

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΑΡΙΩΝ ΤΗΣ ΟΔΟΝΤΙΝΗΣ

Α.Δ. Πάσσος, Σ.Β. Παράς

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ

Δ.Τζιαφάς

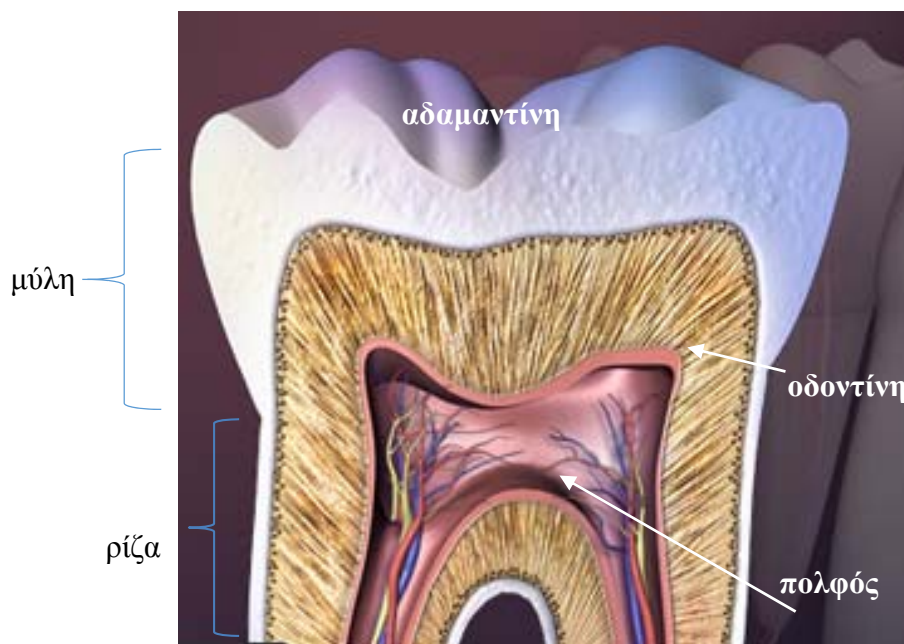
Εργαστήριο Ενδοδοντολογίας, Οδοντιατρική Σχολή, ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η Οδοντιατρική κλινική πράξη προσανατολίζεται στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών θεραπείας, οι οποίες θα εξασφαλίζουν την ακεραιότητα και υγιή λειτουργία του συμπλέγματος των ιστών πολφού-οδοντίνης, που αποτελεί τη βασική σκελετική δομή του δοντιού και το ζωτικό τμήμα του. Στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση του γνωστικού επιπέδου στο οποίο βρίσκεται αυτή τη στιγμή η μελέτη των φαινομένων μεταφοράς μάζας, θερμότητας και ορμής δια μέσου των σωληναρίων της οδοντίνης. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην κατανόηση των χαρακτηριστικών ροής του ρευστού που περιέχεται στους αυλούς των σωληναρίων όταν επιδρούν διαφορετικά εξωτερικά ερεθίσματα. Παράλληλα πραγματοποιείται προκαταρκτική μελέτη με χρήση Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) για την προσομοίωση του πεδίου ροής του ρευστού.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης θεωρείται απαραίτητη η γνώση των βασικών στοιχείων ανατομίας των ανθρώπινων δοντιών. Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1** το δόντι εμφανίζει δύο βασικά τμήματα: τη μύλη και τη ρίζα. Η μύλη είναι 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 διαχωρίζεται από τη ρίζα με μια νοητή γραμμή που ονομάζεται αυχέννας του δοντιού.



Σχήμα 1: Ανατομία ανθρώπινου δοντιού^[1].

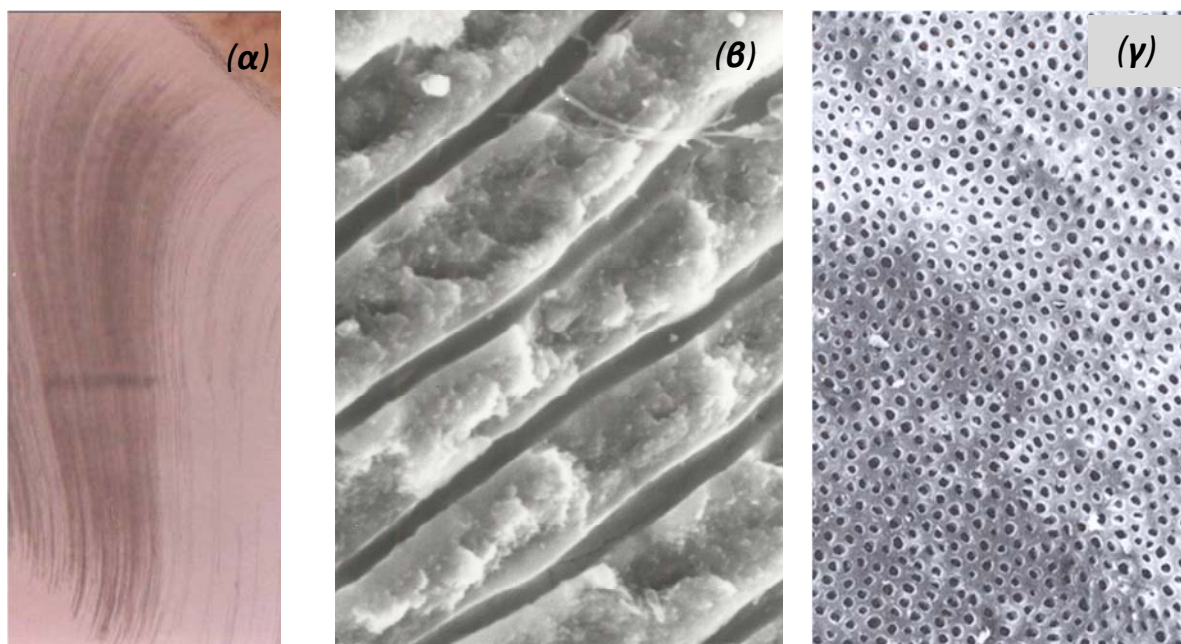
Οι βασικοί ιστοί από τους οποίους αποτελείται το ανθρώπινο δόντι είναι οι εξής:

Αδαμαντίνη: Η αδαμαντίνη είναι ένας ακύτταρος πρισματικός ιστός επιθηλιακής προέλευσης, που καλύπτει την ανατομική μύλη των δοντιών. Το πάχος της μπορεί να κυμαίνεται από 2.5 mm στην κορυφή των δοντιών, έως μηδενικό στους ανατομικούς αυχένες των δοντιών. Η ώριμη ανθρώπινη αδαμαντίνη αποτελείται κατά μέσο όρο από 96% κ.β. ανόργανες ουσίες, 3% κ.β. νερό και μόλις το 1% κ.β. οργανικές ουσίες^[2].

Πολφός: Ο πολφός αποτελεί το ζωτικό ιστό του δοντιού και περιβάλλεται από την οδοντίνη. Στον πολφό βρίσκονται τα νεύρα και τα αιμοφόρα αγγεία του δοντιού ενώ η σπουδαιότητά του έγκειται στο γεγονός ότι τα κύτταρά του έχουν την ικανότητα να μετατρέπονται σε οδοντοβλάστες, τα κύτταρα που είναι υπεύθυνα για τον σχηματισμό της οδοντίνης. Η κλινική εκμετάλλευση της δυνατότητας αυτής του πολφού αποτελεί τη βάση για τη θεραπεία του συμπλέγματος οδοντίνης-πολφού^[3].

Οδοντίνη: Η οδοντίνη αποτελεί τον κύριο ενασβεστωμένο δομικό ιστό του δοντιού. Ορίζεται εξωτερικά από την αδαμαντινο-οδοντινική σύναψη στη μύλη και την οστεϊνο-οδοντινική σύναψη στη ρίζα. Ο ιστός αυτός σχηματίζεται από τους οδοντοβλάστες μέσω μιας κυτταρικής διαδικασίας που οδηγεί στην περίοδο ανάπτυξης του δοντιού στον σχηματισμό της πρωτογενούς οδοντίνης και κατά την περίοδο λειτουργίας του πλήρως αναπτυγμένου δοντιού στον σχηματισμό της δευτερογενούς οδοντίνης^[2]. Η επίδραση εξωγενών παραγόντων μπορεί να προκαλέσει το σχηματισμό τριτογενούς οδοντίνης. Η ώριμη ενασβεστωμένη οδοντίνη περιέχει 22% κ.ο. οργανικές ουσίες, 68% κ.ο. ανόργανες και 10% κ.ο. νερό^[4].

Το σκληρό οδοντινικό υπόστρωμα, διατρέχεται σε όλη του τη μάζα από παράλληλα **σωληνάρια** τα οποία κατευθύνονται ακτινωτά από τον πολφικό θάλαμο προς την αδαμαντινο-οδοντινική σύναψη. Η πορεία τους δεν ακολουθεί ευθεία γραμμή, αλλά είναι ελαφρά ελικοειδής σε σχήμα *S*. Τα σωληνάρια σχηματίζονται γύρω από τις αποφυάδες των οδοντοβλαστών οι οποίες στα ώριμα δόντια δεν έχουν τελικό μήκος μεγαλύτερο από 0.7 mm^[2]. Η διάμετρος των σωληναρίων κυμαίνεται από 3 μm στην πλευρά της οδοντινο-πολφικής σύναψης^[5] έως περίπου 1 μm στην αδαμαντινο-οδοντινική σύναψη. Στα ανθρώπινα δόντια το πάχος της οδοντίνης είναι 2-2.5 mm^[6]. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες σχετικά με τη γεωμετρία των σωληναρίων της οδοντίνης.



Σχήμα 2: α) Γενική άποψη σωληναρίων, β) σωληνάρια οδοντίνης και γ) εγκάρσια τομή οδοντίνης.

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας των σωληναρίων ανά περιοχή μετρούνται τέσσερις παράμετροι: ο **αριθμός** των σωληναρίων ανά mm^2 οδοντίνης, η **απόσταση** μεταξύ του κέντρου του αυλού γειτονικών σωληναρίων, η **διάμετρος** του αυλού των σωληναρίων και το **ποσοστό όγκου** που καταλαμβάνουν τα σωληνάκια ανά μονάδα όγκου οδοντίνης, παράγοντας που είναι συνάρτηση της ηλικίας^[7]. Στον **Πίνακα 1** εμφανίζονται οι μέσες τιμές των παραπάνω μεγεθών. Ο αυλός χωρίζεται κατά μήκος σε τρεις περιοχές (τριτημόρια). Η περιοχή η οποία είναι εγγύτερα στον πολφό διαθέτει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα οδοντινικών σωληναρίων από τις άλλες δυο. Τελικά, όπως προκύπτει και από τον **Πίνακα 1**, λιγότερα από τα μισά σωληνάκια που υπάρχουν κοντά στον πολφό είναι εκείνα που καταλήγουν στην αδαμαντινο-οδοντινική σύναψη.

Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωληναρίων οδοντίνης^[2].

Τριτημόριο οδοντίνης		Πολφικό	Μέσο	Αδαμαντινικό	
Αριθμός σωληναρίων ($10^3/\text{mm}^2$)		40-45	30-35	18-20	
Απόσταση μεταξύ του κέντρου του αυλού γειτονικών σωληναρίων (μm)		6	10	15	
Διάμετρος αυλών (μm)		2-3	0.9-1.6	0.5-1.2	
Ποσοστό όγκου των σωληναρίων ανά μονάδα όγκου οδοντίνης (%)	Ηλικιακή ομάδα	<30	79	27	4
		31-50	49	19	4
		51-75	42	16	4

Βακτηριακά προϊόντα ή χημικές ουσίες προερχόμενες από τα διάφορα οδοντιατρικά υλικά, εάν βρεθούν στην επιφάνεια της οδοντίνης, είναι δυνατό να διαχυθούν μέσω του ρευστού της οδοντίνης και να προκαλέσουν πολφικές αντιδράσεις^[8-10]. Μακροπρόθεσμα, οι υπάρχοντες οδοντοβλάστες εάν δεν καταστραφούν από την τοξική δράση των διαχεόμενων μέσω της οδοντίνης ουσιών παράγουν τριτογενή αντιδραστική (*reactionary*) οδοντίνη. Ακόμα και σε περίπτωση καταστροφής τους, ο πολφός του δοντιού διαθέτει κατάλληλα κύτταρα, τα οποία έχουν την ικανότητα υπό προϋποθέσεις να διαφοροποιούνται σε νέους οδοντοβλάστες και να παράγουν τριτογενή επανορθωτική (*reparative*) οδοντίνη, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η καταστροφή του συμπλέγματος πολφού-οδοντίνης λόγω εξωτερικών παραγόντων δεν είναι πάντα μόνιμη. Ο σχηματισμός τριτογενούς οδοντίνης και των δυο τύπων αποτελεί μέρος της επανορθωτικής δράσης στον πολφό και είναι ζωτικής σημασίας για το οδοντινο-πολφικό σύμπλεγμα καθώς εξασφαλίζει την παρεμπόδιση της εισόδου μολυσματικών ενώσεων.

Οι παραδοσιακές θεραπευτικές τεχνικές επικεντρώνονται κυρίως στην αντικατάσταση του κατεστραμμένου ιστού από κατάλληλα υποκατάστατα, παρά στη εκμετάλλευση της επανορθωτικής δράσης του συμπλέγματος^[11]. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της οδοντιατρικής έρευνας στρέφεται στην προσπάθεια χρήσης θεραπευτικών προϊόντων (αυξητικοί παράγοντες), οι οποίοι σε περιπτώσεις μόλυνσης θα διαχέονται μέσω του υγρού των σωληναρίων της οδοντίνης και θα προκαλούν το σχηματισμό τριτογενούς οδοντίνης.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος ευρύτερης διεπιστημονικής μελέτης με τελικό στόχο την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών θεραπείας που θα εξασφαλίζουν την υγιή λειτουργία του συμπλέγματος. Από τη σκοπιά του Χημικού Μηχανικού επιχειρείται, στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής, η μελέτη των φαινομένων μεταφοράς στα σωληνάκια της οδοντίνης. Στο πρώτο στάδιο, το οποίο παρουσιάζεται εδώ, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση και συγκεντρώνονται πληροφορίες που αφορούν τη **ροή** του ρευστού της οδοντίνης. Η μελέτη μπορεί να ενταχθεί στο γενικότερο πλαίσιο της μελέτης των **μικρο-συσκευών** καθώς η κάθετη στη ροή του ρευστού χαρακτηριστική τους διάσταση είναι μικρότερη από 1 mm.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πειραματικές μελέτες^[12-14] οι οποίες έχουν διεξαχθεί *in vitro* και *in vivo*, σε δόντια ζώων και σε αντίστοιχα ανθρώπινα, προκειμένου να μελετηθεί με λεπτομέρεια η ροή του υγρού στα σωληνάκια της οδοντίνης όταν εφαρμόζονται διαφορετικών ερεθίσματα (πίεση, θερμοκρασία, διάχυση ουσιών) καθώς και ο πόνος που αισθάνεται ο οργανισμός μέσω των ερεθισμάτων στα νεύρα ως αποτέλεσμα αυτής της κίνησης. Η ροή αυτή μπορεί να έχει κατεύθυνση είτε από τον πολφό προς την επιφάνεια της οδοντίνης (*outward*) είτε και αντίθετα (*inward*). Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση των σημαντικότερων πληροφοριών που προκύπτουν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη ροή του ρευστού της οδοντίνης.

Σύμφωνα με τον Pashley^[15] η ανάπτυξη φυσιολογικής πίεσης μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής στη μεριά του πολφού των δοντιών οδηγεί σε **εκροή** του περιέχοντος ρευστού όταν ο ιστός της οδοντίνης είναι εκτεθειμένος. Η παροχή αυτή υπό φυσιολογικές συνθήκες είναι αρκετά μικρή, ωστόσο κρύο/θερμό ερέθισμα, εφαρμογή εξωτερικής πίεσης και συγκέντρωση ουσιών μπορεί να **μεταβάλλει** αυτή τη ροή και να οδηγήσει και σε αίσθημα πόνου.

Ο ρυθμός της διάχυσης ουσιών εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωσή τους και από τον συντελεστή διάχυσής τους. Η ιδέα της εκμετάλλευσης των οδοντινικών σωληναρίων για τη μετάγγιση των φαρμάκων στον πολφό διατυπώθηκε αρχικά από τον Pashley το 1990^[16]. Όμως αυτή συναντά την αντίσταση εξ αιτίας της ροής του υγρού της οδοντίνης και έτσι μπορεί να παρεμποδιστεί η επιθυμητή διάχυση θεραπευτικών ουσιών. Δεν φαίνεται να υπάρχει έρευνα σχετική με την ισορροπία μεταξύ του ρυθμού της εσωτερικής διάχυσης εξωγενών παραγόντων (π.χ. φάρμακα, βακτήρια) και της αντίστασης της ροής του υγρού της οδοντίνης.

Σύμφωνα με τον Pashley^[17] οι θεραπευτικοί παράγοντες πρέπει να αποτελούνται από μικρά μόρια ή ιόντα, τα οποία θα διαθέτουν υψηλούς συντελεστές διάχυσης. Οι συγκεντρώσεις τους δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλές γιατί υπάρχει κίνδυνος να αυξηθεί ο ρυθμός της κίνησης του υγρού της οδοντίνης προς τα έξω με αποτέλεσμα να αντιτίθεται στην εσωτερική διάχυση του φαρμάκου^[17].

Οι Pashley *et al.*^[18] μελέτησαν πειραματικά τη διαπερατότητα της οδοντίνης σε δόντια σκύλων *in vitro* και *in vivo* με τη διάχυση ραδιενεργών ιχνηλατών (*radioactive tracers*) δια μέσου των σωληναρίων της οδοντίνης. Απέδειξαν ότι η ποσότητα των ουσιών που μπορούν να απορροφηθούν τελικά είναι πολύ μικρή μέχρι και ασήμαντη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να οδηγηθούμε στην παραγωγή φαρμάκων που θα είναι αποδοτικά σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

Η εφαρμογή υδροστατικής **πίεσης** από -400 έως 400 mmHg απόλυτης πίεσης^[13] σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ανθρώπινα δόντια *in vitro* έδειξε ότι στην περίπτωση της αρνητικής πίεσης προκαλείται κίνηση του ρευστού προς την επιφάνεια της οδοντίνης (*outward*) ενώ στην υπερπίεση η κίνηση αντιστρέφεται (*inward*). Βρέθηκε ακόμη ότι στην περίπτωση της προς τα έξω (*outward*) κίνησης του ρευστού προκαλείται μεγαλύτερος πόνος για τις ίδιες παροχές υγρού και ίδια απόλυτη τιμή πίεσης.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και από *in vitro* μελέτες ανθρώπινων δοντιών τα οποία εκτίθενται σε **θερμικά** ερεθίσματα^[14]. Η εφαρμογή ενός κρύου ερεθίσματος (πάγος 0 °C) στο δόντι προκαλεί **ροή** του ρευστού προς τα έξω με παροχές 1-2 nL/s·mm². Η επικρατούσα θεωρία υποστηρίζει πως η κίνηση του περιέχοντος ρευστού που δημιουργείται ως αποτέλεσμα του ερεθίσματος είναι ικανή να ερεθίσει τα νεύρα τα οποία εδράζονται στη βάση των σωληναρίων της οδοντίνης μέσω της ανάπτυξης διαμητρικής τάσης. Αυτή είναι και η βάση της **υδροδυναμικής θεωρίας** στα σωληνάκια της οδοντίνης όπως έχει προταθεί από τον Brannstrom^[19] το 1966. Η κίνηση του ρευστού ύστερα από θερμικό ερέθισμα πιστεύεται πως

οφείλεται κυρίως στη συστολή/διαστολή του τοιχώματος (ιστός οδοντίνης) λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με την υδροδυναμική θεωρία η κίνηση του ρευστού οφείλεται στη μεταβολή του όγκου του ίδιου του ρευστού κατά την αλλαγή της θερμοκρασίας του^[20]. Παρόλα αυτά η πειραματική εργασία των *Linsuwanont et al.*^[21] απέδειξε πως η κίνηση του ρευστού ξεκινάει πριν ακόμα μεταβληθεί η θερμοκρασία στην πλευρά της οδοντινο-πολφικής σύναψης. Συνεπώς ενισχύεται η υπόθεση της πρόκλησης ροής του περιέχοντος ρευστού στα σωληνάκια της οδοντίνης πρωτίστως λόγω μεταβολής της γεωμετρίας του τοιχώματος. Την προαναφερθείσα υπόθεση υιοθετούν στη μελέτη τους και οι *Lin et al.*^[22] προσπαθώντας να κατανοήσουν μέσω αναλυτικής μαθηματικής προσέγγισης το μηχανισμό πρόκλησης πόνου ύστερα από θερμικό ερέθισμα στην κορυφή του δοντιού. Η συγκεκριμένη μελέτη βασίζεται στη διπλή ανάλυση των δυο αιτιών πρόκληση ροής του ρευστού αλλά και στο συνδυασμό τους. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη συμμετοχή της μεταβολής του τοιχώματος στο εν λόγω φαινόμενο. Μέσω της προαναφερθείσας μελέτης αποδεικνύεται ότι παράγεται σε αρχικό στάδιο μια απότομη ροή του ρευστού λόγω της μεταβολής του όγκου του ρευστού και της γεωμετρίας του τοιχώματος. Αυτή η αρχικά υψηλή παροχή του ρευστού μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία υψηλής διαμητικής τάσης στα νεύρα οδηγώντας με αυτό τον τρόπο στην αίσθηση του απότομου πόνου στην περίπτωση κρύου ερεθίσματος. Στην περίπτωση θερμού ερεθίσματος προκύπτει ροή του ρευστού προς τα μέσα. Ωστόσο η κίνηση αυτή δεν είναι ικανή να προκαλέσει το ίδιο αίσθημα πόνου με την περίπτωση του κρύου ερεθίσματος^[23].

Προς επιβεβαίωση των προαναφερθέντων οι *Lin et al.*^[23] απέδειξαν με τη βοήθεια Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*CFD*) ότι η κίνηση του ρευστού προς τα έξω, που προκαλείται ύστερα από την εφαρμογή κρύου ερεθίσματος, οδηγεί στην ανάπτυξη μεγαλύτερων τιμών διαμητικής τάσης στις νευρικές απολήξεις απ' ότι η αντίθετη κίνηση για τις ίδιες παροχές. Υπολογιστική μελέτη έχει εκπονηθεί και από τους *Kishen & Vedantam*^[24] οι οποίοι χρησιμοποίησαν μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να μελετήσουν τη μηχανική καταπόνηση του κύριου όγκου της οδοντίνης από την ανάπτυξη υδροστατικής πίεσης στα σωληνάκια της οδοντίνης. Ωστόσο όπως προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας δεν υπάρχει σημαντική πρόοδος στη μελέτη των φαινομένων ροής στα σωληνάκια της οδοντίνης. Κρίνεται συνεπώς σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια νέα **ολοκληρωμένη** υπολογιστική μελέτη που θα συμπεριλαμβάνει τα παραπάνω φαινόμενα προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι προτεινόμενοι μηχανισμοί και να εξηγηθεί επαρκώς η αιτία πρόκλησης της ροής του ρευστού και η αλλαγή της κατεύθυνσής του.

Απαραίτητο και πρωταρχικό στάδιο, πριν από την ανάλυση του μηχανισμού μεταφοράς μάζας των θεραπευτικών παραγόντων είναι ο προσδιορισμός των ρεολογικών χαρακτηριστικών του υγρού που κυκλοφορεί μέσα στα σωληνάκια της οδοντίνης. Παράλληλα γίνεται προσπάθεια δημιουργίας ενός υπολογιστικού μοντέλου μέσω κώδικα *CFD* για τη μελέτη του μηχανισμού ροής μέσα στους αυλούς της οδοντίνης. Η παρούσα εργασία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του αντικειμένου της **βιοϊατρικής μηχανικής** καθώς περιλαμβάνει την εφαρμογή των βασικών αρχών της μηχανικής (μεταφορά ορμής, μάζας και ενέργειας) σε βιολογικά συστήματα.

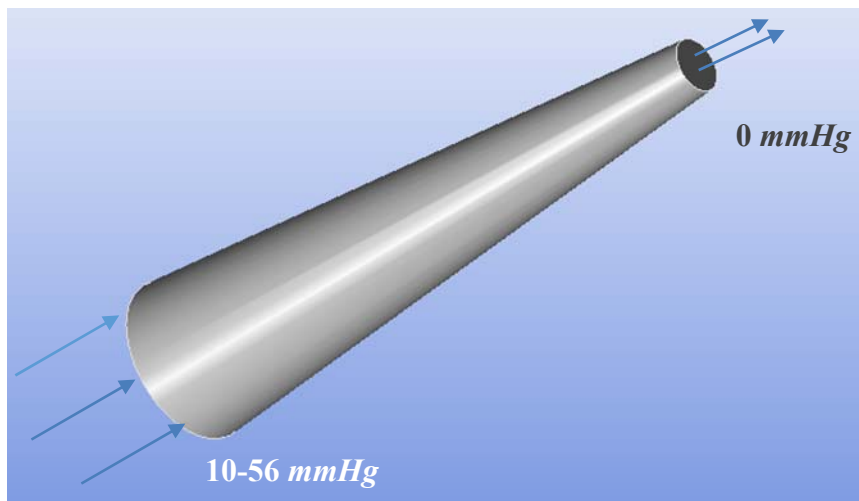
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η μελέτη της ροής του ρευστού που περιέχεται στα σωληνάκια της οδοντίνης πραγματοποιείται με τη βοήθεια Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*Ansys 14.0*). Η προκαταρκτική αυτή μελέτη παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης της ταχύτητας και παροχής του ρευστού στο εσωτερικό ενός σωληναρίου υπό την επίδραση διαφορετικών συνθηκών πίεσης αλλά και των πιθανών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας (*Ansys CFX 14.0*). Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού της γεωμετρίας, κατασκευής του υπολογιστικού πλέγ-

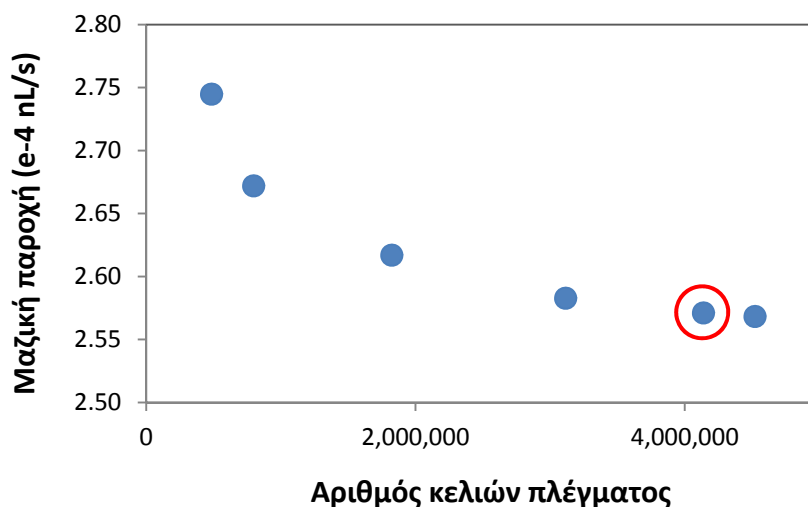
ματος και διακριτοποίησης των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα (εξισώσεις μεταφοράς μάζας και ορμής *Navier-Stokes* και εξίσωση μεταφοράς θερμότητας). Ως ρευστό κυκλοφορίας εντός των αυλών επιλέγεται το νερό καθώς διαθέτει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του πραγματικού ρευστού (ορός του αίματος).

Σύμφωνα με τους *Koo & Kleinstreuer*^[25] η χρήση των εξισώσεων συνεχείας και διατήρησης ορμής *Navier-Stokes* ενδείκνυται για τις περιπτώσεις ροής υγρού (π.χ. νερό) σε μικροκανάλια εφόσον η διάμετρος τους (l_s) είναι μεγαλύτερη από 0.1 μm . Η συνθήκη αυτή βασίζεται στον αριθμό *Knudsen* για υγρά ($=\lambda_\mu/l_s$), ο οποίος στην περίπτωση του νερού είναι αρκετά μικρός καθώς το διαμοριακό μήκος (μέση ελεύθερη απόσταση των μορίων) είναι $\lambda_\mu=3 \text{ \AA}$.

Η προκαταρκτική μελέτη της ροής του ρευστού της οδοντίνης πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή διαφορετικών συνθηκών πίεσης στην πλευρά της οδοντινο-πολφικής σύναψης (10-56 mmHg). Η γεωμετρία αποτελείται από ένα σωληνάριο οδοντίνης μήκους 2.5 mm (**Σχήμα 3**). Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από περίπου $4.5 \cdot 10^6$ κελιά, πυκνότητα η οποία προέκυψε ύστερα από κατάλληλη ανάλυση ανεξαρτησίας της επίλυσης από το πλέγμα (**Σχήμα 4**). Επιπλέον στην ίδια γεωμετρία μελετήθηκε η μεταφορά θερμότητας.



Σχήμα 3: Γεωμετρία για τη μελέτη της εκροής του ρευστού υπό την επίδραση διαφορετικών τιμών σχετικής πίεσης στον πολφό.



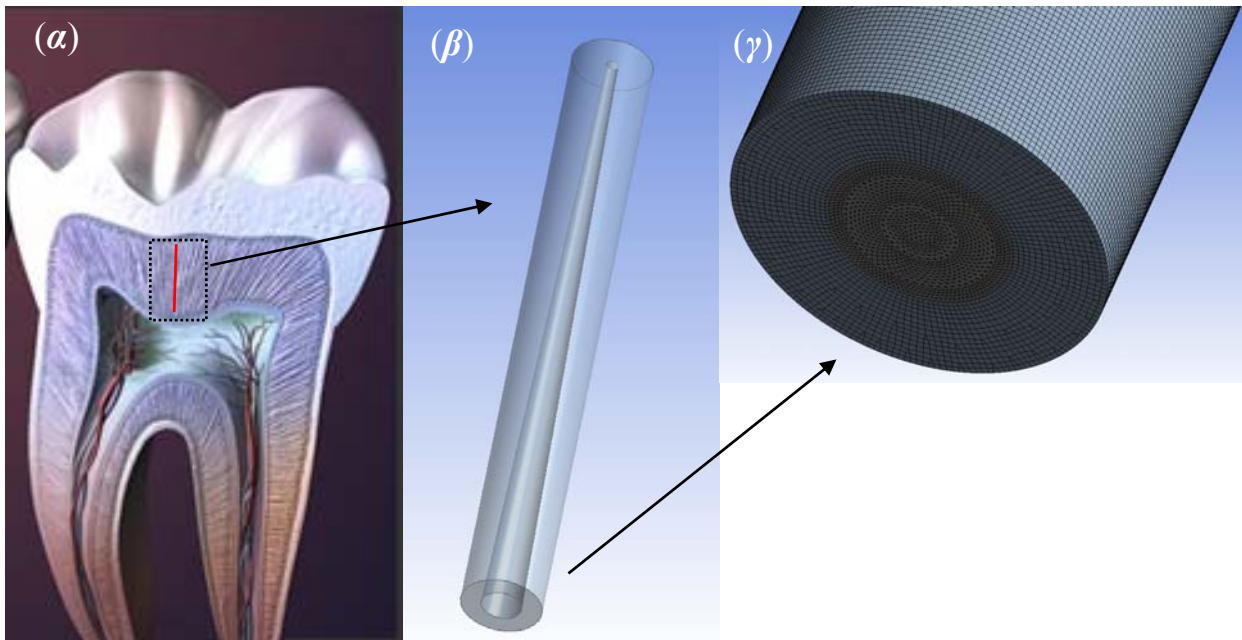
Σχήμα 4: Ανεξαρτησία της λύσης από την πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την ύπαρξη στρωτής ροής με αριθμούς *Reynolds* $<10^{-3}$ και τιμές παροχής περί το 1 nL/h. Η υπολογιζόμενη παροχή του ρευστού βρίσκεται σε καλή συμφωνία με αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από πειραματικές μελέτες^[13] και ακολουθεί γραμμική σχέση με την εφαρμοζόμενη σχετική πίεση στην πλευρά του πολφού. Ο χρόνος παραμονής του ρευστού εντός του αυλού υπολογίζεται περίπου στα 10 s.

Από τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας κατά την εφαρμογή κρύου ερεθίσματος προέκυψε πως η θερμότητα μεταφέρεται με αργό ρυθμό από την περιοχή της αδαμαντινικής σύναψης σε εκείνη του πολφού. Επιβεβαιώνονται έτσι οι κλινικές παρατηρήσεις που αναφέρουν ότι η θερμότητα μεταφέρεται αργά δια μέσου του υγρού της οδοντίνης^[14].

Για την πλήρη μελέτη της επίδρασης της μεταβολής του σχήματος ενός σωληναρίου της οδοντίνης λόγω διαστολής/συστολής του πεδίου ροής του υγρού ακολουθείται η μεθοδολογία *Fluid Structure Interaction (FSI)*. Ο όρος αναφέρεται στην συνδυασμένη μελέτη της μεταβολής των τοιχωμάτων μιας γεωμετρίας μέσα στην οποία κυκλοφορεί ένα ρευστό λόγω αλλαγής των συνθηκών (πίεση, θερμοκρασία) και της τελικής επίδρασης στο πεδίο ροής του. **Σκοπός** αυτής της προσέγγισης είναι να μελετηθεί όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά ο μηχανισμός πρόκλησης της ροής του ρευστού μέσα στους αυλούς, όταν εφαρμόζεται θερμικό ερέθισμα κατ' αντιστοιχία με τις παρατηρήσεις των *Lin et al.*^[22]. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιείται ο κώδικας της *Ansys*, όπου συνδυάζεται το λογισμικό *Structural 14.0* με το *CFX 14.0*. Μέσω του *Structural 14.0* ορίζονται οι ελαστικές ιδιότητες του στερεού τοιχώματος με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Analysis*) και εφαρμόζεται επ' αυτού η κατανομή της θερμοκρασίας η οποία έχει θα προκύψει από τη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας. Έτσι, είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται στο δίκτυο του ιστού της οδοντίνης και η παραμόρφωση που υφίσταται ύστερα από τοπική αλλαγή της θερμοκρασίας.

Στο **Σχήμα 5** απεικονίζεται η διαδικασία σχεδιασμού της γεωμετρίας και κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος.



Σχήμα 5: α) Άποψη δοντιού, β) Σχεδιασμός γεωμετρίας αυλού και γ) Κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ροή μπορεί να δημιουργηθεί μέσα στα σωληνάρια της οδοντίνης ως αποτέλεσμα διάφορων εξωτερικών ερεθισμάτων. Η ροή αυτή μπορεί να κατευθύνεται είτε από τον πολφό προς την αδαμαντινική σύναψη είτε αντίστροφα.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προκαταρκτικών προσομοιώσεων δείχνει ότι η ροή στο εσωτερικό κάθε σωληναρίου οδοντίνης είναι στρωτή με χαμηλούς αριθμού *Reynolds* και πολύ χαμηλές ταχύτητες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας και με αναλυτικές σχέσεις. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι εξαιρετικά αργός γεγονός που ανταποκρίνεται στις κλινικές παρατηρήσεις περί αργής μετάδοσης της θερμοκρασίας του ερεθίσματος στον πολφό.

Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, η μελέτη του πεδίου ροής μέσα στα σωληνάρια της οδοντίνης εξαιτίας κάποιου θερμικού ερεθίσματος είναι αρκετά δύσκολη, λόγω της πολυπλοκότητας των φαινομένων και της δυσκολίας εκτίμησης των πραγματικών παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο. Η ανάπτυξη της προτεινόμενης στην εργασία αυτή νέας μεθοδολογίας αναμένεται να δια φωτίσει ακόμα περισσότερο την επιστημονική κοινότητα σχετικά με το πεδίο ροής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό ενός αυλού της οδοντίνης και να προτείνει τους πιθανότερους μηχανισμούς δημιουργίας του.

Απαραίτητο βήμα για την αξιολόγηση του κώδικα είναι η επαλήθευση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά που θα προκύψουν ύστερα από την κατασκευή κατάλληλης πειραματικής διάταξης (*μ-συσκευή*). Εφόσον επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα για τα φαινόμενα ροής στο εσωτερικό των αυλών θα ξεκινήσει το δεύτερο μέρος της μελέτης που αφορά τη μελέτη της διάχυσης νέων θεραπευτικών παραγόντων διαμέσου των σωληναρίων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν θερμά την κ. Α.Α. Μουζά Επ. Καθηγήτρια και τους κ.κ. Α.Δ. Αναστασίου και Ι.Α. Στογιάννη ΥΔ τμήματος Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Δράση: "ΑΡΙΣΤΕΙΑ Ι (έργο Νο 1904).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zygote. 2011 3DSCIENCE.COM. [cited 2013 20/4]; Available from: http://www.3dscience.com/3D_Models/Human_Anatomy/Teeth.
- [2] Κούρος, Σ.Π., 2010 Η in vivo βιοσυμβατότητα συγκολλητικών συστημάτων: η επίδραση δυο συγχρονων εμπορικών σκευασμάτων στο οδοντινοπολφικό συμπλεγμα η in vivo βιοσυμβατότητα συγκολλητικών συστημάτων: η επίδραση δυο συγχρονων εμπορικών σκευασμάτων στο οδοντινοπολφικό συμπλεγμα, *Οδοντιατρική Σχολή ΑΠΘ*.
- [3] Smith, A.J., 2003 Vitality of the dentin-pulp complex in health and disease: growth factors as key mediators. *J Dent Educ.* **67**(6): p. 678-89.
- [4] Mjør, I., 2001 Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 5: Clinical management and tissue changes associated with wear and trauma. *Quintessence Int.* **32**.
- [5] Garberoglio, R., Brannstrom, M., 1976 Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules. *Arch Oral Biol.* **21**(6): p. 355-62.

- [6] Pashley, D.H., 1996 Dynamics of the pulpo-dentin complex. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*. **7**(2): p. 104-133.
- [7] Tziafas, D., Kalyva, M., Papadimitriou, S., 2002 Experimental dentin-based approaches to tissue regeneration in vital pulp therapy. *Connect Tissue Res*. **43**(2-3): p. 391-5.
- [8] Bergenholtz, G., 1977 Effect of bacterial products on inflammatory reactions in the dental pulp. *Scand J Dent Res*. **85**(2): p. 122-9.
- [9] Bergenholtz, G., 1981 Inflammatory response of the dental pulp to bacterial irritation. *J Endod*. **7**(3): p. 100-4.
- [10] Bergenholtz, G., Warfvinge, J., 1982 Migration of leukocytes in dental pulp in response to plaque bacteria. *Scand J Dent Res*. **90**(5): p. 354-62.
- [11] Tziafas, D., Smith, A.J., Lesot, H., 2000 Designing new treatment strategies in vital pulp therapy. *J Dent*. **28**(2): p. 77-92.
- [12] Vongsavan, N., Matthews, B., 2007 The relationship between the discharge of intradental nerves and the rate of fluid flow through dentine in the cat. *Arch Oral Biol*. **52**(7): p. 640-7.
- [13] Charoenlarp, P., Wanachantararak, S., Vongsavan, N., Matthews, B., 2007 Pain and the rate of dentinal fluid flow produced by hydrostatic pressure stimulation of exposed dentine in man. *Arch Oral Biol*. **52**(7): p. 625-31.
- [14] Chidchuangchai, W., Vongsavan, N., Matthews, B., 2007 Sensory transduction mechanisms responsible for pain caused by cold stimulation of dentine in man. *Arch Oral Biol*. **52**(2): p. 154-60.
- [15] Pashley, D.H., 1994 Dentine permeability and its role in the pathobiology of dentine sensitivity. *Arch Oral Biol*. **39 Suppl**: p. 73S-80S.
- [16] Pashley, D.H., 1990 Dentin permeability: Theory and practice. *Experimental endodontics*. p. 19-49.
- [17] Pashley, D.H., 1992 Dentin permeability and dentin sensitivity. *Proc Finn Dent Soc*. **88 Suppl 1**: p. 31-7.
- [18] Pashley, D.H., Kehl, T., Pashley, E., Palmer, P., 1981 Comparison of in vitro and in vivo dog dentin permeability. *J Dent Res*. **60**(3): p. 763-68.
- [19] Brannstrom, M., 1966 The hydrodynamics of the dental tubule and pulp fluid: its significance in relation to dentinal sensitivity. *Annu Meet Am Inst Oral Biol*. **23**: p. 219.
- [20] Brannstrom, M., Astroem, A., 1964 A Study on the Mechanism of Pain Elicited from the Dentin. *J Dent Res*. **43**: p. 619-25.
- [21] Linsuwanont, P., Palamara, J.E., Messer, H.H., 2007 An investigation of thermal stimulation in intact teeth. *Arch Oral Biol*. **52**(3): p. 218-27.
- [22] Lin, M., Liu, S., Niu, L., Xu, F., Lu, T.J., 2011 Analysis of thermal-induced dentinal fluid flow and its implications in dental thermal pain. *Arch Oral Biol*. **56**(9): p. 846-54.
- [23] Lin, M., Luo, Z.Y., Bai, B.F., Xu, F., Lu, T.J., 2011 Fluid Mechanics in Dentinal Microtubules Provides Mechanistic Insights into the Difference between Hot and Cold Dental Pain. *PLoS ONE*.
- [24] Kishen, A., Vedantam, S., 2007 Hydromechanics in dentine: role of dentinal tubules and hydrostatic pressure on mechanical stress-strain distribution. *Dent Mater*. **23**(10): p. 1296-306.
- [25] Koo, J.M., Kleinstreuer, C., 2003 Liquid flow in microchannels: experimental observations and computational analyses of microfluidics effects. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. **13**(5): p. 568-579.