m<sup>2</sup> για α<sub>1</sub>=1,5.

Όπως προαναφέρθηκε η τιμή 1,50 υπολογίστηκε θεωρητικά από τον Marshall, η τιμή 0,45 προήλθε από πειραματικές μετρήσεις των ίδιων ερευνητών σε ποικιλία ψαθυρών υλικών και η τιμή 0,34 από πειραματικές μετρήσεις του D. C. Watts. [1]

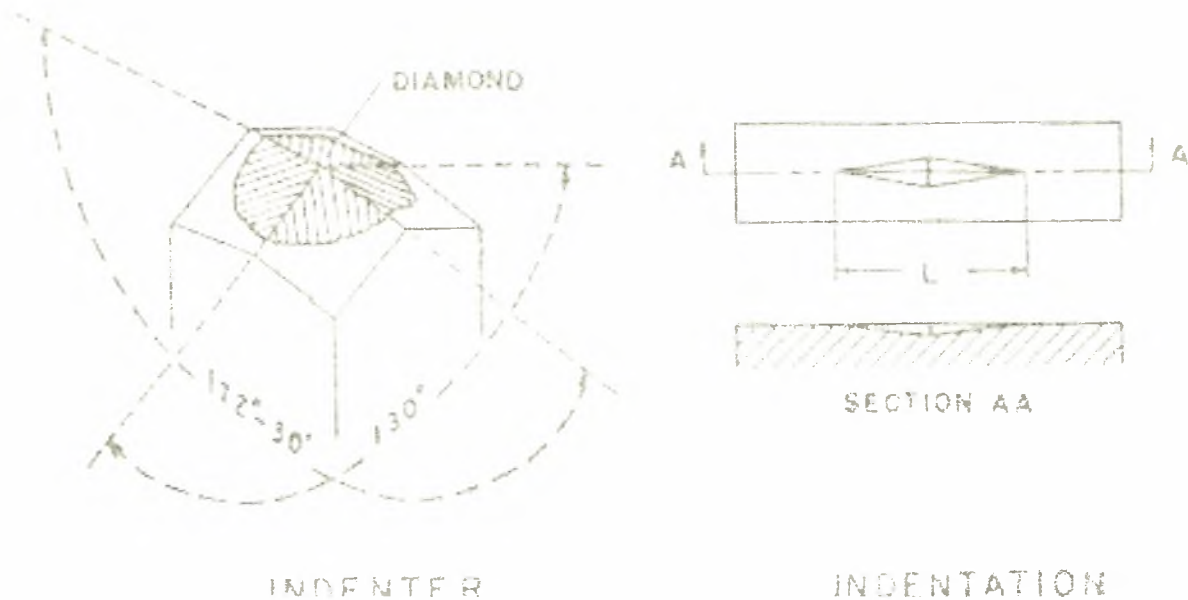
## 2.3 Διεισδυτής Κνοορ

### 2.3.1 Γενικά

Η μικροσκληρομέτρηση μπορεί να οριστεί ως μία δοκιμή σκληρότητας με διείδυση που περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός διαμαντένιου διεισδυτή συγκεκριμένης γεωμετρίας πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου σε φορτία που μεταβάλλονται από 1 έως 1000 gf. Ο διεισδυτής Κνοορ που παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.6, παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλα παρόμοια εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σκληρότητας. Συγκεκριμένα οι χρήσεις του διεισδυτή Κνοορ για μικροσκληρομέτρηση περιλαμβάνουν:

- Μετρήσεις σκληρότητας με ακρίβεια σε κομμάτια που είναι πολύ μικρά για να μετρηθούν με συμβατικές μεθόδους μακροσκοπικών δοκιμών σκληρότητας
  - Μέτρηση της σκληρότητας ειδικών προϊόντων όπως ελασμάτων ή καλωδίων που είναι πολύ λεπτά ή έχουν ιδιαίτερα μικρή διάμετρο για να μετρηθούν με συμβατικές μακροσκοπικές μεθόδους.
- Παρακολούθηση εργασιών επινικέλωσης οι οποίες συνήθως ακολουθούνται από ελέγχους σκληρότητας τα αποτελέσματα των οποίων λαμβάνονται από τομή των δοκιμίων που συνοδεύουν τα κομμάτια κατά την διάρκεια των εργασιών.
- Μέτρηση της σκληρότητας μεμονομένων μικρών τεμαχίων.

- Μέτρηση της σκληρότητας κοντά στις άκρες έτσι ώστε να εντοπισθούν ανεπιθύμητες μεταβολές στην επιφάνεια (π.χ. αλλοίωση λόγω τριβής, απανθράκωση)
- Μέτρηση σκληρότητας σε επιφανειακά στρώματα μετά από επιμετάλλωση.



**Σχήμα 2.6** Διεϊσδυτής Κnoop, φαίνονται οι γωνίες ανάμεσα στα άκρα του σημείου σε σχήμα πυραμίδας. Οι αναλογίες: μήκος:πλάτος=7.1:1 και μήκος :βάθος=30:1.

Μία εξαιρετικά ρηχή διεϊσδυση είναι αρκετή για να δημιουργήσει ένα ίχνος αρκετά μεγάλο ώστε να μετρηθεί με μια σχετική ακρίβεια της τάξεως του 1%. Έτσι για ένα ίχνος μήκους 100 μικρών (μm), η διεϊσδυση είναι μόνο της τάξεως των 3 μικρών. Το μικρό μέγεθος των ιχνών πραγματεύτηκαν οι Peters και Κnoop (1940) όταν έδειξαν ότι μπορεί να ληφθεί μία έγκυρη μέτρηση της σκληρότητας ενός ηλεκτρολυτικού επιχρωμιωμένου υλικού ανεξάρτητα από τη φύση του βασικού μετάλλου πάνω στο οποίο εναποτέθηκε το χρώμιο εφόσον το πάχος της επιμετάλλωσης ξεπερνά τις 0.001 ίντσες ή τα 25 μικρά. Μειώνοντας το βάρος που ασκεί το μηχάνημα, το μήκος των διεϊσδύσεων μπορεί να κρατιέται μικρό.

### 2.3.2 Υπολογισμός του ίχνους

Το μέγεθος του ίχνους που προκαλεί η διείσδυση μετράται με την χρήση μικροσκοπίου. Για να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή ανάλυση, θα πρέπει να γίνουν κατάλληλες προσαρμογές στην ένταση του φωτός και στην εστίαση.

Οι άκρες των ιχνών πρέπει να φαίνονται καθαρά κατά την εστίαση ώστε να πάρουμε την καλύτερη δυνατή μέτρηση των διαγωνίων. Στα ίχνη που προκύπτουν από διείσδυση με διεισδυτή Κνοορ δεν πρέπει το ένα τμήμα της μεγάλης διαγωνίου να είναι μεγαλύτερο από το άλλο περισσότερο από 20%. Αν κάποια από τις διαγωνίους είναι ασυνήθιστα μακριά ή εάν δεν επιτυγχάνεται καλή εστίαση τότε θα πρέπει να ελέγξουμε την επιφάνεια του δοκιμίου και να βεβαιωθούμε ότι είναι κάθετα στον άξονα του διεισδυτή.

### 2.3.3 Καθορισμός της τιμής σκληρότητας

Το ίχνος που προήλθε από την διείσδυση Κνοορ μετρείται σε  $\mu\text{m}$ . Οι τιμές μικροσκληρότητας Κνοορ τόσο για το σμάλτο όσο και για την υπολογίζονται με εφαρμογή της εξίσωσης 2.3 την οποία προαναφέραμε και παρουσιάζουμε και παρακάτω.

$$HK = \frac{1450 * F * 10^3}{a^2} \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

όπου  $HK$  = η τιμή μικροσκληρότητας κατά Κνοορ

$F$  = η δύναμη που εφαρμόστηκε σε Newtons (0,98N τόσο για το σμάλτο όσο και για την οδοντίνη)

$a$  = το μήκος της μεγάλης διαγωνίου του ίχνους σε  $\mu\text{m}$

Η σκληρότητα ( $HK$ ) αποτελεί δύναμη και εκφράζεται σε χιλιόγραμμα ανά τετραγωνικό χιλιοστόμετρο ( $\text{Kg}/\text{mm}^2$ ). [1]

## Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία

Το Εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας κατά το αρχικό στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρέλαβε ποσότητα δοντιών που προέρχονταν από πρόσφατη οδοντιατρική εξαγωγή. Αρχικός σκοπός ήταν να επιλέξουμε από αυτά, τα δόντια με τα λιγότερα ψεγάδια ώστε να επιτύχουμε τα καλύτερα δυνατά και περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

### 3.1 Μεθοδολογία

#### 3.1.1 Προετοιμασία δοκιμών

Έγινε προετοιμασία δοκιμών από δύο δόντια τα οποία τοποθετήθηκαν σε απιονισμένο νερό στους 4<sup>ο</sup> C το πολύ μετά από εξαγωγή δύο εβδομάδων. Τα δόντια εξετάστηκαν στο στερεοσκόπιο.

Τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε χημική πολυμερή ρητίνη και αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για μία ώρα. Οι τομές που επιλέχθηκαν ήταν από το μεσαίο τμήμα του κάθε δοντιού. Κάθε τομή τροχίσθηκε σταδιακά σε τροχούς Knuth-Roter-3 της Struers με την χρήση λειαντικών χαρτιών των 400, των 600, των 800 και των 1000 grit. Τέλος έγινε στίλβωση με το μηχάνημα Dar-V της Struers με την χρήση λειαντικής αλοιφής με διαμάντι 3 και 1 μm .

Στο πρώτο δοκίμιο έγινε μικροσκληρομέτρηση με μικροσκληρόμετρο Vickers. Τα αποτελέσματα αυτής τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία επειδή η μικροσκληρομέτρηση με διεισδυτή Knoop θεωρήθηκε περισσότερο αξιόπιστη και αποτελεί την πλέον δημοφιλή μέθοδο διείσδυσης.

Για το δεύτερο δοκίμιο, στο μικροσκληρόμετρο που χρησιμοποιήσαμε τοποθετήθηκε διεισδυτής Knoop για την αποτύπωση και την μέτρηση των ίχνων σε αυτό. Η ακρίβεια των μετρήσεων ελέγχθηκε συγκρίνοντας την μέση εκτίμηση πέντε διεισδύσεων σε ένα μεταλλικό δοκίμιο (test block) που χρησιμοποιείται για δοκιμές σκληρομέτρησης.

Το δοκίμιο τοποθετήθηκε κατάλληλα στο μικροσκληρόμετρο SHIMADZU HMV-2000 και προσανατολίσθηκε έτσι ώστε η μεγάλη διαγώνιος του κάθε ίχνους στο σμάλτο να είναι παράλληλη στην εξωτερική επιφάνεια του δοντιού και στην οδοντίνη, παράλληλη στην αμυλοδοντική ένωση. Στην γυαλισμένη επιφάνεια του δοκιμίου έγιναν δύο προφίλ των 20 μικροσκληρομετρήσεων τόσο στο σμάλτο όσο και στην οδοντίνη για την λήψη περισσότερο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Τα ίχνη

απείχαν στο σμάλτο 100 μm από την επιφάνεια του δοντιού και 150 μm η κάθε μέτρηση από την προηγούμενη. Επίσης, τα δύο προφίλ λήφθηκαν σε απόσταση ασφαλείας (300μm) μεταξύ τους έτσι ώστε να μην υπάρχει καμία απολύτως επιρροή μεταξύ των μετρήσεων. Οι μετρήσεις έγιναν με βάρος 100 g τόσο στο σμάλτο όσο και στην οδοντίνη. Έτσι πήραμε τα προφίλ μικροσκληρομέτρησης του δοντιού.

Οι μετρήσεις του μήκους της μεγάλης και της μικρής διαγωνίου σε κάθε ίχνος έγιναν σε μεγέθυνση 1000x για το πρώτο προφίλ και 500x για το δεύτερο με χρήση του Οπτικού μικροσκοπίου. Σε περίπτωση που επιφανειακή ζημιά γύρω από κάποιο ίχνος εμπόδιζε την ορατότητα της διαγωνίου, γινόταν εκτίμηση ανάλογα με την θέση της.

Σε κάποιες περιπτώσεις και κυρίως στο σμάλτο καθίστατο δύσκολο να εντοπιστεί το περίγραμμα του ίχνους. Σε αυτές τις περιπτώσεις προσπαθήσαμε να βελτιώσουμε την σκίαση χωρίς να επηρεαστεί η ακρίβεια της μέτρησης.

### **3.1.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε**

Αρχικά έγινε χρήση κοπτικού μηχανήματος για τον τεμαχισμό των δοντιών σε πολύ λεπτές φέτες. Μετά τον εγκιβωτισμό τους τα δοκίμια πέρασαν από λειαντικούς τροχούς και από έναν τροχό για στίλβωση. Αφού το δοκίμιο ήταν λείο και έτοιμο για την μικροσκληρομέτρηση, χρησιμοποιήθηκε μικροσκληρόμετρο με διεισδυτή Knoop η κατασκευή και ο τρόπος λειτουργίας του οποίου περιγράφηκαν παραπάνω (Κεφάλαιο 2.3). Τα ίχνη που προέκυψαν από την μικροσκληρομέτρηση τα μεγεθύνουμε σε οπτικό μικροσκόπιο 500x και 1000x ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε τις διαγώνιους τους με μεγαλύτερη ακρίβεια.



### 3.1.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Η μικροσκληρομέτρηση Κνοορ πραγματοποιήθηκε στο δόντι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Το πρώτο ίχνος αποτυπώθηκε σε απόσταση περίπου 105  $\mu\text{m}$  από την εξωτερική επιφάνεια του δοντιού για να αποφύγουμε ενδεχόμενες ήδη υπάρχουσες ρωγμές ή ατέλειες στις περιοχές των μετρήσεων. Τα ίχνη είχαν μεταξύ τους μια απόσταση ασφαλείας της τάξης των 150  $\mu\text{m}$ . Αυτό έγινε για να αποφύγουμε την αλληλεπίδραση των μετρήσεων μεταξύ τους. Το βάρος που χρησιμοποιήθηκε για την μικροσκληρομέτρηση ήταν 100 gr και η διάρκεια της κάθε διείσδυσης 10 sec. Οι πληροφορίες που μας έδωσε το μικροσκληρόμετρο μετά από την ανάγνωση του κάθε ίχνους ήταν το μέγεθος της μεγάλης διαγωνίου και η μικροσκληρότητα Κνοορ για το καθένα από αυτά.

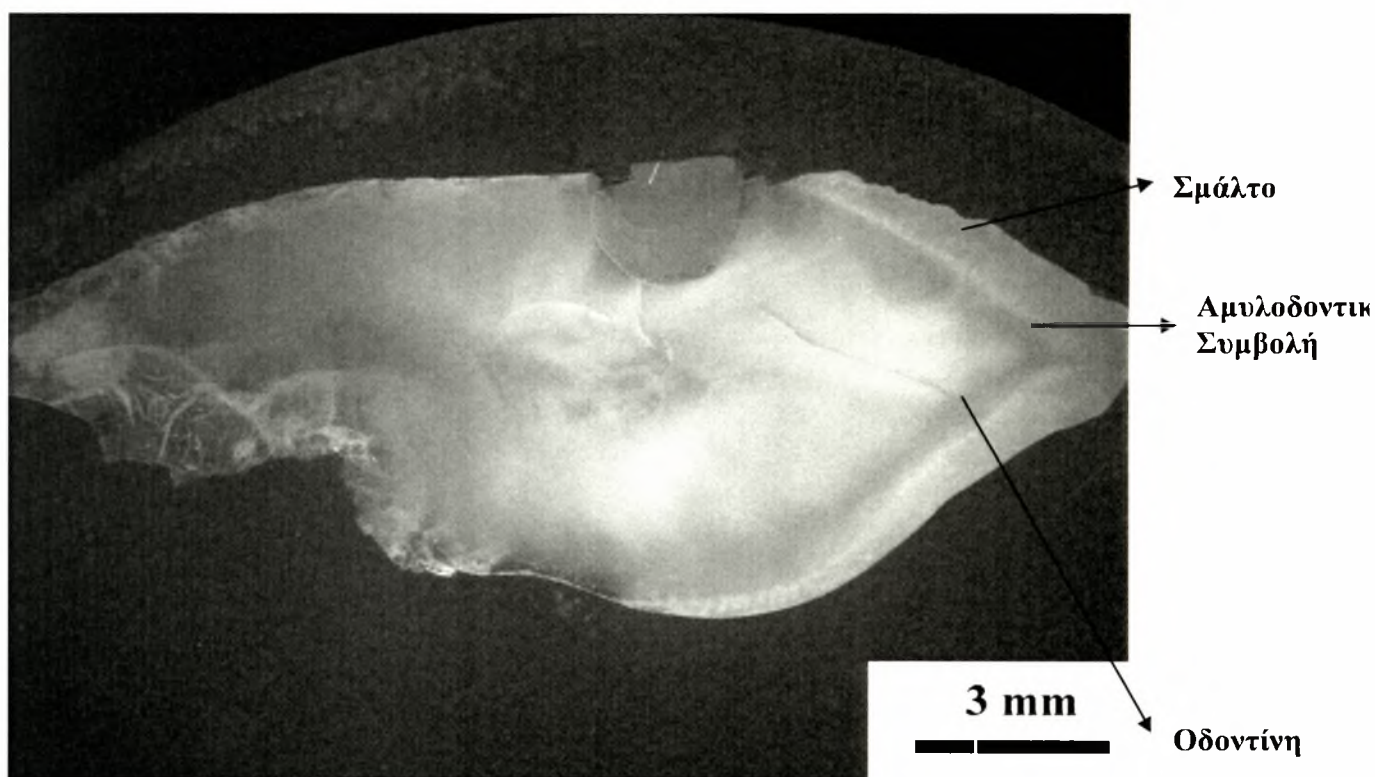
Μετά το πέρας της μικροσκληρομέτρησης μεγεθύναμε (500x, 1000x) το κάθε ίχνος και με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου μετρήσαμε τις διαγώνιους (μικρή και μεγάλη) για το καθένα από τα ίχνη.

## Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και γίνεται η αξιολόγησή τους.

### 4.1 Δομή δοντιών

Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2, το δόντι αποτελείται από το σμάλτο και την οδοντίνη. Πέρασμα από τον έναν ιστό στον άλλο αποτελεί η αμυλοδοντική συμβολή. Τα τρία αυτά τμήματα του δοντιού παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1, σε μια φωτογραφία που τραβήξαμε με χρήση στερεοσκοπίου.



Σχήμα 4.1. Φωτογραφία τομής δοντιού από στερεοσκόπιο

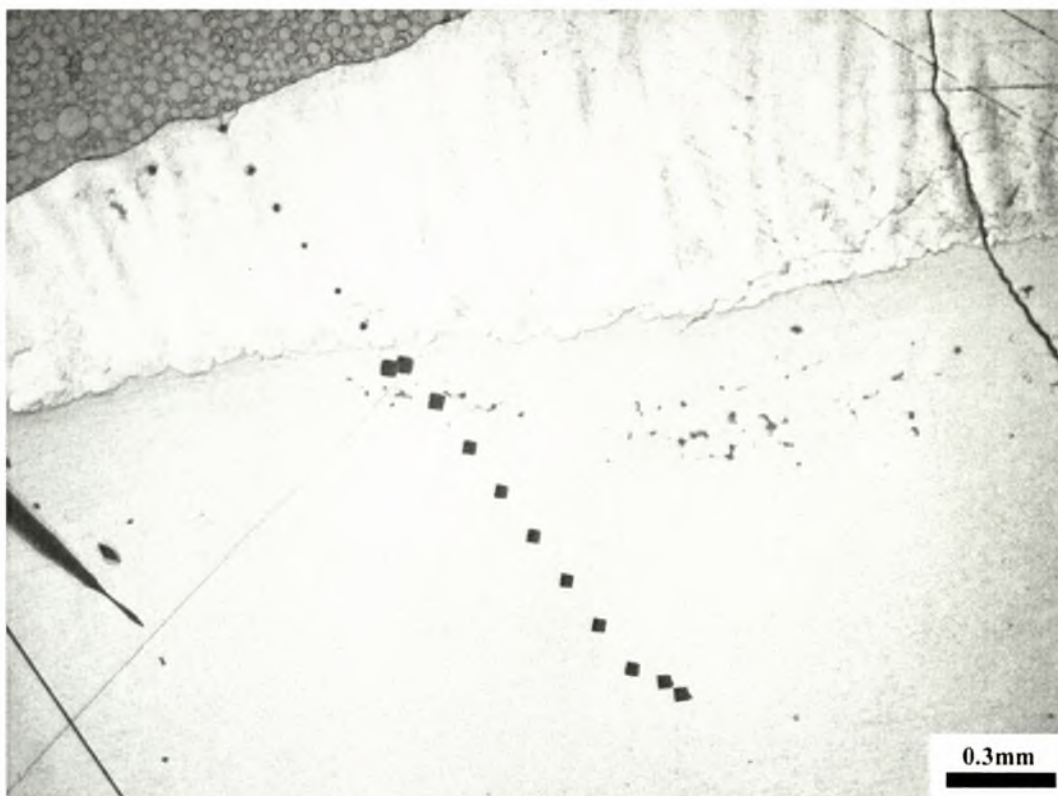
Εξίσου σημαντικό είναι να παρουσιάσουμε την ιδιαίτερη μικροδομή της οδοντίνης στην οποία αναφερθήκαμε στο Κεφάλαιο 2. Υπενθυμίζουμε πως η οδοντίνη συνίσταται από μια μήτρα κολλαγόνου που βρίσκεται ανάμεσα σε πολλούς κυλινδρικούς σωλήνες. Η δομή αυτή φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 4.2 που παρατίθεται παρακάτω και αποτελεί απόκτημα από την χρήση οπτικού μικροσκοπίου.



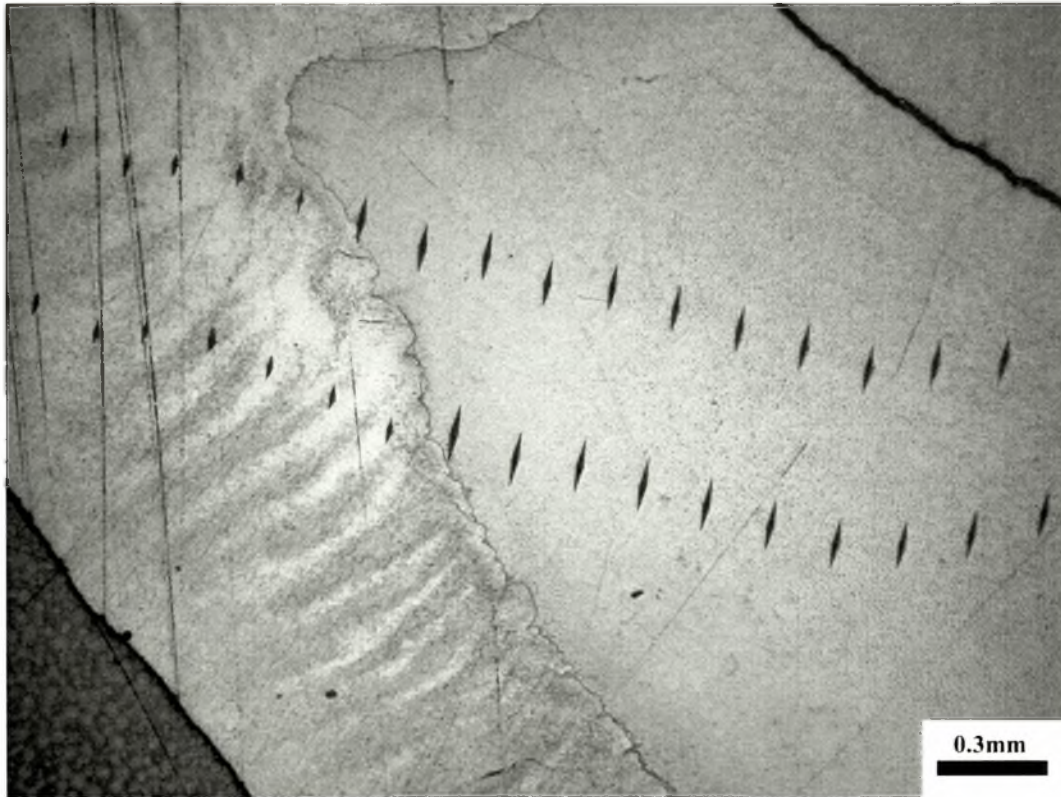
**Σχήμα 4.2 Φωτογραφία της μικροδομής της οδοντίνης**

## 4.2 Profiles μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers και Knoop

Κατά τα αρχικά στάδια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας πήραμε profiles μετρήσεων με την μέθοδο του Vickers αλλά και με την μέθοδο του Knoop. Αυτό έγινε για να συγκρίνουμε τις τιμές μικροσκληρομέτρησης των δύο μεθόδων και να κατασταλάξουμε στην πιο αξιόπιστη εκ των δύο. Η απόφασή μας ήταν να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο μικροσκληρομέτρησης κατά Knoop η οποία θεωρείται η πλέον διαδεδομένη. Παρακάτω παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3 το profile μικροσκληρομέτρησης κατά Vickers και στο Σχήμα 4.4 τα profiles που πήραμε με χρήση διεισδυτή Knoop.



Σχήμα 4.3. Profile μικροσκληρομέτρησης Vickers σε ανθρώπινο δόντι



**Σχήμα 4.4. Profiles μικροσκληρομέτρησης Κνοορ σε ανθρώπινο δόντι**

### **4.3 Υπολογισμός μικροσκληρότητας, μέτρου ελαστικότητας (1<sup>ο</sup> profil)**

Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής αυτής έρευνας βασίζονται κυρίως στα ίχνη που προέκυψαν από μικροσκληρομέτρηση με διεισδυτή Κνοορ. Παρατηρούμε ότι τα ίχνη (ρομβοειδούς σχήματος) μεταβάλλονται σε μέγεθος όσο προχωράμε προς το εσωτερικό του δοντιού. Τα ίχνη στο σμάλτο (Σχήμα 4.5 έως 4.12) είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με αυτά στην οδοντίνη (Σχήμα 4.13 έως 4.24). Τα Σχήματα 4.12 και 4.13 βρίσκονται κοντά στο όριο μεταξύ σμάλτου και οδοντίνης αντίστοιχα (αμυλοδοντική συμβολή).



Σχήμα 4.5. Φωτογραφία (1000x) από το πρώτο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.6. Φωτογραφία (1000x) από το δεύτερο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



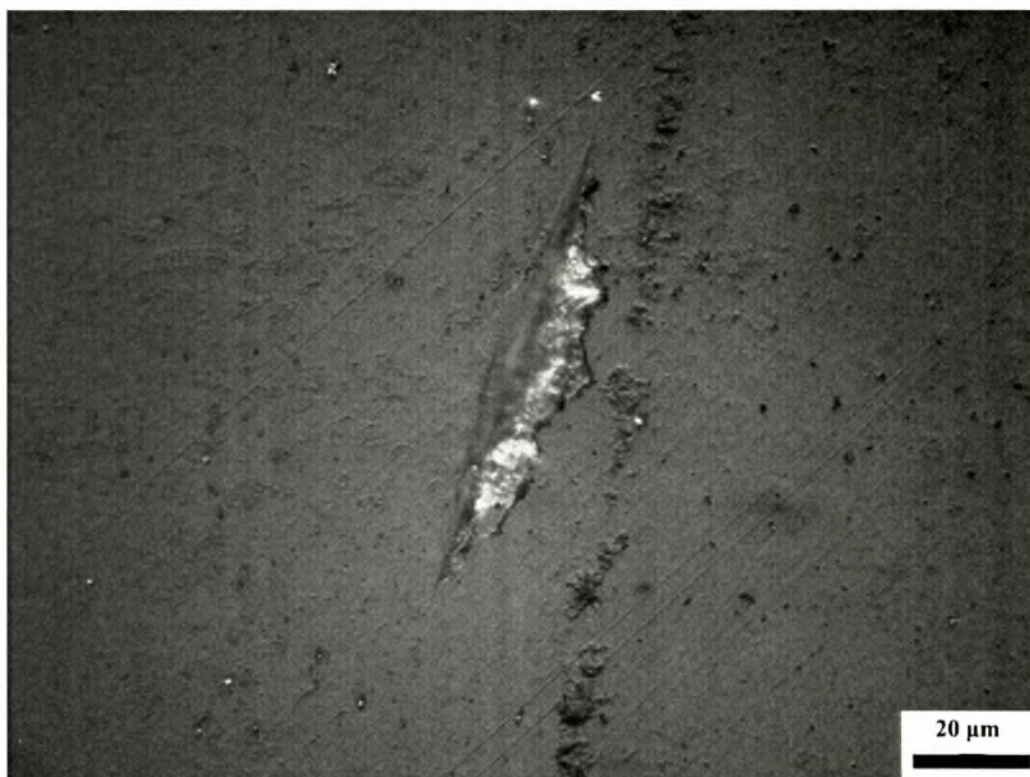
Σχήμα 4.7. Φωτογραφία (1000x) από το τρίτο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.8. Φωτογραφία (1000x) από το τέταρτο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.9. Φωτογραφία (1000x) από το πέμπτο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.10. Φωτογραφία (1000x) από το έκτο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)





Σχήμα 4.11. Φωτογραφία (1000x) από το έβδομο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.12. Φωτογραφία (1000x) από το όγδοο ίχνος στο σμάλτο (1<sup>ο</sup> profile)



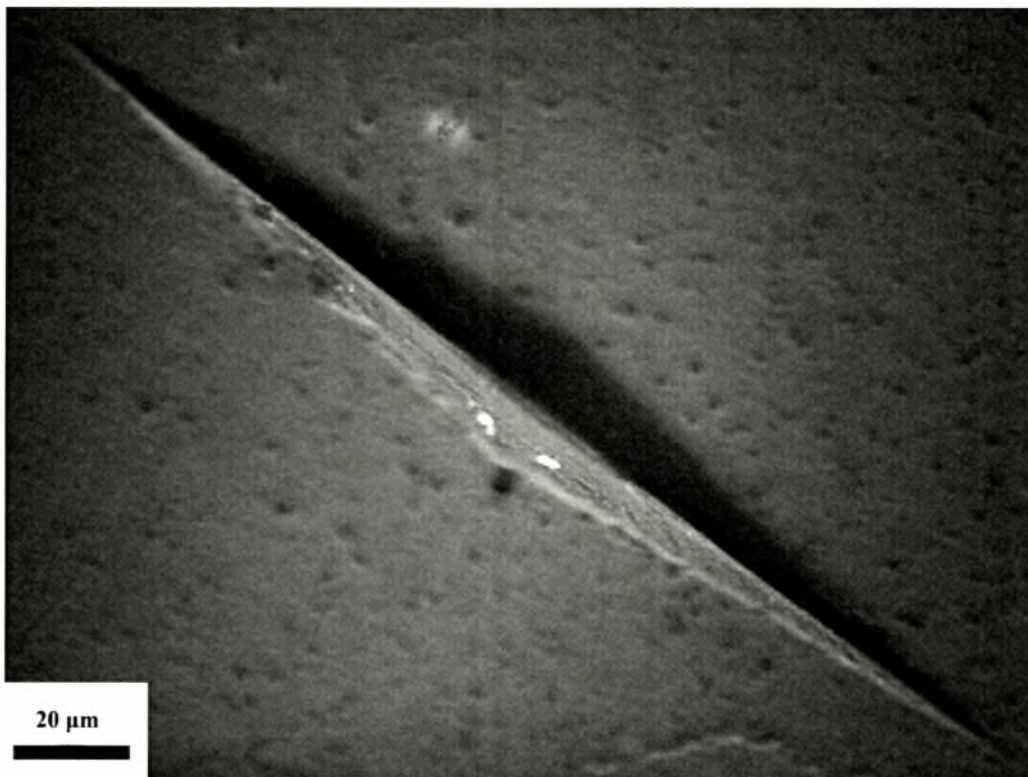
Σχήμα 4.13. Φωτογραφία (1000x) από το πρώτο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.14. Φωτογραφία (1000x) από το δεύτερο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.15. Φωτογραφία (1000x) από το τρίτο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.16. Φωτογραφία (1000x) από το τέταρτο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.17. Φωτογραφία (1000x) από το πέμπτο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



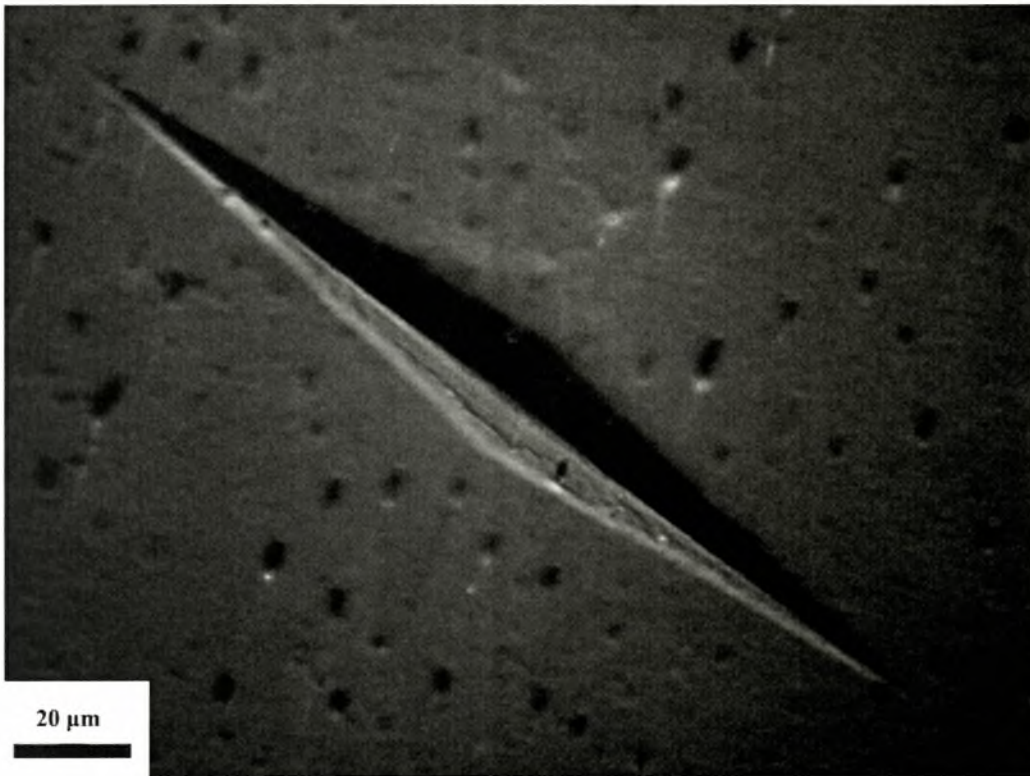
Σχήμα 4.18. Φωτογραφία (1000x) από το έκτο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.19. Φωτογραφία (1000x) από το έβδομο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



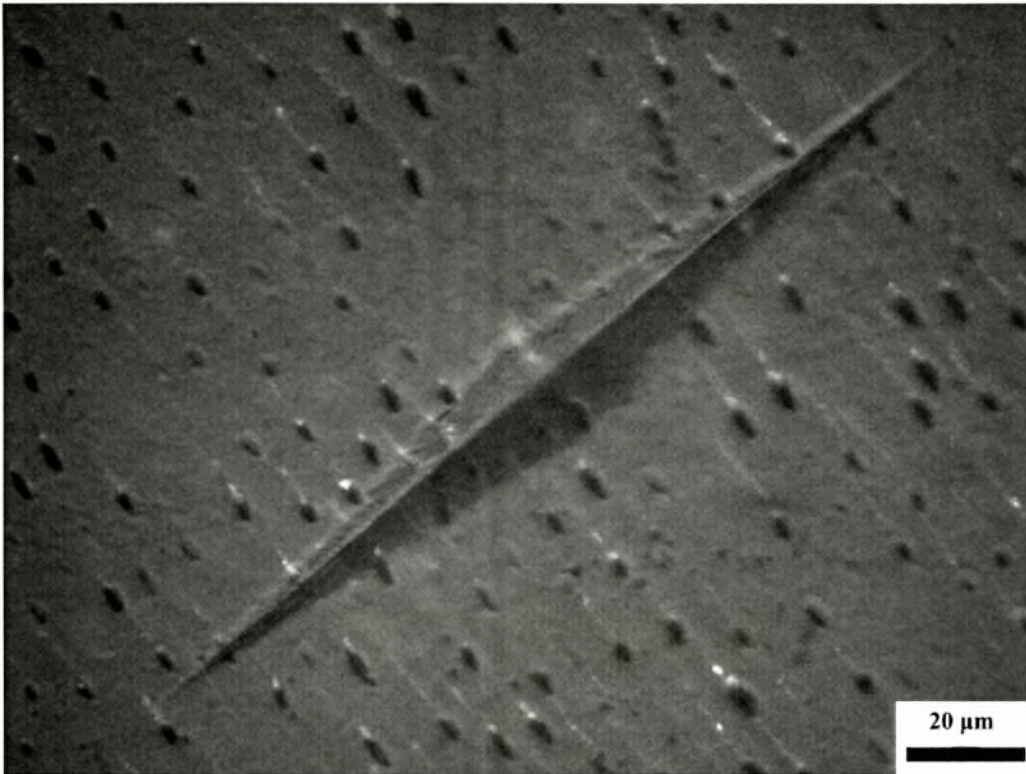
Σχήμα 4.20. Φωτογραφία (1000x) από το όγδοο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



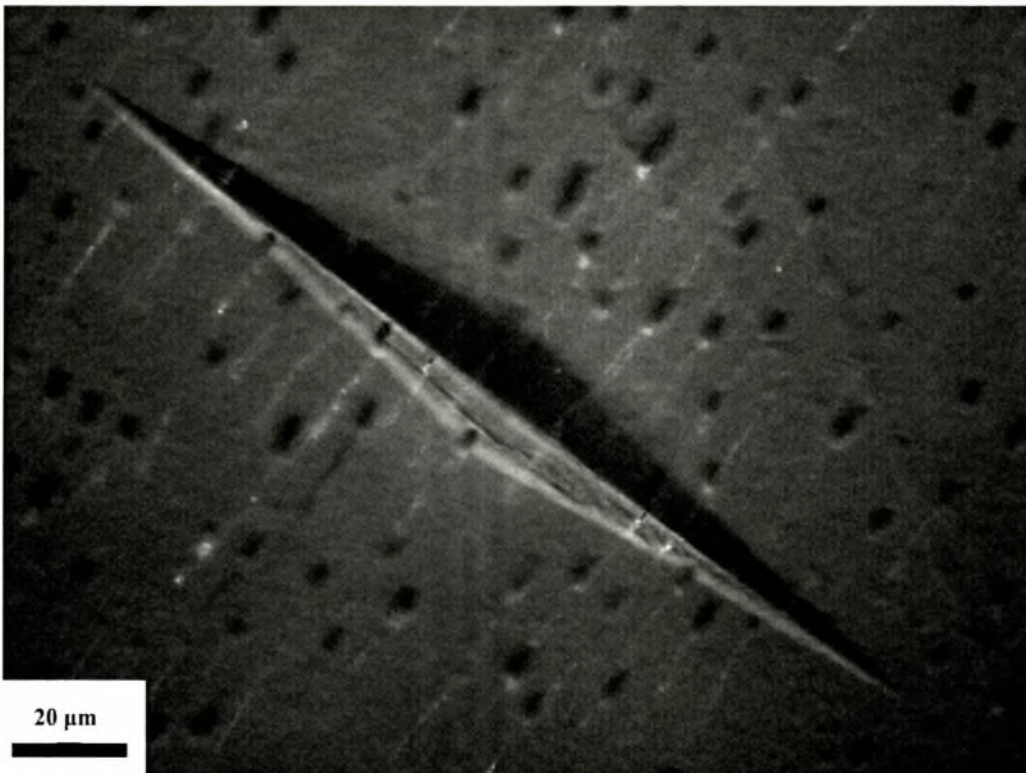
Σχήμα 4.21. Φωτογραφία (1000x) από το ένατο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.22. Φωτογραφία (1000x) από το δέκατο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.23. Φωτογραφία (1000x) από το ενδέκατο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.24. Φωτογραφία (1000x) από το δωδέκατο ίχνος στην οδοντίνη (1<sup>ο</sup> profile)












Αφού υπολογίσαμε τα μήκη της μικρής και της μεγάλης διαγωνίου για κάθε ίχνος τόσο με χρήση οπτικού μικροσκοπίου όσο και με το μικροσκληρόμετρο, υπολογίσαμε τις τιμές της σκληρότητας Knoop για το σμάλτο και την οδοντίνη σύμφωνα με την Εξίσωση 2.3 που αναφέραμε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.










Στον Πίνακα 4.1 που παρατίθεται παρακάτω συγκεντρώσαμε τα αποτελέσματα της σκληρότητας που πήραμε από την μικροσκληρομέτρηση Knoop και αυτά από το οπτικό μικροσκόπιο με χρήση της εξίσωσης 4.1.

Οι μετρήσεις M1 με M8 αναφέρονται στο σμάλτο ενώ οι M9 με M20 στην οδοντίνη. Στην πρώτη στήλη (\*A) δίνεται η αρίθμηση των ιχνών ενώ στην δεύτερη οι αντίστοιχες φωτογραφίες (x1000). Στην τρίτη (α) και πέμπτη (β) στήλη δίνονται αντίστοιχα τα μήκη των μεγάλων και μικρών διαγωνίων που υπολογίσαμε από το οπτικό μικροσκόπιο. Η τέταρτη στήλη (α) περιέχει τις μετρήσεις των μεγάλων διαγωνίων που υπολογίσθηκαν από το μικροσκληρόμετρο. Στις δύο τελευταίες στήλες δίνονται οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας Knoop όπως αυτές υπολογίσθηκαν από το μικροσκληρόμετρο (HK<sub>1</sub>) και το οπτικό μικροσκόπιο (HK<sub>2</sub>) αντίστοιχα.



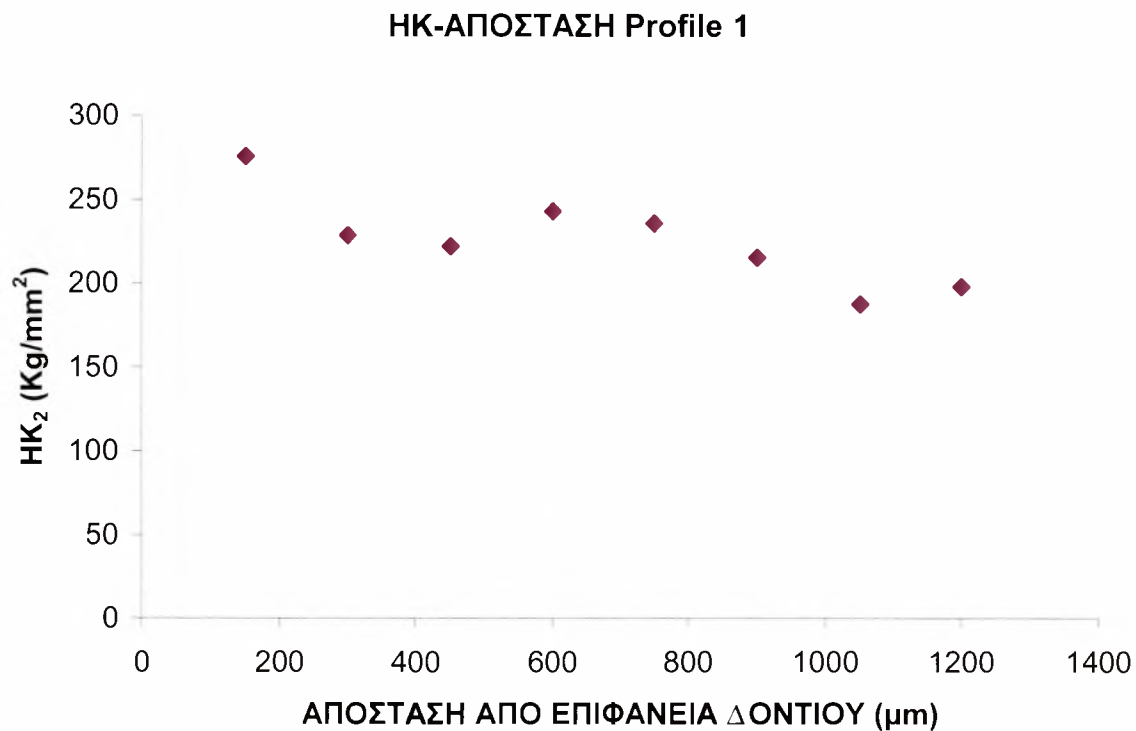
**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης**

*/A	Φωτογραφία (x1000)	$\alpha(\mu\text{m})$	a ( $\mu\text{m}$ )	b( $\mu\text{m}$ )	HK <sub>1</sub>	HK <sub>2</sub>
M1		71,765	59.88	8,235	396,8	275,717
M2		78,824	68.44	7,059	303,8	228,545
M3		80	71.44	9,412	278,8	221,875
M4		76,471	67.03	8,235	316,7	242,826
M5		77,647	69.8	7,059	292,1	235,526
M6		81,176	69.76	9,412	292,4	215,493
M7		87,059	73.73	9,412	261,7	187,353
M8		84,706	73.76	10,588	261,5	197,906
M9		171,765	163.37	22,353	53,3	48,130
M10		177,647	165.15	21,176	52,2	44,996
M11		160	171.17	16,471	48,6	55,469

M12		155,294	158.59	20	56,6	58,882
M13		165,882	171.03	16,471	48,6	51,605
M14		163,529	166.67	20	51,2	53,101
M15		156,471	160.68	16,471	55,1	57,999
M16		170,588	142.84	21,176	69,7	48,797
M17		169,412	143.29	21,176	69,3	49,477
M18		168,235	144.2	20	68,4	50,171
M19		172,941	145.99	20	66,8	47,478
M20		169,412	141.63	21,176	70,9	49,477

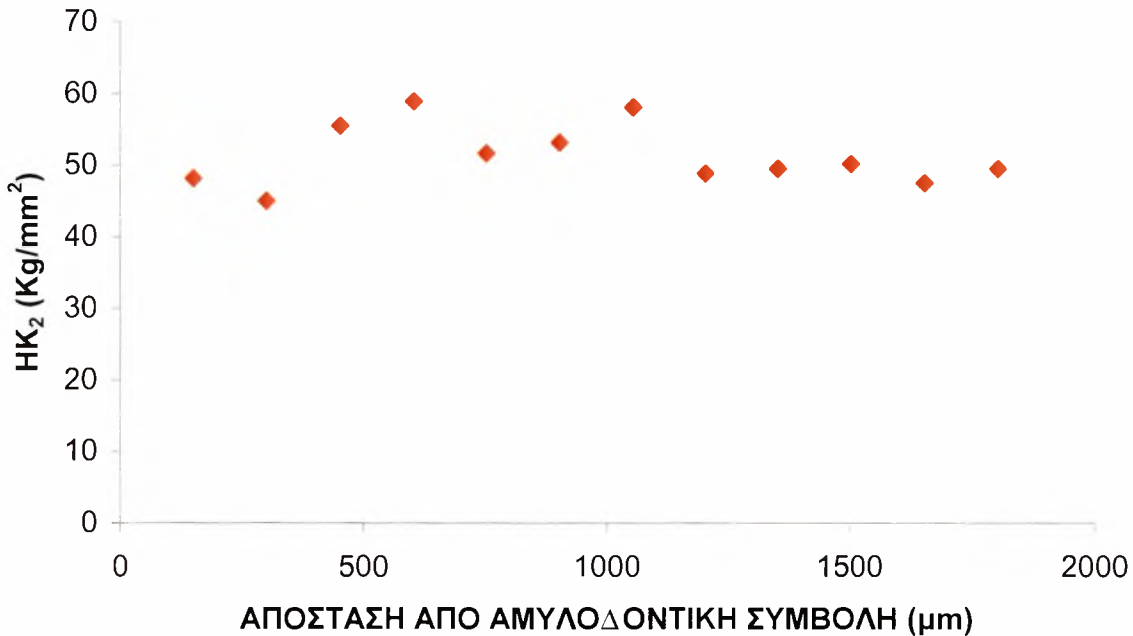
Παρατηρώντας τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τιμών μικροσκληρότητας που υπολογίσαμε από το μικροσκληρόμετρο ( $HK_1$ ) και το οπτικό μικροσκόπιο ( $HK_2$ ), εντοπίζουμε κάποιες αποκλίσεις στις μετρήσεις για κάποια από τα ίχνη. Οι αποκλίσεις αυτές παρατηρούνται ως επί το πλείστον στα πρώτα ίχνη που πήραμε στην περιοχή του σμάλτου. Μια πιθανή αιτία ύπαρξης των διαφορών αυτών στις μετρήσεις είναι η ύπαρξη κάποιων ρωγμών στο σμάλτο πριν την μικροσκληρομέτρηση ή και η δημιουργία κάποιων από αυτές κατά την διείδυση με τεχνική Κποορ οι οποίες δεν κατέστησαν δυνατή την ακριβή μέτρηση των διαγωνίων και συνεπώς τον ακριβή υπολογισμό της μικροσκληρότητας Κποορ.

Οι τιμές της μικροσκληρότητας που υπολογίσαμε παρουσιάζονται γραφικά παρακάτω τόσο για το σμάλτο (Σχήμα 4.25) όσο και για την οδοντίνη (Σχήμα 4.26) σε συνάρτηση με την απόσταση του ίχνους από την επιφάνεια του δοντιού για το πρώτο και με την απόσταση από την αμυλοδοντική συμβολή για το δεύτερο.



**Σχήμα 4.25. Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στο σμάλτο σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια του δοντιού**

### HK-ΑΠΟΣΤΑΣΗ Profile 1



**Σχήμα 4.26.** Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στην οδοντίνη σε σχέση με την απόσταση από την αμυλοδοντική συμβολή












Παρατηρούμε πως στο σμάλτο μικροσκληρότητα Knoop κυμαίνεται από 185 έως 285 KHN και στην οδοντίνη από 44 έως 58 KHN.










Το μέτρο ελαστικότητας (E) σχετίζεται άμεσα με την μικροσκληρότητα Knoop (HK). Αυτό υπολογίζεται από τον μετασχηματισμό της Εξίσωσης 2.1:

$$E = \frac{a_1 HK}{\frac{b}{a} - \frac{b'}{a'}} \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε από την Εξίσωση 4.2 για τρεις διαφορετικές τιμές του  $a_1$ . Οι τιμές 0.34 και 0.45 έχουν προκύψει μέσα από πειραματική διαδικασία ενώ η τιμή 1.5 προέκυψε από θεωρητικό υπολογισμό του Marshall.

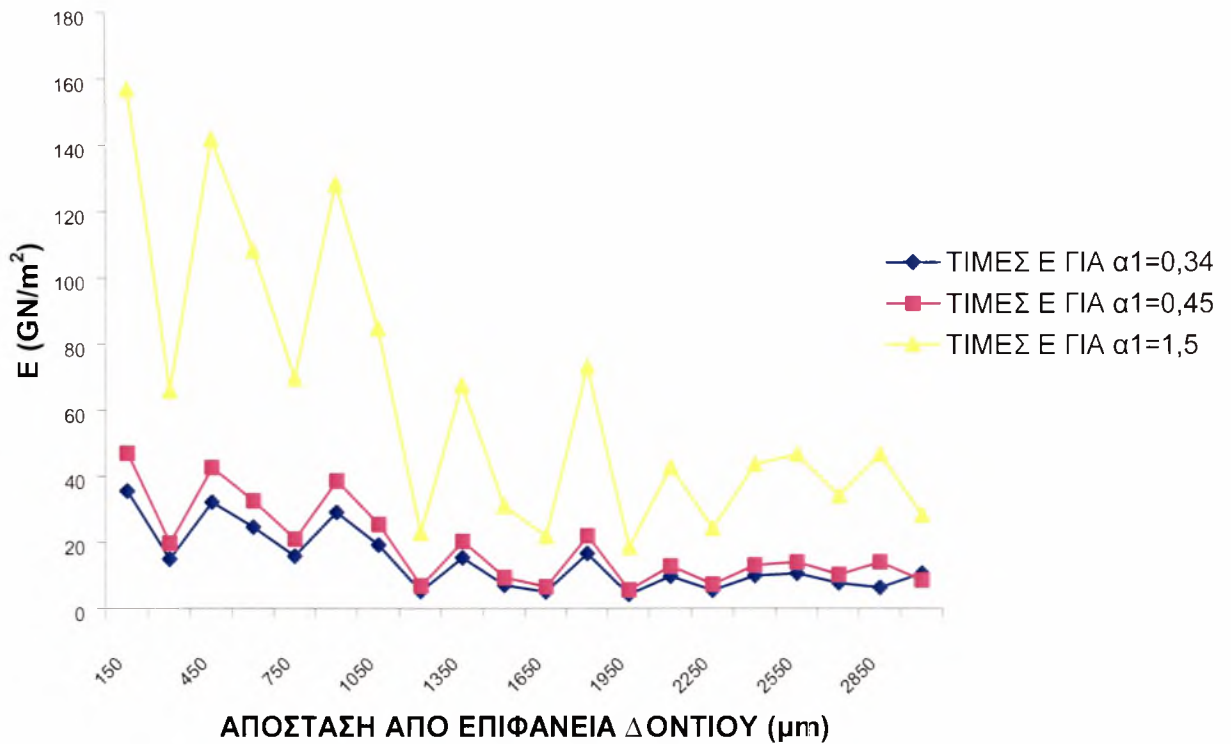
**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας για  $\alpha_1=0,34, 0,45, 1,5$**

*/Α	Φωτογραφία (x1000)	E(GPa) 0.34	E(GPa) 0.45	E(GPa) 1.5
M1		35,50074647	46,98628209	156,6209403
M2		14,91533832	19,74088895	65,80296318
M3		32,17148906	42,579912	141,93304
M4		24,56673773	32,51479993	108,3826664
M5		15,79049446	20,89918384	69,66394614
M6		29,09002873	38,50150861	128,338362
M7		19,20082221	25,41285293	84,70950977
M8		5,149547093	6,815577035	22,71859012
M9		15,27133749	20,21206432	67,37354774
M10		6,996741458	9,260393106	30,86797702
M11		4,905645966	6,49276672	21,64255573

M12		16,55700469	21,91368268	73,04560892
M13		4,161049327	5,507271168	18,35757056
M14		9,652301323	12,77510469	42,58368231
M15		5,466028695	7,234449744	24,11483248
M16		9,854671302	13,04294731	43,47649104
M17		10,54216614	13,95286695	46,5095565
M18		7,686322093	10,17307336	33,91024453
M19		6,332483065	8,381227585	27,93742528
M20		10,54216614	13,95286695	46,5095565

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα γράφημα (Σχήμα 4.27) του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της απόστασης των ιχνών από την επιφάνεια του δοντιού για τις τρεις τιμές του  $\alpha_1$  (0,34, 0,45, 1,5).

### Ε-ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΙΑ $\alpha_1=0,34, 0,45, 1,5$

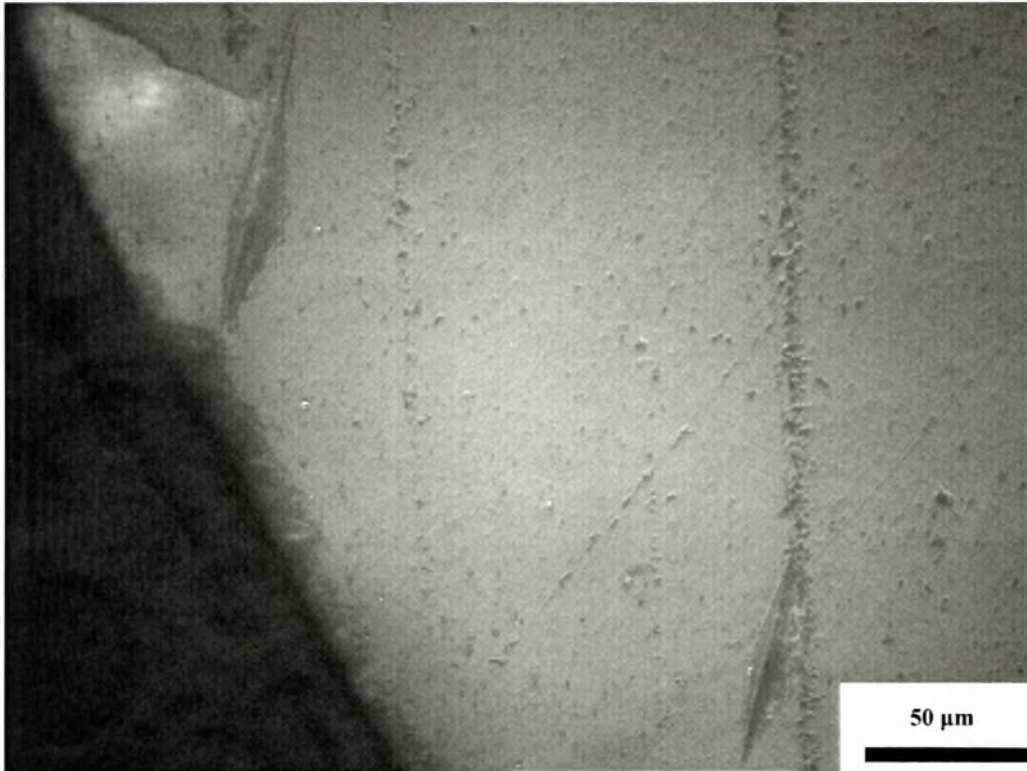


Σχήμα 4.27. Τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε για  $\alpha_1=0,34, \alpha_1=0,45$  και  $\alpha_1=1,5$  συναρτήσει της απόστασης των ιχνών από την επιφάνεια του δοντιού

Οι διακυμάνσεις στους υπολογισμούς του μέτρου ελαστικότητας κυρίως στο σμάλτο αλλά και στην οδοντίνη θεωρούμε ότι προήλθαν λόγω διαδοχικών διεισδύσεων στο ίδιο δοκίμιο και πιθανόν λόγω λανθασμένων δικών μας υπολογισμών στις διαγώνιους των αποτυπωμάτων εξαιτίας ατελειών που προϋπήρχαν της διείσδυσης στο δόντι ή και που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής.

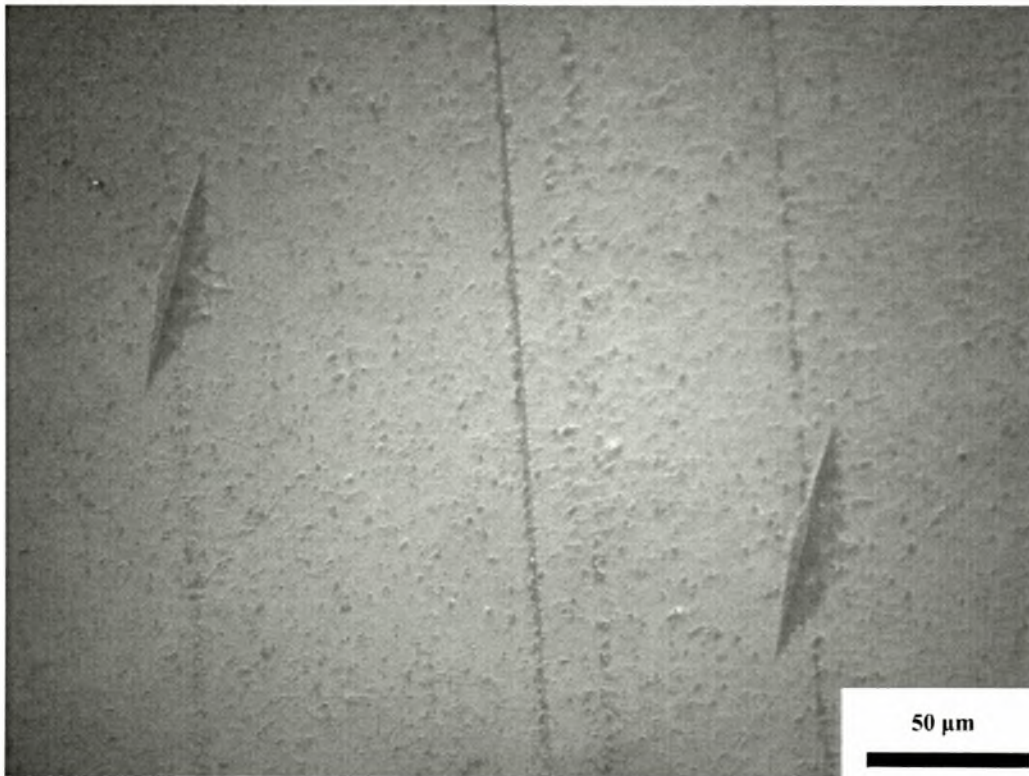
#### 4.4 Αποτελέσματα από Προφίλ 2 μικροσκληρομέτρησης κατά Κνοορ

Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από το 2<sup>ο</sup> profile μικροσκληρομέτρησης κατά Κνοορ. Όπως και πριν, τα ίχνη στο σμάλτο (Σχήμα 4.28 έως 4.33) είναι αισθητά μεγαλύτερα από αυτά στην οδοντίνη (Σχήμα 4.33 έως 4.38). Το Σχήμα 4.33 συμπεριλαμβάνει το δέκατο και το εντέκατο ίχνος του 2<sup>ου</sup> profile. Όπως φαίνεται, το σημείο αυτό είναι η αμυλοδοντική συμβολή, το όριο δηλαδή από το οποίο περνάμε από το σμάλτο στην οδοντίνη του δοντιού.

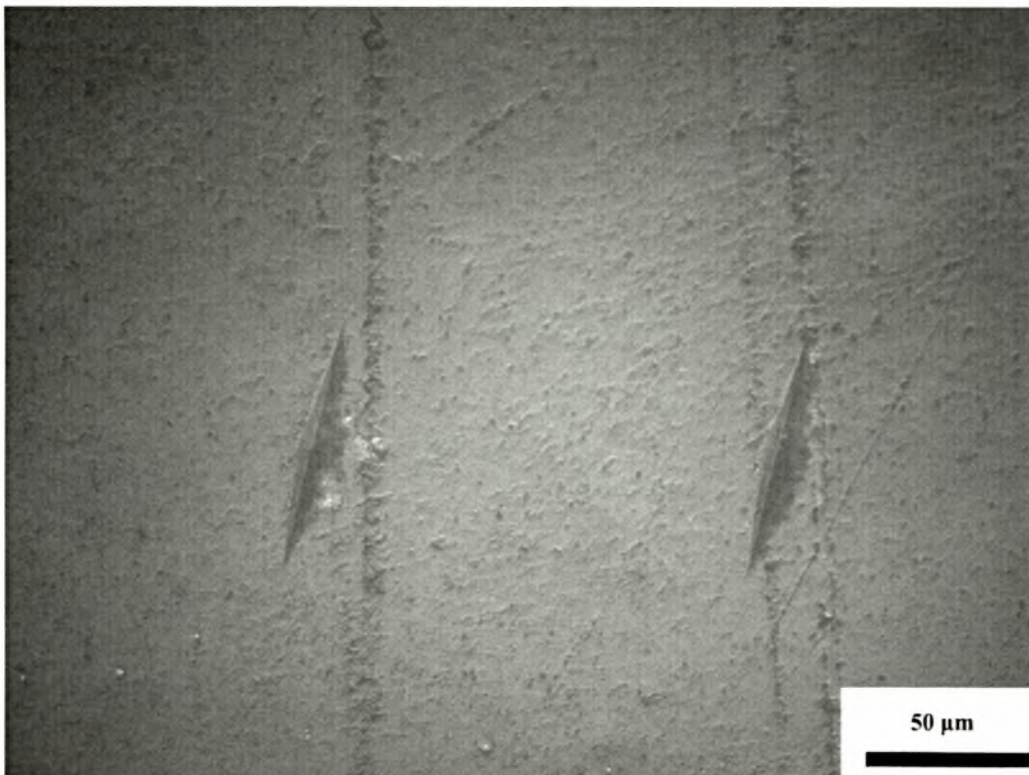


Σχήμα 4.28. Φωτογραφία (500x) από το πρώτο και δεύτερο ίχνος στο σμάλτο (2<sup>ο</sup> profile)

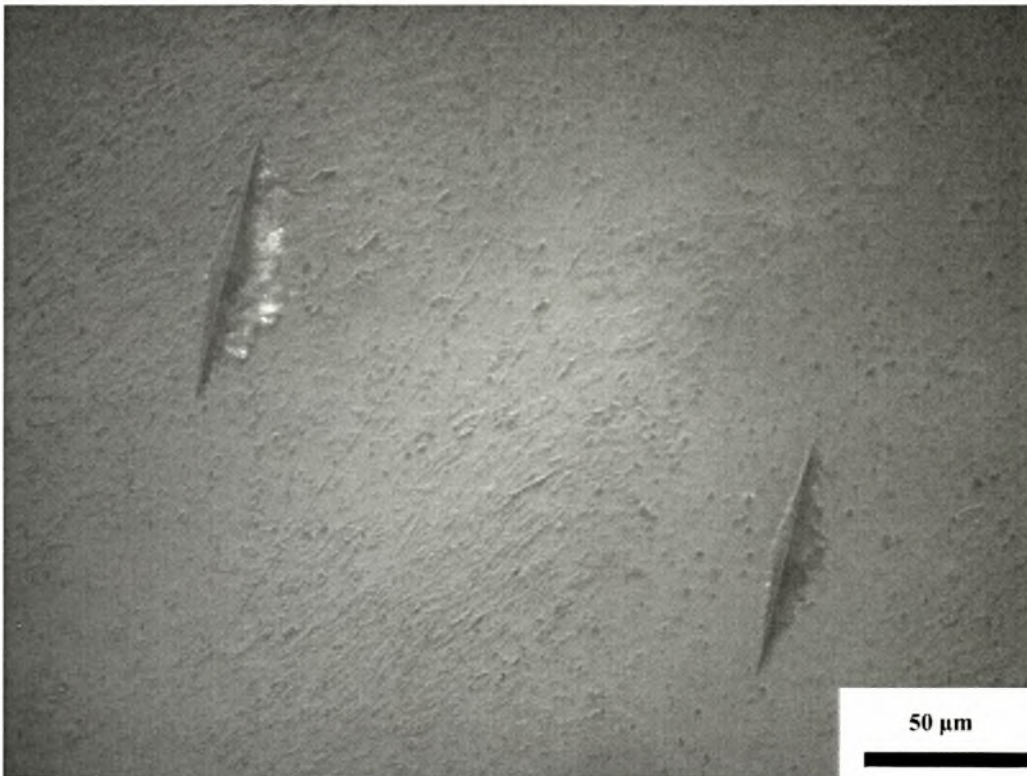




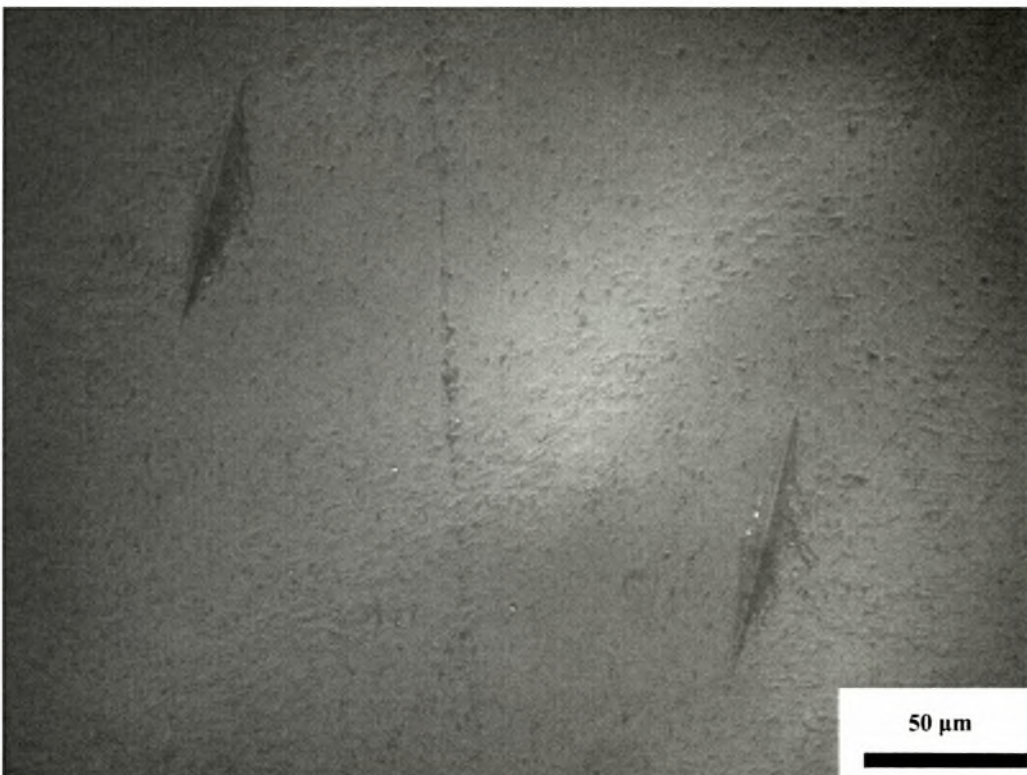
Σχήμα 4.29. Φωτογραφία (500x) από το τρίτο και τέταρτο ίχνος στο σμάλτο (2<sup>ο</sup> profile)



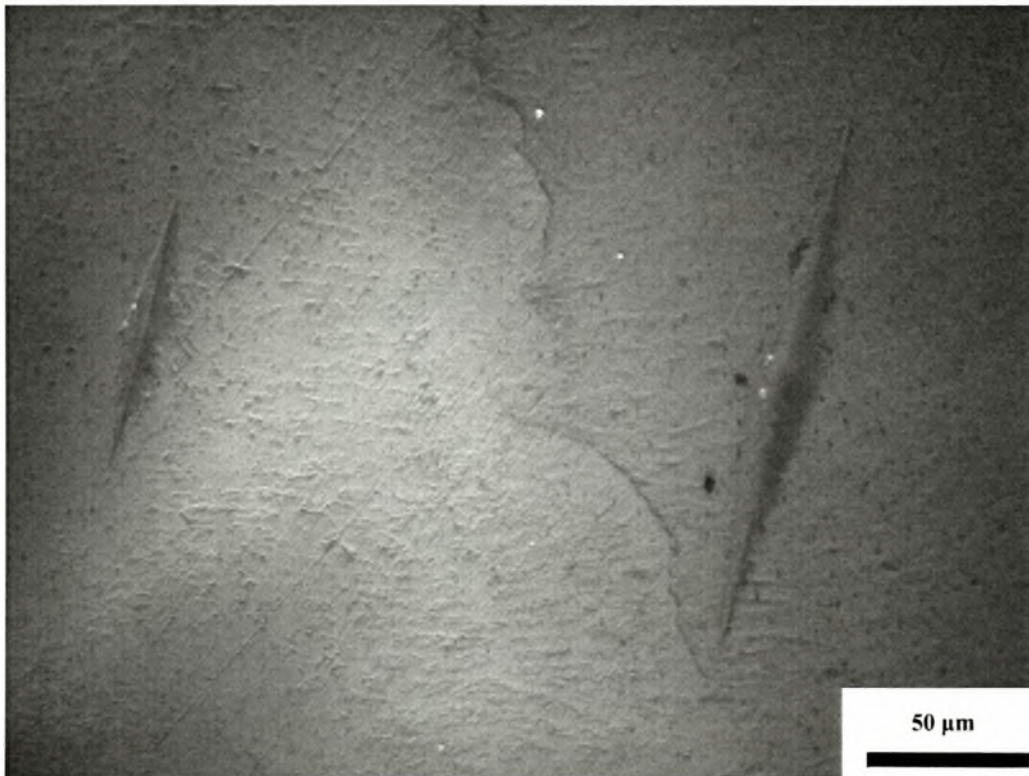
Σχήμα 4.30. Φωτογραφία (500x) από το πέμπτο και έκτο ίχνος στο σμάλτο (2<sup>ο</sup> profile)



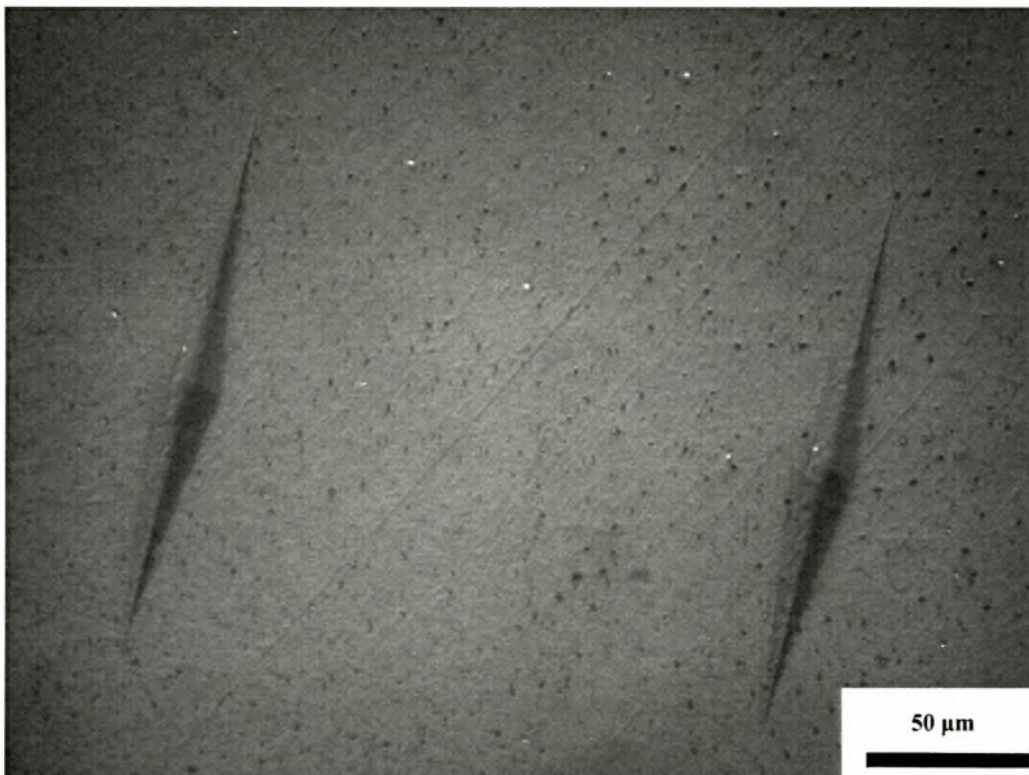
Σχήμα 4.31. Φωτογραφία (500x) από το έβδομο και όγδοο ίχνος στο σμάλτο (2° profile)



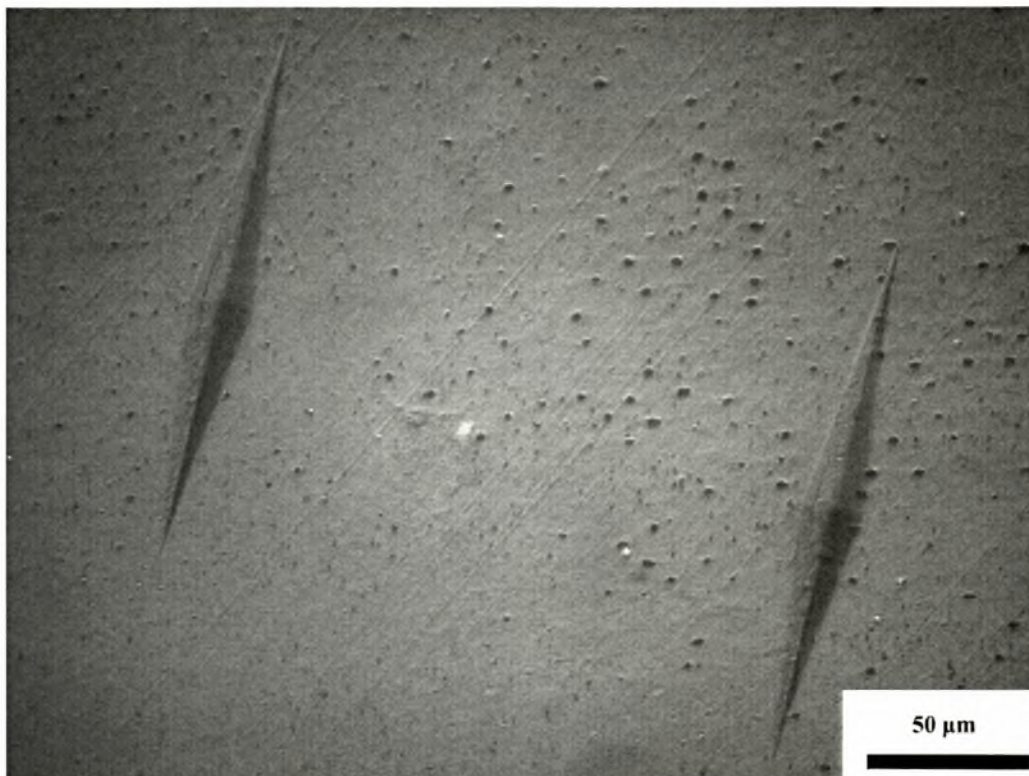
Σχήμα 4.32. Φωτογραφία (500x) από το ένατο και δέκατο ίχνος στο σμάλτο (2° profile)



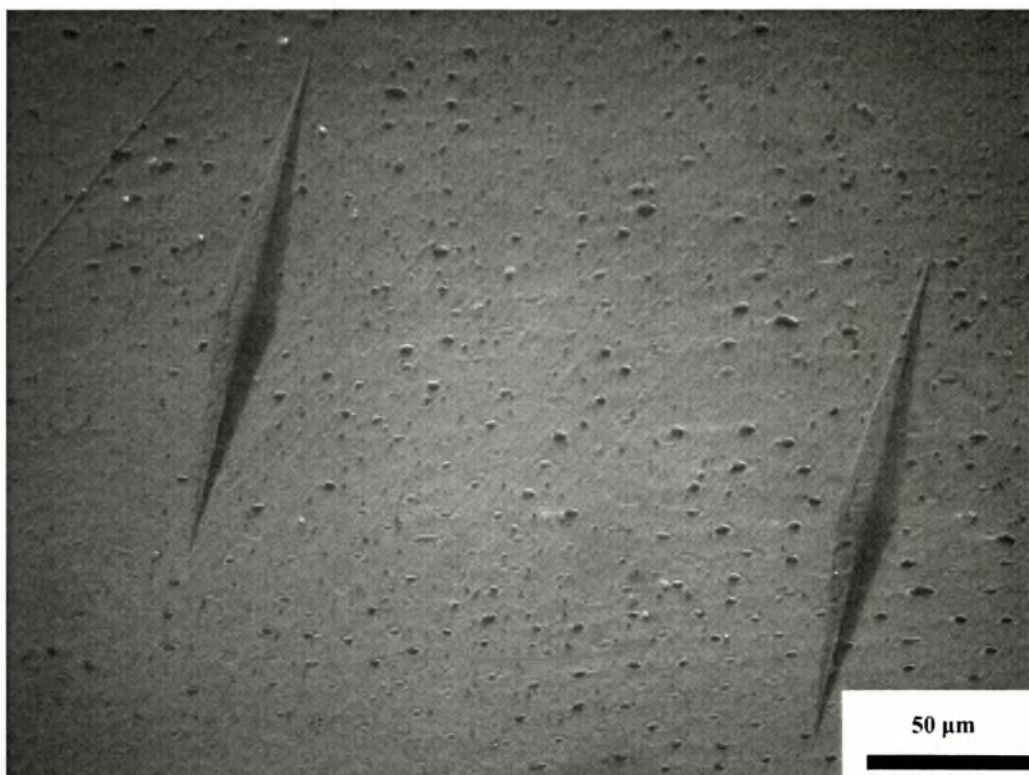
Σχήμα 4.33. Φωτογραφία (500x) από δέκατο ίχνος στο σμάλτο και πρώτο ίχνος στην οδοντίνη (2<sup>ο</sup> profile)



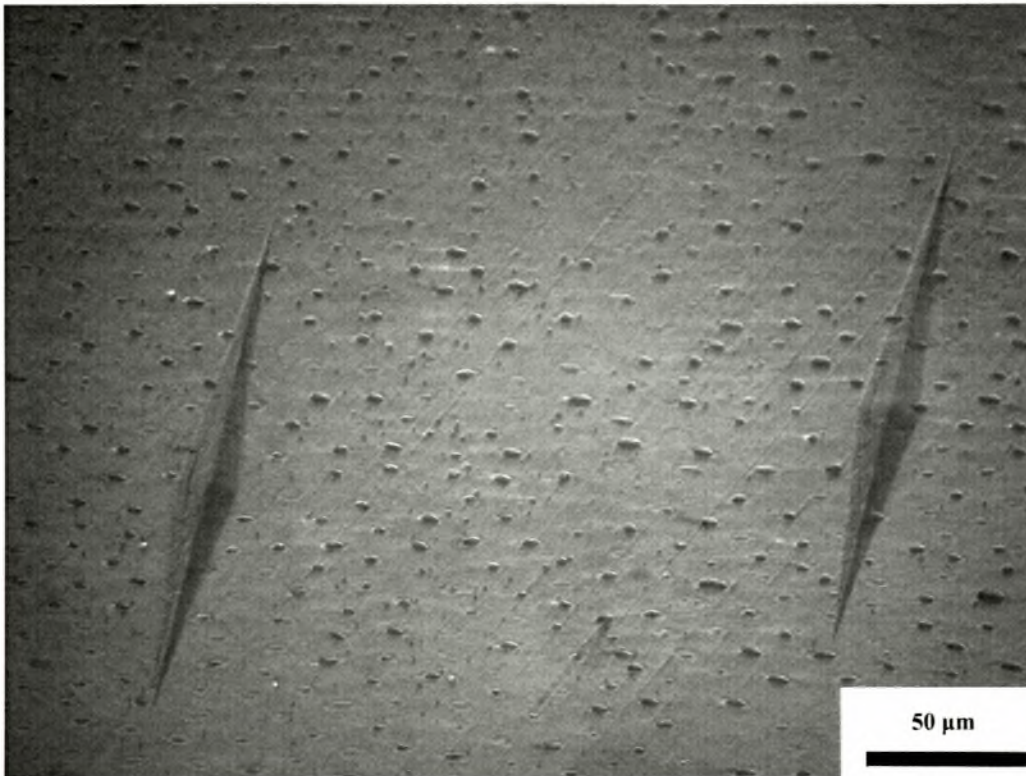
Σχήμα 4.34. Φωτογραφία (500x) από πρώτο και δεύτερο ίχνος στην οδοντίνη (2<sup>ο</sup> profile)



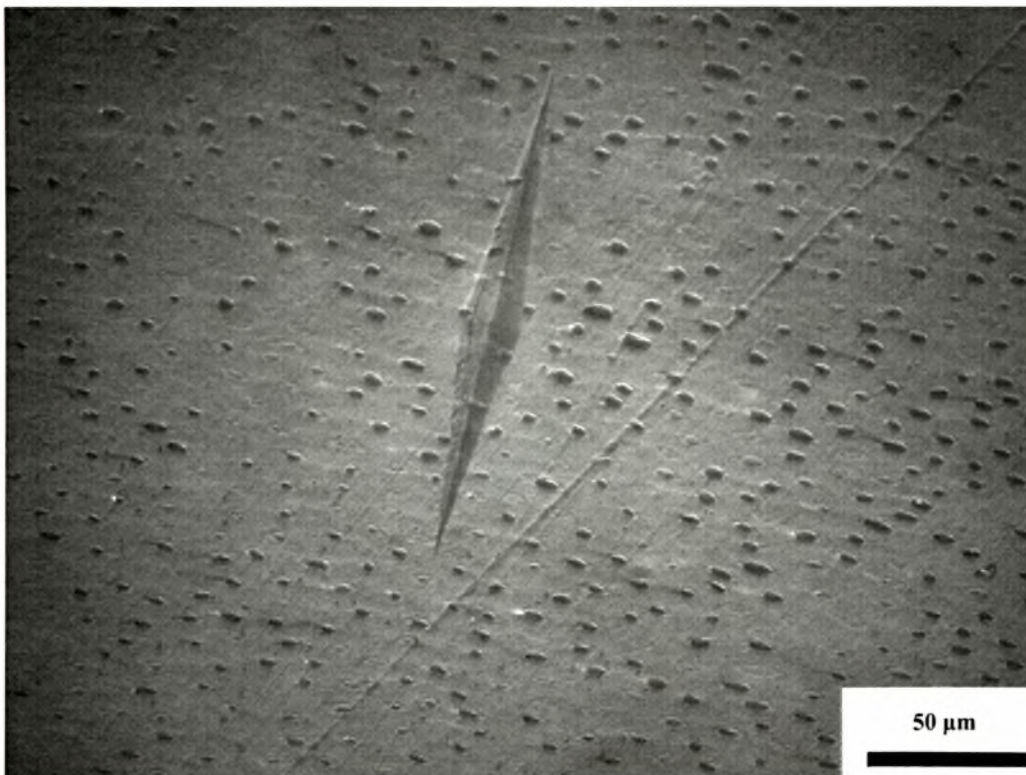
Σχήμα 4.35. Φωτογραφία (500x) από τρίτο και τέταρτο ίχνος στην οδοντίνη (2<sup>ο</sup> profile)



Σχήμα 4.36. Φωτογραφία (500x) από πέμπτο και έκτο ίχνος στην οδοντίνη (2<sup>ο</sup> profile)



**Σχήμα 4.37. Φωτογραφία (500x) από έβδομο και όγδοο ίχνος στην οδοντίνη (2° profile)**

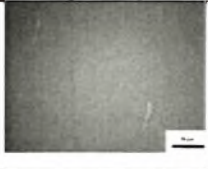

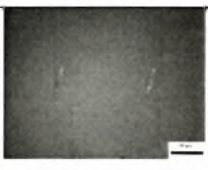
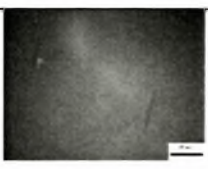
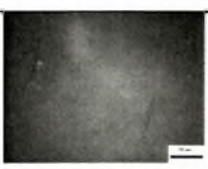
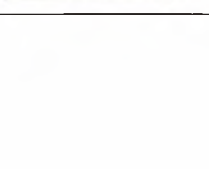



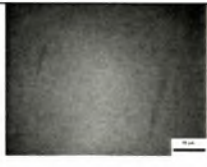
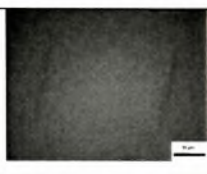

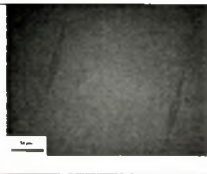


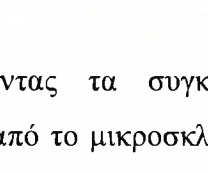
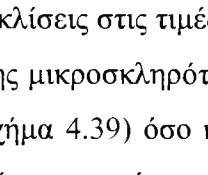
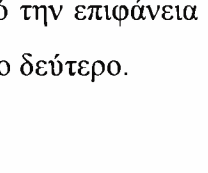


**Σχήμα 4.38. Φωτογραφία (500x) από ένατο και δέκατο ίχνος στην οδοντίνη (2° profile)**

Στον Πίνακα 4.3 που παρατίθεται παρακάτω συγκεντρώσαμε τα αποτελέσματα της σκληρότητας που πήραμε από την μικροσκληρομέτρηση Κνοορ και αυτά από το οπτικό μικροσκόπιο με χρήση της Εξίσωσης 4.1.

Οι μετρήσεις M1 με M10 αναφέρονται στο σμάλτο ενώ οι M11 με M20 στην οδοντίνη. Στην πρώτη στήλη (\*A) δίνεται η αρίθμηση των ιχνών ενώ στην δεύτερη οι αντίστοιχες φωτογραφίες (x1000). Στην τρίτη (α) και πέμπτη (b) στήλη δίνονται αντίστοιχα τα μήκη των μεγάλων και μικρών διαγωνίων που υπολογίσαμε από το οπτικό μικροσκόπιο. Η τέταρτη στήλη (a) περιέχει τις μετρήσεις των μεγάλων διαγωνίων που υπολογίσθηκαν από το μικροσκληρόμετρο. Στις δύο τελευταίες στήλες δίνονται οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας Κνοορ όπως αυτές υπολογίσθηκαν από το μικροσκληρόμετρο (HK<sub>1</sub>) και το οπτικό μικροσκόπιο (HK<sub>2</sub>) αντίστοιχα.

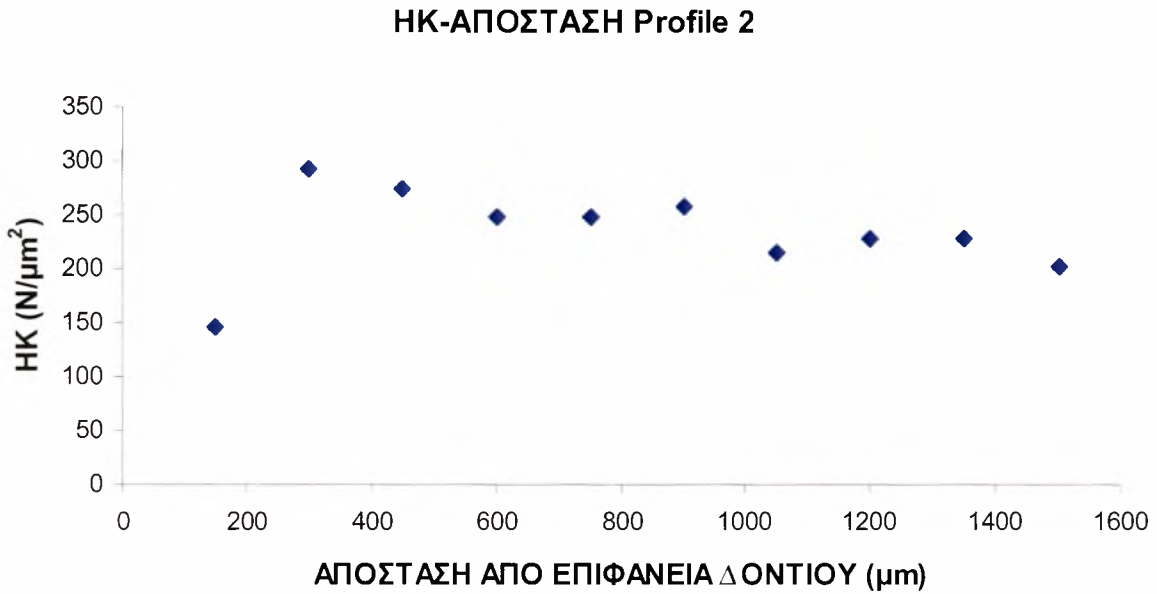
**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης**

*/A	Φωτογραφία (x500)	α(μm)	α (μm)	b(μm)	HK <sub>1</sub>	HK <sub>2</sub>
M1		98,837	97,53	12,791	149,6	145,464
M2		69,767	67,49	9,302	312,4	291,940
M3		72,093	68,8	9,302	300,6	273,406
M4		75,581	72,95	10,465	267,4	248,753
M5		75,581	75,21	10,465	251,5	248,753
M6		74,419	73,05	9,302	266,6	256,582
M7		81,395	79,99	10,465	222,4	214,486
M8		79,070	75,01	10,465	252,9	227,285
M9		79,070	74,69	9,302	255,1	227,285
M10		83,721	82,10	11,628	211,1	202,733

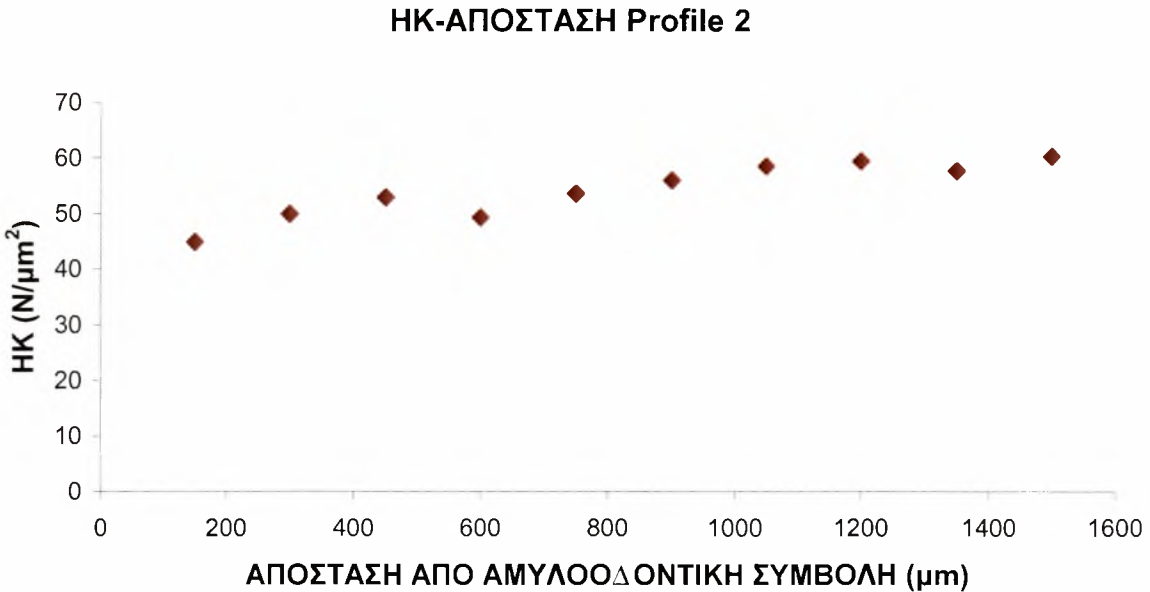
M10						
M11		177,907	169,54	24,419	49,5	44,896
M12		168,605	159,11	22,093	56,2	49,987
M13		163,953	154,63	22,093	59,5	52,863
M14		169,767	157,08	20,93	57,7	49,305
M15		162,791	154,32	19,767	59,7	53,621
M16		159,302	150,64	19,767	62,7	55,995
M17		155,814	148,62	18,605	64,4	58,53
M18		154,651	146,59	18,605	66,2	59,414
M19		156,977	147,60	17,442	65,3	57,666
M20		153,488	147,57	19,767	65,3	60,318

Παρατηρώντας τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τιμών μικροσκληρότητας που υπολογίσαμε από το μικροσκληρόμετρο ( $HK_1$ ) και το οπτικό μικροσκόπιο ( $HK_2$ ) δεν εντοπίζουμε ιδιαίτερες αποκλίσεις στις τιμές των  $HK_1$  και  $HK_2$ .

Οι τιμές της μικροσκληρότητας που υπολογίσαμε παρουσιάζονται γραφικά παρακάτω τόσο για το σμάλτο (Σχήμα 4.39) όσο και για την οδοντίνη (Σχήμα 4.40) σε συνάρτηση με την απόσταση του ίχνους από την επιφάνεια του δοντιού για το πρώτο και την απόσταση από την αμυλοδοντική συμβολή για το δεύτερο.



Σχήμα 4.39. Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στο σμάλτο σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια του δοντιού



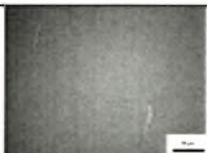


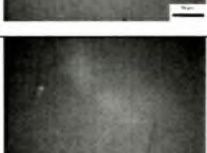

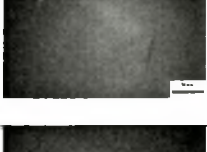
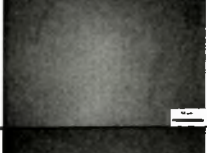



Σχήμα 4.40. Η σκληρότητα που υπολογίσαμε στην οδοντίνη σε σχέση με την απόσταση από την αμυλοδοντική συμβολή

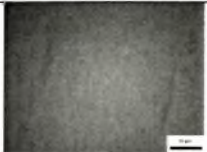
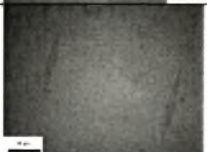

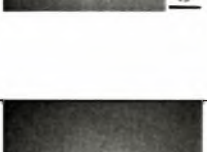

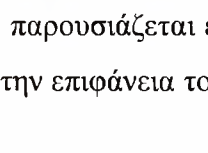



Παρατηρούμε πως στο σμάλτο μικροσκληρότητα Κnoop κυμαίνεται από 149 έως 292 KHN και στην οδοντίνη από 44 έως 61 KHN.

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε από την εξίσωση 4.2 για τρεις διαφορετικές τιμές του  $\alpha_1$ . Οι τιμές 0.34 και 0.45 έχουν προκύψει μέσα από πειραματική διαδικασία ενώ η τιμή 1.5 προέκυψε από θεωρητικό υπολογισμό του Marshall.

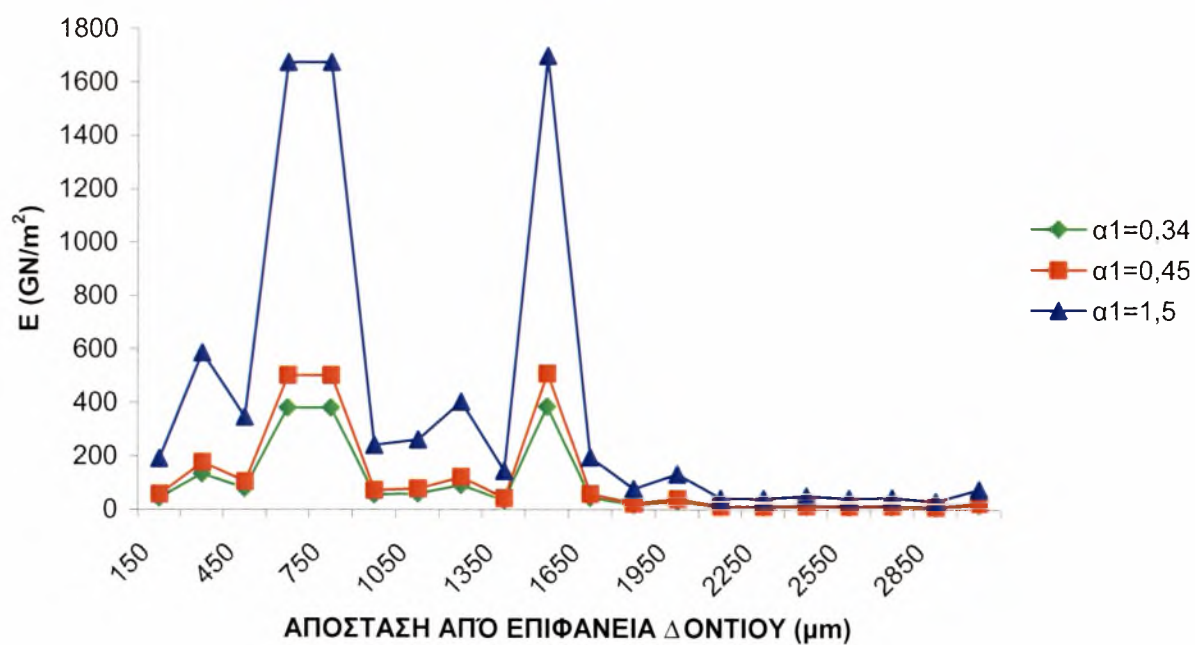
**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας για  $\alpha_1=0,34, 0,45, 1,5$**

*/A	Φωτογραφία (x500)	E(GPa) 0.34	E(GPa) 0.45	E(GPa) 1.5
M1		43,18728886	57,15964706	190,5321569
M2		133,0472713	176,0919768	586,9732559
M3		78,46638587	103,8525695	346,1752318
M4		379,5571031	502,3549895	1674,516632
M5		379,5571031	502,3549895	1674,516632
M6		54,66358426	72,34886152	241,1628717
M7		59,22577526	78,3870555	261,290185
M8		91,36370811	120,9225548	403,0751828
M9		32,94532085	43,60410112	145,3470037
M10		384,9340593	509,4732898	1698,238497
M10				
M11		44,17379962	58,46532302	194,8844101
M12		17,34050342	22,9506663	76,50222099
M13		29,90605479	39,5815431	131,938477

M14		9,470477911	12,53445606	41,7815202
M15		9,302255851	12,31180921	41,03936405
M16		11,27404194	14,9215261	49,73842032
M17		9,188032049	12,16063065	40,53543551
M18		9,738492763	12,8891816	42,96393866
M19		6,510434488	8,616751529	28,7225051
M20		16,95712195	22,44324964	74,81083214

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα γράφημα του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της απόστασης των ιχνών από την επιφάνεια του δοντιού για τις τρεις τιμές του  $\alpha_1$  (0,34, 0,45, 1,5).

#### E-ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΓΙΑ $\alpha_1 = 0,34, 0,45, 1,5$



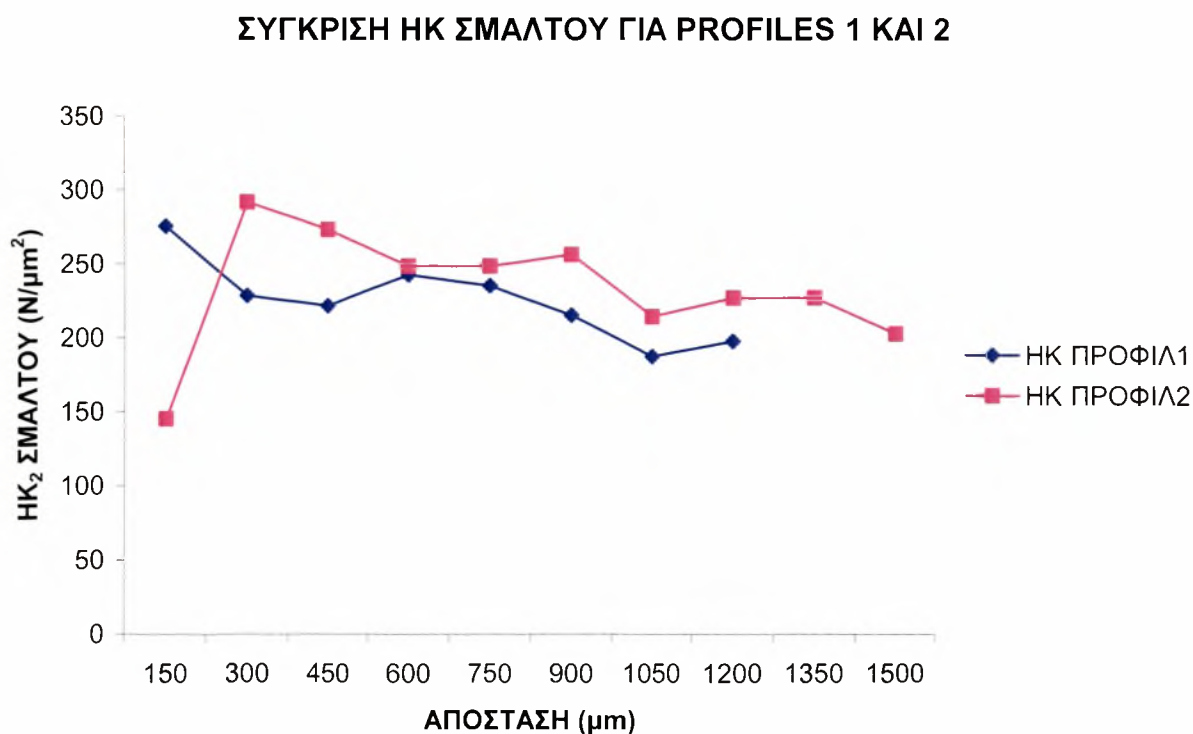
Σχήμα 4.41. Τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε για  $\alpha_1=0,34$ ,  $\alpha_1=0,45$  και  $\alpha_1=1,5$  συναρτήσει της απόστασης των ιχνών από την επιφάνεια του δοντιού

Από το Σχήμα 4.41 παρατηρούμε σημαντικές αποκλίσεις για τις M4, M5 και M10 για  $\alpha_1=0,34$ . Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός πως για τα ίχνη ατά βρήκαμε μεγαλύτερη τιμή για τον λόγο  $b'/a'$  σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις. Αυτό συνέβη λόγω διαδοχικών διεισδύσεων στο ίδιο δοκίμιο και λόγω λανθασμένων δικών μας υπολογισμών στις διαγώνιους των αποτυπωμάτων εξαιτίας ατελειών που προϋπήρχαν της διεισδύσης στο δόντι ή και που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής.

#### 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων από το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> Profile

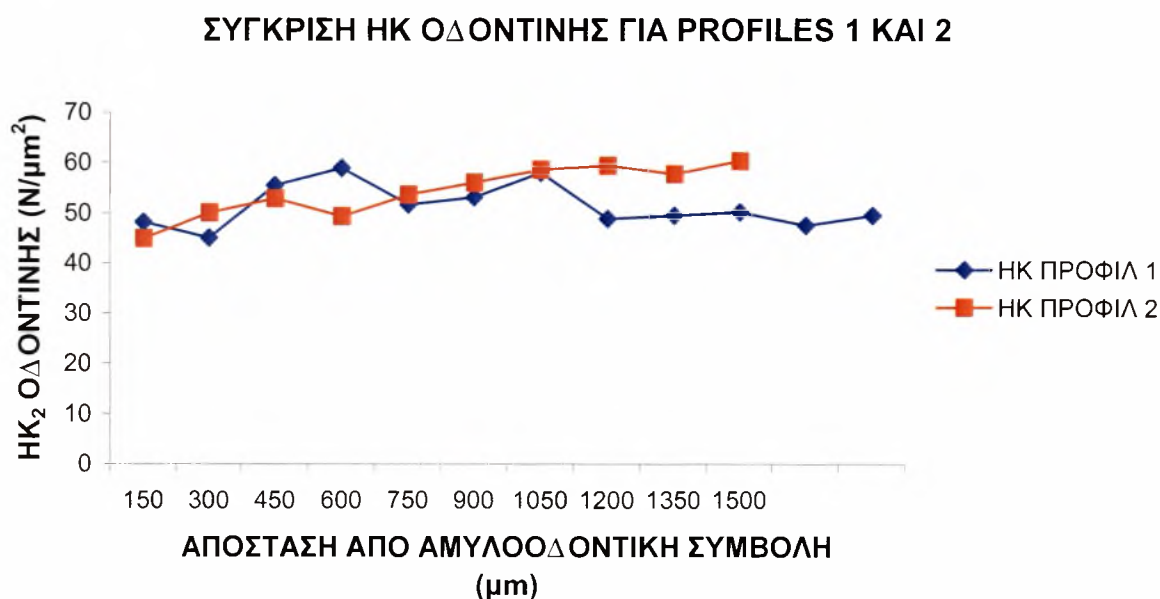
Μετά από την ολοκλήρωση των μετρήσεων για τα δύο προφίλ, τον υπολογισμό των τιμών της σκληρότητας Κnoop και του μέτρου ελαστικότητας, επόμενο βήμα της εργασίας αυτής αποτελεί η σύγκριση των τιμών αυτών.

Όπως μπορούμε να δούμε από τα Σχήματα 4.25 και 4.39, οι τιμές της σκληρότητας Κnoop για το σμάλτο του δοντιού κυμαίνονται από 185 έως 285 KHN για το 1<sup>ο</sup> profile και 149 έως 292 KHN για το 2<sup>ο</sup> profile. Οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα κοντά. Συγκεντρωτικά, τα διαγράμματα για τα δύο profiles στην περιοχή του σμάλτου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.42.



Σχήμα 4.42. Σύγκριση των τιμών σκληρότητας Κnoop για Προφίλ 1 και 2 στην περιοχή του σμάλτου

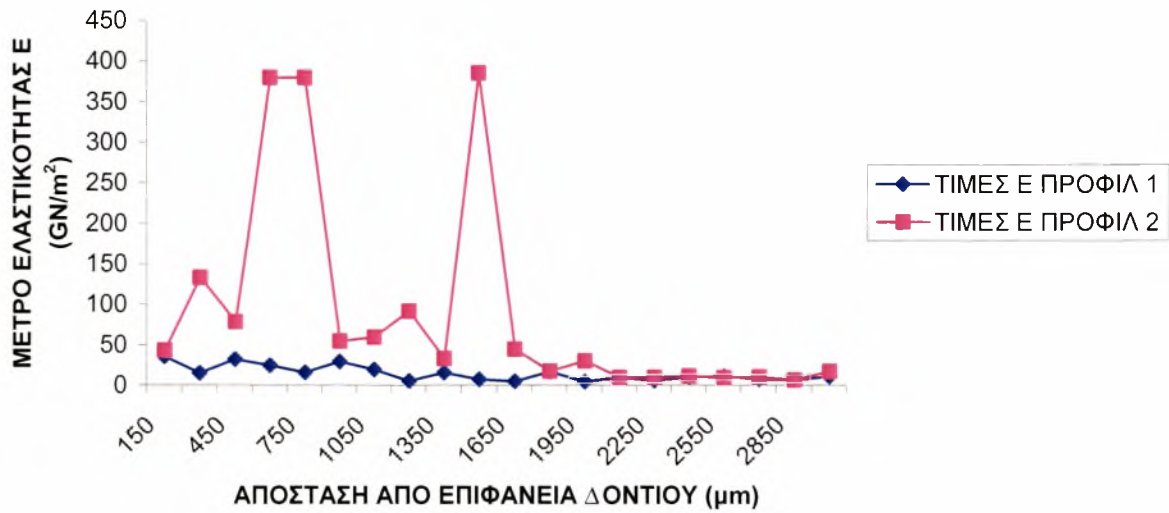
Με τον ίδιο τρόπο παρατηρούμε από Σχήμα 4.26 και 4.40 ότι οι τιμές της σκληρότητας Κποορ για την οδοντίνη κυμαίνονται για το 1<sup>ο</sup> profile από 44 έως 58 ΚΗΝ ενώ για το 2<sup>ο</sup> profile από 44 έως 61 ΚΗΝ. Και εδώ για ευκολότερη σύγκριση συγκεντρώσαμε τα διαγράμματα των δύο προφίλ σε ένα (Σχήμα 4.43).



**Σχήμα 4.43. Σύγκριση των τιμών σκληρότητας Κποορ για Προφίλ 1 και 2 στην περιοχή της οδοντίνης**

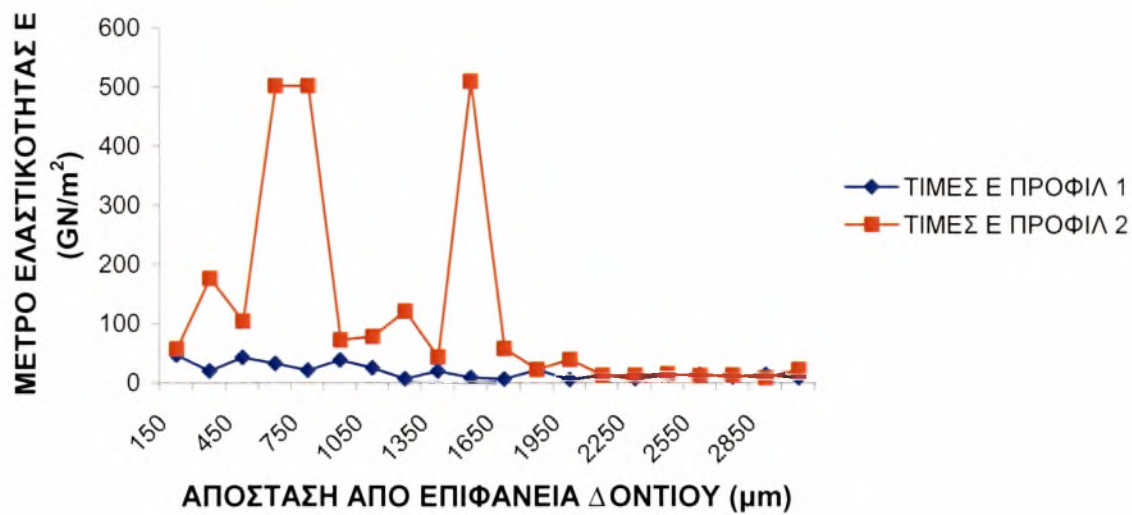
Η ίδια σύγκριση γίνεται και για τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίσαμε για κάθε profile. Τα συγκριτικά διαγράμματα αυτών παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.44, 4.45 και 4.46 για τιμές της  $\alpha_1$  0,34, 0,45 και 1,5 αντίστοιχα.

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ Ε ΓΙΑ PROFILES 1 ΚΑΙ 2 ( $\alpha_1=0,34$ )



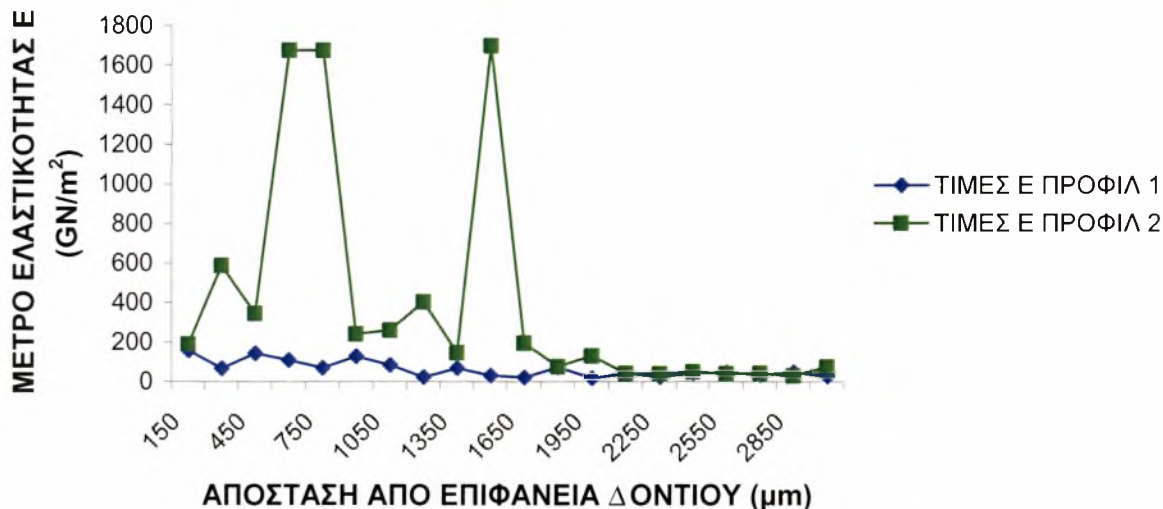
Σχήμα 4.44. Σύγκριση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E για Προφίλ 1 και 2 με  $\alpha_1=0,34$

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ Ε ΓΙΑ PROFILES 1 ΚΑΙ 2 ( $\alpha_1=0,45$ )



Σχήμα 4.45. Σύγκριση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E για Προφίλ 1 και 2 με  $\alpha_1=0,45$

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ Ε ΓΙΑ PROFILES 1 ΚΑΙ 2 ( $\alpha_1=1,5$ )



Σχήμα 4.46. Σύγκριση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας E για Προφίλ 1 και 2 με  $\alpha_1=1,5$

Από την σύγκριση που κάναμε παραπάνω διαπιστώνουμε ότι και για τις τρεις τιμές της σταθεράς  $\alpha_1$  (0,34, 0,45, 1,5) οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας στο σμάλτο είναι σχετικά κοντά εκτός από τρία σημεία (M4,M5,M10) στα οποία υπάρχει μεγάλη απόκλιση στις τιμές του 2<sup>ου</sup> profile από αυτές του 1<sup>ου</sup> profile. Αντιθέτως στην περιοχή της οδοντίνης οι τιμές των δύο profiles βρίσκονται ιδιαίτερα κοντά.

Οι αποκλίσεις κάποιων μετρήσεων που διαπιστώθηκαν στην περιοχή του σμάλτου αποδίδονται στην διαφορετική σειρά των διεισδύσεων στο ίδιο δοκίμιο όπως επίσης και στις διαφορετικές αποστάσεις διείσδυσης σε σχέση με την επιφάνεια του δοντιού για το σμάλτο και σε σχέση με την αμυλοδοντική συμβολή για την οδοντίνη. Τέλος, μια σημαντική αιτία για την ύπαρξη αποκλίσεων είναι η ενδεχόμενη ύπαρξη ρωγμών στο δοκίμιο πριν την διείσδυση και η δημιουργία νέων κατά την διάρκεια αυτής.

#### 4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με βιβλιογραφία (Meredith)

Για να γίνει η σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας στα οποία καταλήξαμε με αυτά της εργασίας του Meredith στην οποία βασιστήκαμε, παραθέτουμε τα αποτελέσματα της εργασίας του σε μορφή πίνακα και παρακάτω παραθέτουμε και τα δικά μας στην ίδια μορφή (Σχήμα 4.44 και 4.46).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοντιού) στο σμάλτο όπως αυτές υπολογίσθηκαν από τον Meredith**

$\alpha_1$	0,34	0,45	1,5
	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (GNm <sup>-2</sup> )
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΝΤΙΟΥ ( $\mu\text{m}$ )			
300	150	199	665
600	416	551	1838
900	195	258	862
1200	77	102	340
1500	219	290	967

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοντιού) στο σμάλτο**

$\alpha_1$	0,34	0,45	1,5
	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ι (GNm <sup>-2</sup> )
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΟΝΤΙΟΥ ( $\mu\text{m}$ )			
150	39	40	174
300	74	98	327
450	55	74	244
600	203	268	890
750	198	261	872
900	43	56	185
1050	39	52	173
1200	48	64	213



**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την αμυλοδοντική συμβολή) στην οδοντίνη όπως αυτές υπολογίσθηκαν από τον Meredith**

$\alpha_1$	0,34	0,45	1,5
	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΑΜΥΛΟΟΔΟΝΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ (μm)			
500	6,5	8,7	29
1000	7,5	9,9	33,2
1500	7,8	10,4	34,7
1200	8,6	11,4	38,1
2000	8,4	11,2	37,3

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: Μέσες αξίες του μέτρου ελαστικότητας (συναρτήσει της απόστασης από την αμυλοδοντική συμβολή) στην οδοντίνη**

$\alpha_1$	0,34	0,45	1,5
	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Ε (GNm <sup>-2</sup> )
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΑΜΥΛΟΟΔΟΝΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ (μm)			
150	29,5	39	130
300	12	16	54
450	17,5	23	77
600	13	17,5	57,5
750	6,5	8,75	30
900	10,5	14	46,5
1050	7	9,5	32,5
1200	9,5	13	43
1350	9	11,5	38
1500	12,5	16	54,5

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα θα διαπιστώσουμε αρχικά πως οι μετρήσεις που πήραμε δεν διαφέρουν εξαιρετικά από αυτές του Meredith. Στο σμάλτο εντοπίζουμε αρκετά μεγάλες διαφορές στις τιμές των μετρήσεων. Ωστόσο αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό μιας και ο Meredith χρησιμοποίησε για το σμάλτο διαφορετικό φορτίο (4,9N) από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία (0,98N). Συνεπώς η παρουσίαση των υπολογισμών του μέτρου ελαστικότητας που υπολόγισε ο Meredith στο σμάλτο γίνεται για ενημέρωση και όχι για σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίσαμε.

Ωστόσο στην οδοντίνη οι τιμές που υπολογίσαμε προσεγγίζουν τις τιμές της εργασίας του Meredith. Αυτό ήταν αναμενόμενο μιας και το φορτίο που χρησιμοποίησε ο Meredith στην εργασία του είναι το ίδιο που εφαρμόσαμε και εμείς στο δοκίμιο.

## Κεφάλαιο 5. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Το φορτίο που επιλέξαμε για τον διεισδυτή είναι 0,98 N τόσο για το σμάλτο όσο και για την οδοντίνη. Το φορτίο αυτό επέφερε ίχνη μεγάλων και μικρών διαγωνίων της τάξης των 70 και 8  $\mu\text{m}$  για το σμάλτο και 150 και 20 $\mu\text{m}$  για την περιοχή της οδοντίνης. Αυτό επέτρεψε την ακριβή εκτίμηση της μικρής διαγωνίου. Ωστόσο είναι προφανές πως κατά την διάρκεια της διείσδυσης προκλήθηκαν επιφανειακές ζημιές στο σμάλτο οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την ρηγμάτωση κάποιων σημείων της επιφάνειας. Οι ζημιές ήταν εμφανείς στα ίχνη των περισσότερων διεισδύσεων. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει διττή σημασία για την παρούσα εργασία. Αρχικά, οι αλλοιώσεις στην επιφάνεια κατέστησαν δύσκολη την ακριβή μέτρηση του μήκους κυρίως της μικρής διαγωνίου. Αν και η θραύση σήμαινε πως γινόταν χρήση ενέργειας για τον σχηματισμό των ρηγμάτων, αυτή η ενέργεια παρείχεται από τον διεισδυτή και η επαναφορά θα μπορούσε να είναι ακόμα ελαστική.

Δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές ζημιές στην επιφάνεια της οδοντίνης και ο μικροσκοπικός έλεγχος δεν έδειξε κάποια ρωγμή. Το κάθε ίχνος κάλυψε μια περιοχή οδοντίνης που περιλαμβάνει μικρά σωληνάκια η παρουσία των οποίων θεωρούμε ότι δεν προκάλεσε σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της σκληρότητας Knoop μιας και αποτελεί μια σχετικά μικρή περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου.

Οι τιμές που υπολογίσαμε για την σκληρότητα Knoop είναι σχετικά κοντά με αυτές που αναφέρονται στην εργασία του Meredith. Ωστόσο μερικά ίχνη στο σμάλτο (Προφίλ 2) παρουσιάζουν απόκλιση τόσο από άλλες μετρήσεις της δικής μας εργασίας (Προφίλ 1) όσο και από τα αποτελέσματα στην εργασία του Meredith.

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας του σμάλτου και της οδοντίνης των ανθρώπινων δοντιών υπολογίσθηκαν με την εισαγωγή των τιμών μεγάλης και μικρής διαγωνίου στην Εξίσωση 4.2. Όπως αναφέρει ο Meredith στην εργασία που εκπόνησε ο ίδιος και η ερευνητική του ομάδα, η αναλογική σταθερά της προαναφερθείσας εξίσωσης  $\alpha_1$ , που υπολογίσθηκε 1,50 από τον Marshall, θεωρείται υψηλή σε σύγκριση με την τιμή 0,45 που προκύπτει από πειραματικές μετρήσεις. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό είναι ότι ο υπολογισμός βασίστηκε σε μια ελλειπτική διείσδυση. Ο Watts υπολόγισε επίσης την τιμή της  $\alpha_1$  στα 0,34 βασισμένος σε μετρήσεις που έκανε σε ποικιλία σύνθετων οδοντικών υλικών. Από τα Σχήματα 4.44, 4.45 και 4.46 που παρατέθηκαν παραπάνω και από τους Πίνακες 4.2 και 4.4 εύκολα διαπιστώνει κανείς πως το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από την τιμή που παίρνει η σταθερά  $\alpha_1$ .

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας στην οδοντίνη δεν απείχαν πολύ στα δύο αυτά profiles που πήραμε. Ωστόσο σημαντικές αποκλίσεις παρατηρήθηκαν σε κάποιες απ' τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας στο σμάλτο.

Η χρήση της τεχνικής με διείσδυση έδειξε πως οι τιμές σκληρότητας Knoop για το σμάλτο και την οδοντίνη μπορούν να υπολογισθούν και να προσεγγίζουν τιμές και αποτελέσματα που απέφεραν παρόμοιες μελέτες άλλων ερευνητών. Ωστόσο οι συνθήκες κάτω απ' τις οποίες αυτοί εργάστηκαν, οι μέθοδοι που χρησιμοποίησαν και τα ιδιαίτερα δεδομένα της κάθε έρευνας είναι αυτά που επιφέρουν ποικίλα αποτελέσματα.

## Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα

Ο υπολογισμός της σκληρότητας και του μέτρου ελαστικότητας στις περιοχές του σμάλτου και της οδοντίνης των ανθρώπινων δοντιών με ακρίβεια είναι εξαιρετικά δυσχερές λόγω του μικρού μεγέθους των δοκιμίων. Μια ακόμη παράμετρο που δυσκόλεψε την έρευνα αποτελεί η δημιουργία ρωγμών κατά την διείδυση κυρίως στην περιοχή του σμάλτου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια την μικρή και την μεγάλη διαγώνιο, συνεπώς να εμφανίζονται κάποιες μετρήσεις δυσανάλογες τόσο όσον αφορά την σκληρότητα όσο και τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας κάποιων ιχνών.

Από τους υπολογισμούς που κάναμε διαπιστώνουμε ότι για το 1<sup>ο</sup> profile οι τιμές μικροσκληρότητας κυμαίνονται από 197 έως 275 KHN στο σμάλτο και από 44 έως 58 KHN για την οδοντίνη. Οι υπολογισμοί του 2<sup>ο</sup> profile ήταν από 145 KHN έως 291 για το σμάλτο και από 49 μέχρι 60 KHN για την οδοντίνη. Τόσο στο σμάλτο όσο και στην οδοντίνη οι τιμές της σκληρότητας ήταν σχετικά κοντά και για τα δύο profiles.

Όσον αφορά τους υπολογισμούς για το μέτρο ελαστικότητας, για το 1<sup>ο</sup> profile και για  $\alpha_1=0,34$  οι τιμές στο σμάλτο ήταν από 5 έως 35 GPa και στην οδοντίνη από 4 έως 16 GPa. Για  $\alpha_1=0,45$  οι τιμές στο σμάλτο ήταν από 6 έως 47 GPa ενώ στην οδοντίνη από 5 μέχρι 20 GPa ενώ για  $\alpha_1=1,5$  οι τιμές κυμαίνονταν από 22 έως 156 GPa και από 21 έως 67 GPa για το σμάλτο και την οδοντίνη αντίστοιχα.

Στο 2<sup>ο</sup> profile οι τιμές που πήραμε για  $\alpha_1=0,34$  ξεκινούσαν από 43 έως 379 GPa για το σμάλτο και από 9 έως 29 GPa για την οδοντίνη ενώ για  $\alpha_1=0,45$  στο σμάλτο υπολογίσαμε από 43 έως 509 GPa ενώ στην οδοντίνη από 12 μέχρι 23 GPa. Τέλος για  $\alpha_1=1,5$  πήραμε τιμές από 145 έως 1698 GPa και 28 έως 131 GPa για σμάλτο και οδοντίνη αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας των δύο profiles εντοπίζουμε μεγάλη διαφορά στους υπολογισμούς του 2<sup>ο</sup> profile στην περιοχή του σμάλτου σε σχέση με τις τιμές του πρώτου. Η διαφορά αυτή προκύπτει από αποκλίσεις που εντοπίστηκαν σε τρεις μετρήσεις του 2<sup>ο</sup> profile και που αποδίδονται στην διαφορετική σειρά των διειδύσεων στο ίδιο δοκίμιο όπως επίσης και στις διαφορετικές αποστάσεις διείδυσης σε σχέση με την επιφάνεια του δοντιού για το σμάλτο και σε σχέση με την αμυλοδοντική συμβολή για την οδοντίνη.

## Κεφάλαιο 7. Προτεινόμενη έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υπολογίσαμε την μικροσκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας στο ανθρώπινο σμάλτο και στην οδοντίνη με χρήση τεχνικής διείσδυσης Knoop. Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν ο υπολογισμός κάποιων ιδιαίτερα μεγάλων τιμών μικροσκληρότητας και μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή του σμάλτου. Αντικείμενο μελλοντικής μελέτης θα μπορούσε να αποτελέσει η βελτίωση των μετρήσεων στο σμάλτο. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την χρήση δοντιών χωρίς ατέλειες για την αποτύπωση καθαρότερων και πιο ευανάγνωστων ίχνων. Μια άλλη λύση στο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ενδεχομένως να είναι η χρήση μικρότερων φορτίων για αποφυγή δημιουργίας ρωγμών κατά την διείσδυση. Η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου επίσης θα έδινε πιθανότητα σαφέστερες μετρήσεις και την δυνατότητα για ακριβέστερο υπολογισμό των διαγωνίων και κατά συνέπεια των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων των ανθρώπινων δοντιών. Τέλος μια ακόμη πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος αποτελεί η χρήση ναοσκληρομέτρου στο οποίο λόγω της εφαρμογής μικρότερου βάρους παίρνουμε καθαρότερα ίχνη άρα πιο αξιόπιστες μετρήσεις.

Οι συνθήκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τον υπολογισμό βασικών μηχανικών ιδιοτήτων των ανθρώπινων δοντιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την περαιτέρω προσπάθεια για ακριβέστερους υπολογισμούς των ιδιοτήτων αυτών.

# Βιβλιογραφία

## *βιβλιογραφία*

- [1] Meredith M., Sherriff M. and Swanson S.A.V (1996) Measurement of the microhardness and Young's modulus of human enamel and dentine using an indentation technique.
- [2] Marshall D. B., Noma T. and Evans A. G. (1982) A simple method for determining elastic-modulus-to hardness ratios using Knoop indentation measurements. *Comm.Am. Ceram. Soc.*65, 175-176.
- [3] Lawn B. R. and Howes V. R. (1981) Elastic recovery at hardness indentations. *J. mater. Sci.* 16, 2745-2752
- [4] Habelitz S., Marshall S.J., Marshall Jr. G.W. and Balooch M.(2000) Mechanical properties of human dental enamel on the nanometre scale

## *Δικτυακοί τόποι*

[5] "Wikipedia."

<http://el.wikipedia.org>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000100708



