

Μηχανισμοί δράσης της φωτεινής ακτινοβολίας στην λεύκανση των δοντιών στο ιατρείο

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
Literature review

Δημήτριος Διονυσόπουλος¹

Mechanisms of action of light irradiation during in-office tooth bleaching

Dimitrios Dionysopoulos¹

1. Επίκουρος Καθηγητής
Εργαστήριο Οδοντικής
Χειρουργικής,
Οδοντιατρική Σχολή Α. Π. Θ.

1. Assistant Professor,
Department of Operative
Dentistry, School of Dentistry,
Aristotle University
of Thessaloniki

Περίληψη

Οι μέθοδοι λεύκανσης των δοντιών στο ιατρείο χρησιμοποιούν υπεροξειδίο του υδρογόνου σε συνδυασμό με φως για να αυξήσουν το αποτέλεσμα της λεύκανσης. Η λεύκανση είναι μια χημική διαδικασία η οποία πραγματοποιείται με οξειδωτική αποδόμηση των χρωστικών. Οι πηγές ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση της διαδικασίας της λεύκανσης περιλαμβάνουν λάμπες αλογόνου, πλάσματος, ατμών υδραργύρου, LED και laser. Η ακτινοβολία laser μπορεί να αλληλεπιδράσει κατά την πρόσπτωσή της στους σκληρούς οδοντικούς ιστούς με τέσσερις πιθανούς τρόπους. Μια αντίδραση είναι η απορρόφηση του laser από τους οδοντικούς ιστούς που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα φωτοχημικές διαδικασίες στις οποίες περιλαμβάνονται φωτοθερμικά φαινόμενα, φθορισμός, φωτοξείδωση ή φωτοδυναμικά φαινόμενα. Άλλες πιθανές αντιδράσεις είναι η διέλευση του laser δια μέσου των οδοντικών ιστών, η αντανάκλαση από την επιφάνεια του δοντιού και τέλος η διασπορά του φωτός μέσα στους οδοντικούς ιστούς. Τα κύρια χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας laser που καθορίζουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης με τους οδοντικούς ιστούς είναι το μήκος κύματος, η πυκνότητα της ισχύος, η συνεχής ή παλμική ακτινοβολία, η συχνότητα των παλμών και η διάρκεια της ακτινοβολίας. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες ενίσχυσης της λευκαντικής δράσης του υπεροξειδίου του υδρογόνου. Οι οδοντίατροι θα πρέπει να γνωρίζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων λεύκανσης και να είναι σε θέση να μπορούν να κάνουν λεύκανση δοντιών στο ιατρείο με τη χρήση φωτεινών πηγών σύμφωνα με τις τεκμηριωμένες επιστημονικές γνώσεις.

Λέξεις κλειδιά

οδοντική λεύκανση
φωτεινή ακτινοβολία
ενίσχυση λευκαντικής δράσης
συσσκευές laser
μηχανισμοί δράσης ακτινοβολίας
υπεροξειδίο του υδρογόνου

Summary

Light-assisted in-office tooth bleaching methods use higher concentrations of hydrogen peroxide in conjunction with supplemental light to fasten and enhance the effect of tooth whitening. Tooth bleaching treatment using hydrogen peroxide is a chemical process that occurs by oxidative decomposition of chromophores, that is, breakdown of these colored light absorbing organic molecules. Radiation sources used to catalyze the bleaching process have included halogen lamps, plasma arc lamps, mercury vapor lamps, LEDs and lasers. Laser light can follow four possible interactions with the hard dental tissues. Absorption can result in a range of photochemical processes such as photothermal effect, fluorescence, photooxidation or photodynamic effects. Other possible interactions are transmission of laser energy through the dental tissues, reflection of the beam from the surface of the tooth and scattering of the light into the dental tissues. The essential elements of laser light that determine its reaction with the dental tissues are the wavelength of the radiant energy (nm) emitted by the laser, the power density of the beam (W/cm²) and the temporal characteristics of the beam energy, such as continuous versus pulsed delivery, pulse repetition rate and pulse duration. There are various parameters that can enhance hydrogen peroxide-based bleaching. In particular, these are alkaline pH environment, thermal enhancement, photothermal effects, photooxidation, direct photobleaching, photolysis, photodissociation, Fenton reaction, photocatalysis and photodynamic effects. Dentists should be aware of the advantages and disadvantages of tooth bleaching methods and able to make decisions offering in-office tooth bleaching with adjunct light based on sound evidence and well-controlled scientific studies.

Keywords

Tooth bleaching
light irradiation
enhancement of bleaching effect
laser devices
mechanisms of action
hydrogen peroxide

Εισαγωγή

Η λεύκανση των δοντιών με υπεροξειδίο του υδρογόνου (H_2O_2) ή με υπεροξειδίο του καρβαμιδίου $[CO(NH_2)_2]H_2O_2$ χρησιμοποιείται σήμερα σε μεγάλη έκταση στην κλινική οδοντιατρική πράξη¹⁻⁴. Είναι μια συντηρητική μέθοδος βελτίωσης της αισθητικής των δοντιών, η οποία είναι σχετικά ασφαλής. Πιο συγκεκριμένα έχουν παρατηρηθεί επιπτώσεις σε μικροσκοπικό επίπεδο όπως οδοντική υπερευαισθησία, ιστολογικές μεταβολές και αλλαγές στη χημική σύνθεση της αδαμαντίνης, ελάττωση της μικροσκληρότητας και αύξηση της επιφανειακής αδρότητας των οδοντικών ιστών^{2,3,5,6}. Όμως, οι συνέπειες των μεταβολών αυτών στην αδαμαντίνη είναι ελάχιστες και αναστρέψιμες όταν οι λευκαντικοί παράγοντες εφαρμόζονται με προσοχή και σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή⁷⁻¹⁰.

Η πρώτη περιγραφή λεύκανσης δοντιών με δυσχρωμίες έγινε από τον M'Quillen το 1867¹¹, ενώ το πρώτο εμπορικό σκεύασμα λεύκανσης, το οποίο ήταν ένα μίγμα από πέντε μέρη υπεροξειδίο του υδρογόνου (HP) και ενός μέρους διαιθυλικού αιθέρα, κυκλοφόρησε στο εμπόριο το 1895¹². Για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του λευκαντικού παράγοντα ήδη από το 1937 χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της αύξησης της θερμοκρασίας, είτε με θερμαντικές συσκευές είτε με λάμπες υπέρυθρου φωτός, τεχνική που εφαρμόστηκε μέχρι της αρχές της δεκαετίας του 1980. Η τεχνική αυτή ήταν αποτελεσματική αλλά είχε το μειονέκτημα του ερεθισμού του πολφού, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και της δυσκολίας ελέγχου της διαβρωτικής δράσης του υγρού λευκαντικού παράγοντα (35% H_2O_2)^{13,14}.

Το 1989 εισήχθη η τεχνική των στοματικών νερθών, κατά την οποία ο ασθενής φοράει τους νάρθηκες που περιέχουν υπεροξειδίο του καρβαμιδίου 10% κατά τη διάρκεια της παραμονής του στο σπίτι¹⁵. Έτσι, η νέα τεχνική δεν αφορούσε τη λεύκανση μόνο ενός δυσχρωμικού δοντιού αλλά ομάδων δοντιών, τα οποία εμφάνιζαν δυσχρωμίες ελαφριάς ή μέτριας μορφής. Αν και η τεχνική της λεύκανσης στο σπίτι κυριάρχησε για πολλά χρόνια στην προτίμηση των ασθενών, την τελευταία δεκαετία εμφανίστηκε μια σταθερή αύξηση της προτίμησης των ασθενών για λεύκανση στο ιατρείο ιδιαίτερα με τη ενισχυτική χρήση φωτεινής ενέργειας¹⁶. Η λεύκανση στο ιατρείο με τη χρήση διαφόρων συσκευών που παράγουν φωτεινή ακτινοβολία, είναι μια μέθοδος που πραγματοποιείται στο ιατρείο κατά την οποία χρησιμοποιείται υψηλής περιεκτικότητας HP. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που σχετίζονται με το λευκαντικό παράγοντα και το είδος της φωτεινής ακτινοβολίας, οι οποίες εφαρμόζονται στους ασθενείς οι οποίοι επιθυμούν γρήγορα αποτε-

λέσματα και πιθανόν δεν επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν την τεχνική των νερθών στο σπίτι.

Οι τεχνικές για την ελάττωση του χρόνου λεύκανσης των δοντιών στο ιατρείο περιλαμβάνουν την αύξηση της θερμοκρασίας του λευκαντικού παράγοντα, την αύξηση του pH και τη φωτοοξειδωση^{17,18}. Για την επιτάχυνση της δράσης του λευκαντικού παράγοντα έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες λάμπες, όπως είναι οι λάμπες αλογόνου, πλάσματος, ατμών υδραργύρου, LED καθώς και laser σε διάφορα μήκη κύματος¹⁹⁻²¹.

Οι οδοντίατροι πρέπει να γνωρίζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων λεύκανσης και ύστερα από ειδική εκπαίδευση να είναι σε θέση να προσφέρουν ασφαλείς υπηρεσίες λεύκανσης στο ιατρείο με τη βοήθεια των διάφορων φωτεινών πηγών.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η λεπτομερής περιγραφή της δράσης των λευκαντικών παραγόντων που χρησιμοποιούνται στο ιατρείο και ενεργοποιούνται με συσκευές που εκπέμπουν φωτεινή ακτινοβολία, με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση των οδοντιατρικών laser.

A. Λεύκανση των δοντιών στο ιατρείο

Η λεύκανση των δοντιών στο ιατρείο ξεκινάει με μια σωστή εξέταση και λήψη πλήρους οδοντιατρικού ιστορικού. Ακολουθεί η λήψη ακτινογραφιών για τον έλεγχο ύπαρξης ενδοδοντικών προβλημάτων ή τερηδόνας και τέλος συντάσσεται το σχέδιο θεραπείας, το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν κυρίως την αιτία της δυσχρωμίας για την έναρξη μιας αποτελεσματικής θεραπείας οδοντικής λεύκανσης¹⁶.

Επειδή έχει αναφερθεί ότι η χρήση της φωτεινής ακτινοβολίας κατά τη λεύκανση αυξάνει τον κίνδυνο ευαισθησίας των δοντιών²²⁻²⁴, πρέπει κατά τη λήψη του ιστορικού να λαμβάνονται υπ' όψιν οι παράγοντες που μπορούν να αυξήσουν την οδοντική ευαισθησία όπως είναι η υπάρχουσα τερηδόνα, η υφίζηση των ούλων, η αυχενική διάβρωση και το ιστορικό υπερευαισθησίας οδοντίνης. Για την αντιμετώπιση της οδοντικής ευαισθησίας έχει προταθεί βούρτσισμα των δοντιών με οδοντόπαστα που περιέχει απευαισθητοποιητικούς παράγοντες όπως το νιτρικό κάλιο (KNO_3) για 2 εβδομάδες πριν από την επέμβαση ή επάλειψη της χειλικής επιφάνειας των δοντιών με 4% - 6% νιτρικό κάλιο μετά τη λεύκανση. Επίσης σε περιπτώσεις προϋπάρχουσας ευαισθησίας μπορεί να χορηγηθεί ιβουπροφίνη 600 mg, 30 λεπτά πριν και μετά τη λεύκανση^{16,25}. Κατά τη διάρκεια της λεύκανσης πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε να προστατεύονται οι μαλακοί στοματικοί ιστοί από τη δράση του υπεροξειδίου του υδρογόνου, του οποίου η πυκνότητα μπορεί να εί-

να 15% έως 40%. Επίσης θα πρέπει να προστατεύονται τα μάτια και οι μαλακοί στοματικοί ιστοί από τα laser, το μπλε φως και την υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπονται από τις αντίστοιχες λάμπες λεύκανσης^{16,26}.

Παρά το γεγονός ότι τα laser και οι άλλες λάμπες φωτός χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση κατά τη λεύκανση των δοντιών, υπάρχει ευρεία αμφισβήτηση για την αποτελεσματικότητά τους, αλλά και προβληματισμοί για την ασφαλή χρήση τους²⁷. Σε μια σειρά από μελέτες έχει βρεθεί ότι ορισμένες λάμπες λεύκανσης δεν προσφέρουν σημαντική αύξηση της αποτελεσματικότητας του λευκαντικού παράγοντα^{28,29}, άλλες ότι βελτιώνουν σημαντικά τη δράση του^{30,31}, ενώ σε άλλες³²⁻³⁵ βρέθηκε ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως ο τύπος του λευκαντικού παράγοντα, το είδος της φωτεινής πηγής και ο τρόπος εκτίμησης του αποτελέσματος της λεύκανσης. Από μελέτες που έγιναν όπου χρησιμοποιήθηκαν τύποι laser, όπως αργόν, διοδικά, διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ερβίου (Er,Cr:YSGG και Er:YAG) και laser KTP (τιτανύλιο φωσφορικού καλίου, KTiOPO₄), βρέθηκε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το laser αύξησε το αποτέλεσμα της λεύκανσης³⁶⁻⁴², ενώ σε άλλες δεν βρέθηκε σημαντική αύξηση⁴³⁻⁴⁸. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι κατά τη χρήση του laser για τη λεύκανση των δοντιών, θα πρέπει να τηρούνται όλοι οι κανόνες προστασίας επειδή πάντα υπάρχει ο κίνδυνος αύξησης της ενδοπολικής θερμοκρασίας⁴⁹⁻⁵³.

B. Ο μηχανισμός λεύκανσης των δοντιών

Η λεύκανση με υπεροξειδίο του υδρογόνου (H₂O₂) είναι μια πολύπλοκη χημική διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται οξειδωτική διάσπαση χρωμογόνων οργανικών μορίων, τα οποία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν φως. Η απορρόφηση του φωτός από τα μόρια αυτά οφείλεται στην ύπαρξη στη χημική τους δομή, ενός συστήματος συζευγμένων π-ηλεκτρονίων, τα οποία δεν ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο δεσμό ή άτομο αλλά σε μία ομάδα ατόμων, δηλαδή είναι έκτοπα. Τα ηλεκτρόνια αυτά σχηματίζουν μοριακές τροχιές οι οποίες είναι υψηλής ή χαμηλής ενέργειας και μεταξύ τους υπάρχει μια ενεργειακή διαφορά. Η ενεργειακή αυτή διαφορά είναι το ποσό της ενέργειας που απαιτείται, για να μετακινηθεί ένα έκτοπο π-ηλεκτρόνιο από τη χαμηλή στην υψηλή ενεργειακή κατάσταση. Το σύστημα των μοριακών τροχιών των συζευγμένων π-ηλεκτρονίων καθώς και η χημική δομή του μορίου, καθορίζουν το φάσμα απορρόφησης του φωτός^{54,55}.

Η λεύκανση είναι το αποτέλεσμα της διάσπασης των συστημάτων των συζευγμένων π-ηλεκτρονίων με οξει-

δωση, δηλαδή με απώλεια ηλεκτρονίων ή με άλλες αντιδράσεις. Κατά την οξειδωση συνήθως οι κυκλικές ενώσεις μετατρέπονται σε μη κυκλικές, το οποίο οδηγεί στην απώλεια της ιδιότητας απορρόφησης φωτός δηλαδή στη δυσχρωμία των ιστών.

Εκτός από το υπεροξειδίο του υδρογόνου το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για τη λεύκανση των δοντιών, υπάρχουν και άλλοι οξειδωτικοί παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν λεύκανση. Όλοι οι οξειδωτικοί παράγοντες εμφανίζουν διαφορετική λευκαντική ικανότητα, που εξαρτάται από το δυναμικό οξειδοαναγωγής τους, και εκφράζεται σε Volts. Όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό οξειδοαναγωγής τόσο μεγαλύτερη είναι η αποτελεσματικότητα του λευκαντικού παράγοντα⁵⁶⁻⁵⁸.

Ακολουθεί κατάλογος διαφόρων οξειδωτικών παραγόντων ανάλογα με την ισχύ του δυναμικού οξειδοαναγωγής: οξυγόνο (O₂: +1.229 V), ρίζα υπεροξυδίου (HO₂*: +1.510 V), υποχλωριώδες νάτριο (NaClO: +1.630 V) υπεροξειδίο του υδρογόνου (H₂O₂: +1.780 V), όζον (O₃: +2.075 V) και η ρίζα του υδροξυλίου (OH*: +2.800 V). Η ρίζα του υδροξυλίου είναι ο ισχυρότερος οξειδωτικός παράγοντας λόγω του μεγαλύτερου δυναμικού οξειδοαναγωγής που εμφανίζει. Ένας άλλος πολύ ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας είναι το μονήρες οξυγόνο (O₂*), το οποίο όμως δεν κατατάσσεται στους αμιγώς οξειδωτικούς παράγοντες καθώς έχει την ιδιότητα να διασπά μοριακούς δεσμούς με πολλούς άλλους τρόπους εκτός από την οξειδωση (π.χ. αντιδράσεις ene-type και Diels-Alder). Τόσο οι ρίζες του υδροξυλίου όσο και το μονήρες οξυγόνο, λόγω της μεγάλης δραστικότητάς τους δεν μπορούν να απομονωθούν και να χρησιμοποιηθούν χωριστά, αλλά σχηματίζονται και μπορούν να δράσουν μόνο κατά τη διαδικασία λεύκανσης με υπεροξειδίο του υδρογόνου^{27,59-62}.

Οι χρωστικές που βρίσκονται στην επιφάνεια της αδαμαντίνης μπορούν να αφαιρεθούν με ελαστικό κύπελλο και πάστα καθαρισμού. Οι χρωστικές όμως που βρίσκονται μέσα στη δομή των οδοντικών ιστών, για να εξαλειφθούν απαιτείται είτε η διεισδυση του φωτός κάτω από την επιφάνεια και πρόκληση φωτοοξειδωσης, είτε η παραγωγή μορφών ενεργού οξυγόνου, οι οποίες να μπορούν να διεισδύσουν εύκολα στην κρυσταλλική δομή της αδαμαντίνης και της οδοντίνης. Για να είναι λοιπόν ένας λευκαντικός παράγοντας αξιόπιστος πρέπει να έχει ισχυρή οξειδωτική ικανότητα, να δημιουργεί μορφές οξυγόνου που να μπορούν να διεισδύσουν εύκολα στην αδαμαντίνη και την οδοντίνη, να μην είναι διαβρωτικός και βέβαια να μην είναι τοξικός^{58,59,63}.

Γ. Λεύκανση υποβοηθούμενη με ακτινοβολία laser

Κατά την πρόπτωση των ακτινών laser στην αδαμαντίνη, η πορεία τους μπορεί να έχει τέσσερις πιθανές εξελίξεις ανάλογα με τις οπτικές ιδιότητες των οδοντικών ιστών^{64,65}:

α. Απορρόφηση. Το ποσό της φωτεινής ακτινοβολίας του laser που απορροφάται από την αδαμαντίνη εξαρτάται από το χρώμα της, από την παρουσία χρωστικών οι οποίες απορροφούν ενέργεια, από το μήκος κύματος και από τον τρόπο εκπομπής του laser. Η απορρόφηση του φωτός μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από αντιδράσεις, όπως φωτοχημικές αντιδράσεις που αυξάνουν τη θερμοκρασία, να προκληθεί το φαινόμενο του φθορισμού όπου εμφανίζεται εκπομπή φωτός, να προκληθεί φωτοοξειδωση και να υπάρξει φωτοδυναμική δράση.

β. Διέλευση του φωτός. Όταν η ακτινοβολία του laser δεν απορροφάται από τους οδοντικούς ιστούς διεισδύει δια μέσου αυτών. Ο βαθμός διείσδυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος του laser και τα οπτικά χαρακτηριστικά των οδοντικών ιστών.

γ. Αντανάκλαση. Όταν εμφανίζεται αντανάκλαση του φωτός, η ακτινοβολία δεν επηρεάζει καθόλου την επιφάνεια στην οποία προσπίπτει. Η αντανάκλαση μπορεί να έχει τη μορφή που εμφανίζεται στον καθρέφτη ή το ανακλώμενο φως να εμφανίζει διάχυση, δηλαδή να ανακλάται προς διάφορες κατευθύνσεις. Το είδος της ανάκλασης εξαρτάται κυρίως από το βαθμό αδρότητας της επιφάνειας πρόπτωσης και από το μήκος κύματος του laser.

δ. Διέλευση με διασπορά. Κατά τη διέλευση με διασπορά το φως διαχέεται προς διάφορες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την εξασθένιση της ενέργειας του laser που φτάνει στο εσωτερικό των οδοντικών ιστών.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας laser που καθορίζουν το αποτέλεσμα της δράσης της είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (wavelength) και η πυκνότητα ισχύος (power density) της δέσμης, η οποία υπολογίζεται από το λόγο της ισχύος ανά εμβαδόν επιφάνειας (W/cm^2). Ένας άλλος παράγοντας που καθορίζει το αποτέλεσμα της δράσης της ακτινοβολίας είναι το αν αυτή είναι συνεχής (continuous wave) ή παλμική (pulse mode), η συχνότητα των παλμών (pulse repetition rate) και η διάρκεια (pulse duration). Η παλμική εκπομπή της ακτινοβολίας laser μετριέται συνήθως με την ποσότητα της ενέργειας ανά παλμό εκπομπής σε Joules ($1J = 1W/s$). Άλλα χρήσιμα χαρακτηριστικά είναι η πυκνότητα της ενέργειας (fluence - J/cm^2) και η δόση της ενέργειας στη μονάδα επιφάνειας (Dose - J/cm^2). Επίσης υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την εκπομπή της

ακτινοβολίας laser, όπως η απόσταση της πηγής από το στόχο, η εστίαση της δέσμης και η διάμετρος της δέσμης.

Ο μηχανισμός δράσης της ακτινοβολίας laser, εκτός από το μήκος κύματος, εξαρτάται από την ισχύ της ακτινοβολίας και από την τεχνική εφαρμογής της. Η τεχνική επηρεάζει το βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας του στόχου, καθώς η τεχνική της συνεχούς ακτινοβολήσης παράγει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας από την τεχνική της ακτινοβολήσης σε παλμούς. Κατά την ακτινοβολήση χαμηλής ενέργειας η αντίδραση των ιστών είναι η καθαρά οπτικής φύσης, ή ένας συνδυασμός οπτικού, φωτοχημικού και φωτοβιοενεργοποιητικού χαρακτήρα. Σε ακτινοβολήση υψηλότερης ενέργειας επικρατούν οι φωτοθερμικές αντιδράσεις, ενώ σε ακτινοβολήση με πολύ υψηλή ενέργεια παλμών προκαλείται σε πολύ μικρό χρόνο αφαίρεση ιστών⁶⁶⁻⁶⁸, κάτι όμως που δεν είναι επιθυμητό κατά τη λεύκανση.

Κατά την επιλογή ενός μήκους κύματος laser, για την αύξηση της αποτελεσματικότητας λεύκανσης πρέπει να συνδυάζονται οι προαναφερθέντες παράγοντες και είναι πολύ σημαντικό να εξετάζεται ο βαθμός της απορρόφησης της ακτινοβολίας που απαιτείται και στη συνέχεια πόση ποσότητα της ενέργειας της ακτινοβολίας θα μετατραπεί σε θερμότητα. Η απορρόφηση των φωτονίων της ακτινοβολίας laser επηρεάζει την αύξηση της θερμοκρασίας, τόσο μέσα στο λευκαντικό παράγοντα όσο και στους σκληρούς οδοντικούς ιστούς και τον πολφό. Κατά την ακτινοβολήση με laser πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά της γέλης του λευκαντικού παράγοντα, όπως η παρουσία ορισμένων πρόσθετων στοιχείων που επηρεάζουν το φάσμα απορρόφησης της ακτινοβολίας καθώς και το χρώμα. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι το πάχος της γέλης και το pH, καθώς αυτό επηρεάζει τον τρόπο σχηματισμού των ενεργών μορφών του οξειδίου.

Δ. Παράγοντες που αυξάνουν τη λευκαντική δράση του H_2O_2

Τα laser, η υπεριώδης ακτινοβολία και η ακτινοβολία ορατού φωτός μπορούν να αυξήσουν τη λεύκανση των δοντιών είτε με άμεση φωτοοξειδωση των δυσχρωμικών μορίων που βρίσκονται μέσα στο δόντι, είτε με φωτοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα συστατικά του λευκαντικού παράγοντα. Οι φωτοχημικές αντιδράσεις επηρεάζονται από το pH, τη θερμοκρασία, την ενέργεια της δέσμης του φωτός και από την παρουσία καταλυτών:

α. Το αλκαλικό περιβάλλον. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου διατηρείται πάντα σε όξινο περιβάλλον επειδή σε

αλκαλικό περιβάλλον γίνεται πιο ενεργό και έτσι έχει πολύ μικρό χρόνο ζωής. Αυτό οφείλεται στην απώλεια ενός ατόμου υδρογόνου (H^+) που οδηγεί στο σχηματισμό ενός ανιόντος υπερυδροξυλίου (HO_2^-). Στην κατάσταση αυτή αφενός μεν αυξάνεται η λευκαντική ικανότητα του λευκαντικού παράγοντα, λόγω μεγαλύτερης δραστηριότητας των ιόντων υπερυδροξυλίου, αφετέρου δε γίνεται περισσότερο ασφαλές καθώς τα όξινα προϊόντα προκαλούν απομεταλλικοποίηση και βλάβες στην αδαμαντίνη. Η μεγάλη δραστηριότητα του ανιόντος του υπερυδροξυλίου οφείλεται αφενός στην έλξη του από τα θετικά φορτισμένα μόρια των χρωστικών και αφετέρου σε επιπρόσθετες αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των χρωμοφόρων μορίων. Οι επιπρόσθετες αντιδράσεις είναι η αντίδραση Dakin, η οποία είναι αντίδραση του υπεροξειδίου του υδρογόνου με φαινυλοαλδεΐδες ή φαινοκετόνες και η αντίδραση προσθήκης της κινόνης η οποία είναι μια κυκλική ένωση. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου εμφανίζει τη μεγαλύτερη λευκαντική ικανότητα σε pH μεταξύ 9,5 και 10,8. Για την αύξηση λοιπόν της λευκαντικής του ικανότητας συνήθως αναμιγνύεται με έναν αλκαλικό παράγοντα πριν την τοποθέτησή του στο στόμα^{56,60,69}.

β. Φωτοχημικές αντιδράσεις. Όταν ένα μόριο ακτινοβολείται με φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι ικανή να το μεταβάλει από τη χαμηλή ενεργειακή κατάσταση που βρίσκεται, σε κατάσταση με υψηλότερη ενέργεια, τότε τα φωτόνια απορροφώνται και το μόριο ανεβαίνει σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο. Το μόριο μπορεί να προσλάβει ακόμα μεγαλύτερη ενέργεια, η οποία όμως αποβάλλεται με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας ή με τη μορφή φωτονίων, δηλαδή ως φθορισμός ή φωσφορισμός ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση του μορίου. Ορισμένα μόρια όταν βρίσκονται σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο διέγερσης, είναι περισσότερο ευαίσθητα σε ορισμένες χημικές αντιδράσεις, όπως η διάσπαση ή ο σχηματισμός ορισμένων χημικών δεσμών, αντιδράσεις οι οποίες δεν μπορούν να γίνουν όταν τα μόρια βρίσκονται σε χαμηλή ενεργειακή κατάσταση. Όλες αυτές τις αντιδράσεις τις μελετά ο κλάδος της φωτοχημείας. Οι φωτοχημικές αυτές αντιδράσεις συμβάλλουν στην αποτελεσματικότητα των λευκαντικών παραγόντων που περιέχουν υπεροξείδιο του υδρογόνου και είναι οι ακόλουθες⁵⁵:

1. Φωτόλυση. Κατά τη φωτόλυση τα φωτόνια της φωτεινής δέσμης απορροφούνται από ένα μόριο, με αποτέλεσμα τη διάσπαση ενός χημικού δεσμού που οδηγεί στη διάσπαση του μορίου. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου μπορεί να απορροφήσει την υπεριώδη ακτινοβο-

λία και να διασπαστεί σε δύο υδροξυλικές ρίζες (OH^*). Επειδή οι υδροξυλικές ρίζες είναι πολύ ισχυρότερος λευκαντικός παράγοντας, η φωτόλυση θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικότητας της λεύκανσης.

2. Φωτοκατάλυση. Τα ιόντα του δισθενούς σιδήρου (Fe_2^+) λειτουργούν ως καταλύτες στη διάσπαση του υπεροξειδίου του υδρογόνου σε ρίζες υδροξυλίου (OH^*) και υπεροξειδίου του υδρογόνου (HO_2^*). Η αντίδραση αυτή είναι γνωστή ως αντίδραση του Fenton. Οι παραγόμενες ρίζες υδροξυλίου ενισχύουν σημαντικά την λεύκανση. Κατά τη φωτοκατάλυση τα ιόντα του τρισθενούς σιδήρου (Fe_3^+) ενεργοποιούνται με υπεριώδη ακτινοβολία και λειτουργούν ως καταλύτες στο σχηματισμό ριζών υδροξυλίου (OH^*) τόσο από το υπεροξείδιο του υδρογόνου όσο και από το νερό⁵⁵. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αντίδραση φωτο-Fenton και περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:



3. Φωτοξειδωση. Όταν κάποια μόρια βρίσκονται σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση ύστερα από την πρόσληψη φωτονίων, έχουν την τάση αποβολής ενός ηλεκτρονίου, δηλαδή οξειδώνονται. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φωτοξειδωση και έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των χρωμοφόρων μορίων, το οποίο οδηγεί στη λεύκανση με άμεση φωτοξειδωση. Όμως για τη λεύκανση των δοντιών με φωτοξειδωση είναι απαραίτητο το φως να έχει τη δυνατότητα διείσδυσης στους οδοντικούς ιστούς. Η υπεριώδης ακτινοβολία έχει ικανοποιητικές ιδιότητες φωτολεύκανσης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι δεν διεισδύει στους οδοντικούς ιστούς και μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους μαλακούς ιστούς και υπερθέρμανση του πολφού. Έχει βρεθεί ότι η ακτινοβολία laser KTP πράσινου φωτός είναι η πιο αποτελεσματική για άμεση λεύκανση δοντιών με δυσχρωμίες από τετρακυκλίνη^{37,38,41}, καθώς δεν απορροφάται από το νερό και τον υδροξυαпатίτη. Έτσι, διεισδύει ικανοποιητικά στους οδοντικούς ιστούς και διασπά τα χρωμοφόρα μόρια τα οποία απορροφούν το πράσινο φως. Οι ακτινοβολίες laser λόγω της μεγάλης τους έντασης, είναι πιο αποτελεσματικές στη φωτοξειδωτική λεύκανση από τις άλλες ακτινοβολίες^{26,29,32-35}.

4. Φωτοθερμική δράση. Επειδή οι χημικές αντιδράσεις γίνονται ταχύτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες, για την αποτελεσματικότερη δράση των λευκαντικών παραγόντων χρησιμοποιούνται θερμαντικές συσκευές, ειδικές λάμπες και laser για την αύξηση της θερμοκρασίας του λευκαντικού παράγοντα. Από την

εξίσωση του Arrhenius που αφορά την συσχέτιση του ρυθμού εξέλιξης μιας χημικής αντίδρασης με την θερμοκρασία προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C επιταχύνει τη διάσπαση του υπεροξειδίου του υδρογόνου κατά 2,2 φορές⁷⁰. Επιπλέον η αύξηση της θερμοκρασίας επιτρέπει την καλύτερη διείσδυση του υπεροξειδίου του υδρογόνου στους οδοντικούς ιστούς⁷¹. Όμως ακόμα και όταν χρησιμοποιείται «ψυχρό» φως και laser προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας με φωτοθερμική δράση. Το φως που απορροφάται από τα μόρια τόσο του λευκαντικού gel όσο και από αυτά των οδοντικών ιστών, μεταβάλλει την ενεργειακή τους κατάσταση και προκαλεί μοριακή δόνηση (molecular vibration) που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας. Η απορρόφηση του φωτός από τα μόρια στα οποία προσπίπτει εξαρτάται από το φάσμα απορρόφησης των μορίων και το φάσμα εκπομπής της λάμπας ή του laser. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της αποτελεσματικότητας της λεύκανσης με την τεχνική αυτή εμπεριέχει τον κίνδυνο αφυδάτωσης της αδαμαντίνης και μη αναστρέψιμης βλάβης στον πολφό αν δεν ακολουθηθούν οι προτεινόμενες διαδικασίες^{60,66,72}.

5. Φωτοδυναμική δράση. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη φωτοδυναμική θεραπεία (photodynamic therapy), όπου ορισμένες φωτοευαίσθητες χρωστικές υφίστανται μοριακή διέγερση από το φως. Στην κατάσταση διέγερσης οι χρωστικές αυτές μπορούν να δώσουν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας τα οποία προσλαμβάνονται από το O₂ και το H₂O₂ και σχηματίζονται H₂O₂, HO₂^{*} και HO^{*}. Επίσης κατά τη διαδικασία διέγερσης των μορίων των χρωστικών παράγεται μονήρες οξυγόνο (¹O₂). Τελικά η φωτοδυναμική δράση μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη λεύκανση των δοντιών με το σχηματισμό δύο πολύ ισχυρών λευκαντικών παραγόντων, όπως είναι το μονήρες οξυγόνο και η ρίζα του υδροξυλίου^{41,56,61,62,73-76}.

Συμπεράσματα

1. Με βάση τη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία είναι δύσκολο να βγάλει κανείς ασφαλή συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα των λευκαντικών παραγόντων που ενεργοποιούνται με ειδικές λάμπες ή laser.
2. Η λεύκανση με υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι μια χημική διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται οξειδωτική διάσπαση των διαφόρων χρωστικών.
3. Για να είναι αξιόπιστος ένας οξειδωτικός παράγοντας πρέπει να έχει ισχυρή οξειδωτική ικανότητα και να δημιουργεί μορφές ενεργού οξυγόνου που να μπορούν να διεισδύσουν εύκολα στην αδαμαντίνη και στην οδοντίνη.
4. Το αποτέλεσμα της δράσης του laser εξαρτάται από το μήκος κύματος, την ένταση της δέσμης, το είδος της ακτινοβολήσης, τη συχνότητα και τη διάρκεια.
5. Οι φωτοχημικές αντιδράσεις στον λευκαντικό παράγοντα κατά την ακτινοβολήση με φως ή laser επηρεάζονται από το pH, τη θερμοκρασία, την ενέργεια της φωτεινής δέσμης και από την παρουσία καταλυτών.
6. Ο οδοντίατρος πρέπει να γνωρίζει καλά την τεχνική της λεύκανσης των δοντιών στο ιατρείο με τη χρήση φωτός ή laser και να την εφαρμόζει βασιζόμενος σε τεκμηριωμένες επιστημονικές γνώσεις.

Επικοινωνία:

Δημήτριος Διονυσόπουλος

Email: ddionys@dent.auth.gr

τηλ: 2310999578

Corresponding author:

Dimitrios Dionysopoulos

Email: ddionys@dent.auth.gr

tel: +302310999578

Βιβλιογραφία

1. Joiner A. The bleaching of teeth: a review of the literature. *J Dent* 2006; 34:412-9.
2. Buchalla W, Attin T. External bleaching therapy with activation by heat, light or laser—a systematic review. *Dent Mater* 2007; 23:586-96.
3. Dionysopoulos D, Strakas D, Koliniotou-Koumpia E. The influence of a novel in-office tooth whitening procedure an Er,Cr:YS-GG laser on enamel surface morphology. *Lasers Surg Med* 2015; 47:503-11.
4. Ontiveros JC. In-office vital bleaching with adjunct light. *Dent Clin N Am* 2011; 52:241-53.
5. Joiner A. Review of the effects of peroxide on enamel and dentine properties. *J Dent* 2007; 35:889-96.
6. Goldberg M, Grootveld M, Lynch E. Undesirable and adverse effects of tooth-whitening products: a review. *Clin Oral Investig* 2010; 14:1-10.
7. Dominguez A, Garcia JA., Costela A, Gomez C. Influence of the light source and bleaching gel on the efficacy of the tooth whitening process. *Photomed Laser Surg* 2011; 29:53-9.
8. Goharkhay K, Schoop U, Wernisch J, Hartl S, De Moor R et al. Frequency doubled neodymium: yttrium-aluminum-garnet and diode laser-activated power bleaching-pH, environmental scanning electron microscopy, and colorimetric in vitro evaluations. *Lasers Med Sci* 2009;24:339-46.
9. Διονυσόπουλος Δ. Οι βιολογικές παρενέργειες της λεύκανσης των ζωντανών δοντιών. *Οδοντοστοματολογική Πρόοδος*. 2015; 69:2-19
10. Parreiras SO, Vianna P, Kossatz S, Loguercia AD, Reis A. Effects of light activated in-office bleaching on permeability, microhardness, and mineral content of enamel. *Oper Dent* 2014; 29:225-30.
11. M'Quillen JH. Bleaching discolored teeth. *Dent Cosmos* 1867; 8:457-65.
12. Westlake A. Bleaching teeth by electricity. *Am J Dent* 1895; 29:101.
13. Ames JW. Removing stains from mottled enamel. *Am Dent Assoc* 1937; 94:1674-7.
14. Sun G. The role of lasers in cosmetic dentistry. *Dent Clin North Am* 2000; 44:831-50.
15. Haywood VB, Heymann HO. Nightguard vital bleaching. *Quintessence Int* 1989; 20:173-6.
16. Ontiveros JC. In-office vital bleaching with adjunct light. *Dent Clin North Am* 2011; 55:241-53.
17. Sulieman M, Addy M, Rees JS. Development and evaluation of a method in vitro to study the effectiveness of tooth bleaching. *J Dent* 2003; 31:415-22.
18. Joiner A. The bleaching of teeth: a review of the literature. *J Dent* 2006; 34:412-9.
19. Zhang C, Wang X, Kinoshita JI, Zhao B, Toko T, et al. Effects of KTP laser irradiation, diode laser, and LED on tooth bleaching: a comparative study. *Photomed Laser Surg* 2007; 25:91-5.
20. Wetter NU, Walverde DA, Kato IT, Eduardo CDP. Bleaching efficacy of whitening agents activated by xenon lamp and 960-nm diode radiation. *Photomed Laser Surg* 2004; 22:489-93.
21. Sydney GB, Barletta FB, Sydney RB. In vitro analysis of effect of heat used in dental bleaching on human dental enamel. *Braz Dent J* 2002; 13:166-9.
22. Almeida LCDAGD, Riehl H, Santos PHD, Sundfeld MLMM, Briso ALF. Clinical evaluation of the effectiveness of different bleaching therapies in vital teeth. *Int Periodont Restor Dent* 2012; 32:303-9.
23. Martin J, Fernandez E, Bahamondes V, Werner A, Elphick K, et al. Dentin hypersensitivity after teeth bleaching with in-office systems. Randomized clinical trial. *Am J Dent* 2013; 26:10-4.
24. Moncada G, Sepúlveda D, Elphick K, Contente M, Estay J, et al. Effects of light activation, agent concentration, and tooth thickness on dental sensitivity after bleaching. *Oper Dent* 2013; 38:467-76.
25. Charakorn P, Cabanilla LL, Wagner WC, Foong WC, Shaheen J, et al. The effect of preoperative ibuprofen on tooth sensitivity caused by in-office bleaching. *Oper Dent* 2009; 34:131-5.
26. Bruzell EM, Johnsen B, Aalerud TN, Dahl JE, Christensen T. In vitro efficacy and risk for adverse effects of light-assisted tooth bleaching. *Photochem Photobiol Sci* 2009; 8:377-85.
27. Buchalla W, Attin T. External bleaching therapy with activation by heat, light or laser—a systematic review. *Dent Mater* 2007;23:586-96.
28. Hein DK, Ploeger BJ, Hartup JK, Wagstaff RS, Palmer TM, et al. In-office vital tooth bleaching—what do lights add? *Compend Contin Educ Dent* 2003; 24:340-52.
29. Papathanasiou A, Kastali S, Perry RD, Kugel G. Clinical evaluation of a 35% hydrogen peroxide in-office whitening system. *Compend Contin Educ Dent* 2002; 23:335-8.
30. Tavares M, Stultz J, Newman M, Smith V, Kent R, et al. Light augments, tooth whitening with peroxide. *J Am Dent Assoc* 2003; 134:167-75.
31. Ziembra SL, Felix H, MacDonald J, Ward M. Clinical evaluation of a novel dental whitening lamp and light-catalyzed peroxide gel. *J Clin Dent* 2005; 16:123-7.
32. Ontiveros JC, Paravina RD. Color change of vital teeth exposed to bleaching performed with and without supplementary light. *J Dent* 2009; 37:840-7.
33. Calatayud JO, Calatayud CO, Zaccagnini AO, Box MJ. Clinical efficacy of a bleaching system based on hydrogen peroxide with or without light activation. *Eur J Esthet Dent* 2010; 5:216-24.
34. Gurgan S, Cakir FY, Yazici E. Different light-activated in-office bleaching systems—a clinical evaluation. *Lasers Med Sci* 2009; 25:817-22.
35. Kugel G, Papathanasiou A, Williams AJ 3rd, Anderson C, Ferreira S. Clinical evaluation of chemical and light-activated tooth whitening systems. *Compend Contin Educ Dent* 2006; 27:54-62.
36. Pleffken PR, Borges AB, De Paiva Goncalves SE, Torres CRG. The effectiveness of low-intensity red laser for activating a bleaching gel and its effect in temperature of the bleaching gel and the dental pulp. *Esthet Restor Dent* 2012; 24:126-32.
37. Kuzekanani M, Walsh LJ. Quantitative analysis of KTP laser photodynamic bleaching of tetracycline-discolored teeth. *Photomed Laser Surg* 2009; 27:521-5.
38. Kinoshita J, Jafarzadeh H, Forghani M. Vital bleaching of tetracycline-stained teeth by using KTP laser: a case report. *Eur J Dent* 2009; 3:229-32.
39. Lima DA, Aguiar FH, Liporoni PC, Munin E, Ambrosano GM, et al. In vitro evaluation of the effectiveness of bleaching agents activated by different light sources. *J Prosthodont* 2009; 18:249-54.
40. Dostalova T, Jelinkova H, Housova D, Sulc J, Nemecek M, et al. Diode laser-activated bleaching. *Braz Dent J* 2004; 15:S13-8.
41. Bennett ZY, Walsh LJ. Efficacy of LED versus KTP laser activation of photodynamic bleaching of tetracycline-stained den-

- tine. *Lasers Med Sci* 2015; 30:1823-8.
42. Wetter NU, Barroso MC, Pelino JE. Dental bleaching efficacy with diode laser and LED irradiation: an in vitro study. *Lasers Surg Med* 2004; 35:254-8.
43. Mondelli RF, de Azevedo JF, Francisconi AC, de Almeida CM, Ishikiriama SK. Comparative clinical study of the effectiveness of different dental bleaching methods-two year follow-up. *J Appl Oral Sci* 2012; 20:435-43.
44. Gomes MN, Francci C, Medeiros IS, Salgado NR, Riehl H, et al. Effect of light irradiation on tooth whitening: enamel microhardness and color change. *J Esthet Restor Dent* 2009; 21:387-94.
45. Wetter NU, Walverde D, Kato IT, Eduardo CDP. Bleaching efficacy of whitening agents activated by xenon lamp and 960-nm diode radiation. *Photomed Laser Surg* 2004; 22:489-93.
46. Gurgan S, Cakir FY, Yazici E. Different light-activated in-office bleaching systems: a clinical evaluation. *Lasers Med Sci* 2010; 25:817-22.
47. Wetter NU, Branco EP, Deana AM, Pelino JEP. Color differences of canines and incisors in a comparative long-term clinical trial of three bleaching systems. *Lasers Med Sci* 2009; 24:941-7.
48. Marson FC, Sensi LG, Vieira LCC, Araujo E. Clinical evaluation of in-office dental bleaching treatments with and without the use of light-activation sources. *Oper Dent* 2008; 33:15-22.
49. De Moor RJG, Verheyen J, Verheyen P, Diachuk A, Meire MA, et al. Laser teeth bleaching : Evaluation of eventual side effects on enamel and the pulp and the efficiency in vitro and in vivo. *Scientific World Journal* 2015; 2015:835405.
50. Kivanc BH, Arisu HD, Ulusoy OI, Saglam BC, Gorgul GG. Effect of light-activated bleaching on pulp chamber temperature rise: an in vitro study. *Aust Endod J* 2012; 16:355-9.
51. Sari T, Celik G, Usumez A. Temperature rise in pulp and gel during laser-activated bleaching: in vitro. *Lasers Med Sci* 2013; 30:577-82.
52. Fornaini C, Lagori G, Merigo E, Meleti M, Manfredi M, et al. Analysis of shade, temperature and hydrogen peroxide concentration during dental bleaching: in vitro study with the KTP and diode lasers. *Lasers Med Sci* 2013; 28:1-6.
53. Luk K, Tam L, Hubert M. Effect of light energy on peroxide tooth bleaching. *J Am Dent Assoc* 2004; 135:194-201.
54. Zumdahl SS, Zumdahl SA. Part IV. Type of reactions and solution chemistry, in Chemistry, S. S. Zumdahl and S. A. Zumdahl, Eds., pp. 212-277, Brooks/Cole, Cengage Learning, Belmont, Calif, USA, 8th edition, 2008.
55. De Moor RJG, Verheyen J, Diachuk A, Verheyen P, Meire MA, et al. Insight in the chemistry of laser-activated dental bleaching. *Scientific World Journal* 2015; 2015:650492.
56. Garber DA, Goldstein RE, Goldstein GE, Schwartz CG. Dentist monitored bleaching: a combined approach. *Pract Periodont Aesthet Dent* 1991; 3:22-6.
57. Kirk RE, Othmer DF, Kroschwitz JI, Howe-Grant M. Hydrogen peroxide, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, R. E. Kirk, D. E Othmer, J. I. Kroschwitz, and M. Howe-Grant, Eds., vol. 13, pp. 13-15, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 4th edition, 1991.
58. Cavalli V, Arrais CAG, Giannini M, Ambrosano GMB. High-concentrated carbamide peroxide bleaching agents effects on enamel surface. *J Oral Rehabil* 2004; 31:155-9.
59. Frysh H. Chemistry of bleaching, in Complete Dental Bleaching, R. E. Goldstein and D. A. Garber, Eds., pp. 25-33, Quintessence, Chicago, 111, USA, 1st edition, 1995.
60. Zaragoza VMT. Bleaching of vital teeth: technique, *Esto Modeo* 1984; 9:7-30.
61. Pan J, Sun P, Tian Y, Zhou H, Wu H, et al. A novel method of tooth whitening using cold plasma microjet driven by direct current in atmospheric-pressure air. *IEEE Trans Plasma Sci* 2010; 38:3143-51.
62. Pan J, Yang X, Sun K, Wang J, Sun P, et al. Tooth bleaching using low concentrations of hydrogen peroxide in the presence of a nonthermal, plasma jet. *IEEE Trans Plasma Sci* 2013; 41:325-9.
63. Arwill T, Myrberg N, Söremark R. Penetration of radioactive isotopes through enamel and dentine. II. Transfer of ^{22}Na in fresh and chemically treated dental tissues. *Odontol Revy* 1962; 20:47-54.
64. Meire M, de Moor RJG. Lasers in endodontics: laser disinfection, an added value ? *ENDO* 2007; 1:159-72.
65. de Moor RJG, Delme KIM. Laser-assisted cavity preparation and adhesion to erbium-laser tooth structure: part 1. Laser-assisted cavity preparation. *J Adhes Dent* 2009; 11:427-38.
66. Buchalla W, Attin T. External bleaching therapy with activation by heat, light or laser – a systematic review. *Dent Mater* 2007; 23:586-496.
67. Luk K, Tam L, Hubert M. Effect of light energy on peroxide tooth bleaching. *J Am Dent Assoc* 2004; 135:194-201.
68. Kashima-Tanaka M, Tsujimoto Y, Kawamoto K, Senda N, Ito K, Yamazaki M. Generation of free radicals and/or active oxygen by light or laser irradiation of hydrogen peroxide or sodium hypochlorite. *Endod* 2003; 29:141-3.
69. Frysh H, Bowles WH, Baker F, Rivera-Hidalgo F, Guillen G. Effect of pH on hydrogen peroxide bleaching agents. *J Esthet Dent* 1995; 7:130-3.
70. Dionysopoulos D, Strakas D, Tolidis K, Tsitrou E, Koumpia E, Koliniotou-Koumpia E. Spectrophotometric analysis of the effectiveness of a novel in-office laser-assisted tooth bleaching method using Er,Cr:YSGG laser. *Lasers Med Sci* 2017; 32:1811-8.
71. Bowles WH, Ugwuneri Z. Pulp chamber penetration by hydrogen peroxide following vital bleaching procedures. *J Endod* 1987; 13:375-7.
72. Zalkind M, Arwaz JR, Goldman A, Rotstein I. Surface morphology changes in human enamel, dentin and cementum following bleaching: a scanning electron microscopy study. *Endod Dent Traumatol* 1996; 12:82-8.
73. Klan P, Wirz J. Photochemical reaction mechanisms and reaction intermediates, in Photochemistry of Organic Compounds: From Concepts to Practice, P. Klan and J. Wirz, Eds., Wiley, Wiltshire, UK, 1st edition, 2009.
74. Mello HS. The mechanism of tetracycline staining in primary and permanent teeth. *J Dent Child* 1967; 34:478-87.
75. Vanderstricht K, Nammour S, de Moor R. Power bleaching with the KTP laser. *Rev Belge Med Dent* (1984) 2009; 64:129-39.
76. Papadopoulos A, Dionysopoulos D, Strakas D, Koumpia E, Tolidis K. Spectrophotometric evaluation of the effectiveness of Er,Cr:YSGG laser-assisted intracoronal tooth bleaching treatment using different power settings. *Photodiagnosis Photodyn Ther* 2021; 34:102272.