



الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة دمشق
كلية طب الأسنان
قسم التعويضات الثابتة

مقارنة قوة ارتباط الشد للراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي في إلصاق الترميمات غير المباشرة (دراسة مخبرية)

بحث علمي أُعدّ لنيل درجة الماجستير في طب الأسنان
اختصاص تعويضات الأسنان الثابتة

إعداد:

مريم محمد صالح المفتي

إشراف:

المدرّس الدكتور عصام جاموس

1446 – 2025 هـ

تصريح

"لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم أخذه بالكامل من عمل آخر، أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في هذه الجامعة أو في أية جامعة أخرى أو أي معهد تعليمي."

قرار لجنة الحكم وتوقيعات لجنة المناقشة:

فهرس المحتويات

III.....	فهرس المحتويات
VI	قائمة الأشكال
VIII.....	قائمة الجداول
1	ملخص الدراسة
1	الباب الأول: الجزء التمهيدي Introductory Section
2	1.1 المقدمة:
3	1.2 مشكلة البحث Statement of the Problem
4	1.3 الهدف من البحث Objective of the Study
4	1.4 تساؤل البحث Research Question
4	1.5 فرضيات البحث Study Hypothesis
4	1.6 مبررات البحث Justification of the Study
5	1.7 أهمية البحث Significance of the Study
6	1.8 محدوديات البحث Limitations of the study
7	الباب الثاني: المراجعة النظرية Literature Review
8	2.1 مقدمة
8	2.2 الترميمات غير المباشرة Indirect Restorations
11.....	2.3 الخزف السني Dental Ceramic
17.....	2.4 الخزف السني IPS e.max
20.....	2.5 الارتباط إلى النسيج السني Adhesion to Tooth Structure
25.....	2.6 تسخين الراتنج المركب Preheating Composite Resins

27.....	2.7 المركب Composite Resin الراتنج
32.....	2.8 المركب كئلي المء Bulk-fill Composite Resin الراتنج
35.....	2.9 الأسمنت الراتنجي Resin Cement
36.....	2.10 تأثير التسخين على خصائص الراتنج المركب
40.....	2.11 تأثير التسخين على خصائص الراتنج المركب
41.....	2.12 الدراسات السابقة
50.....	2.13 قوة ارتباط الشء Tensile Bond Strength
51	الباب الثالث: المواد والطرائق Materials and Methods
52.....	3.1 عينة البحث
53.....	3.2 المواد المستخدمة في البحث
59.....	3.3 الأدوات والأجهزة المستخدمة في البحث
62.....	3.4 الطرائق Methods
77	الباب الرابع: النتائج Results
78.....	4.1 وصف العينة
79.....	4.2 الإحصاء الوصفي Descriptive Statistics
84.....	4.3 الإحصاء التحليلي Analytical Statistics
86.....	4.4 الملخص والاستنتاج:
87	الباب الخامس: المناقشة Discussion
88.....	5.1 مناقشة فكرة البحث وهدفه
89.....	5.2 مناقشة مواد البحث وطرائقه
94.....	5.3 مناقشة نتائج البحث

105.....	Conclusions	الباب السادس: الاستنتاجات
107.....	Suggestions and Recommendations	الباب السابع: المقترحات والتوصيات
108	7.1	التوصيات
108	7.2	المقترحات
109	References	المراجع
125	Abstract	

قائمة الأشكال

- شكل 1 مخطط ترسمي لبعض أنواع الترميمات غير المباشرة..... 9
- شكل 2 البنية الكيميائية للخزف البللوري 11
- شكل 3 أصناف الخزف 13
- شكل 4 مخطط ترسمي لتقنية التراص 16
- شكل 5 مخطط ترسمي لتقنية التشريب 16
- شكل 6 خزف IPS e.max CAD في الحالة الزرقاء وبعد المعالجة الحرارية 18
- شكل 7 خزف IPS e.max Press صورة بالمجهر الإلكتروني توضح شكل البللورات 18
- شكل 8 البنية الجزيئية للمونوميرات الشائعة في الراتنجات السنية..... 29
- شكل 9 جهاز TMCalset لتسخين كبسولات ومحاقن وعبوات الراتنج المركب 38
- شكل 10 كبسولات راتنج مركب..... 38
- شكل 11 صورة لعملية إلصاق ترميم غير مباشر خزفي 39
- شكل 12 راتنج مركب نانومتري هجين nanohybrid composite 53
- شكل 13 راتنج مركب هجين hybrid composite 54
- شكل 14 أسمنت الراتنجي Variolink N 55
- شكل 15 المادة الرابطة: Tetric N-Bond Universal 56
- شكل 16 مهيب الخزف: Monobond N 57
- شكل 17 مخرش حمض الفوسفور بتركيز 37% وحمض فلور الماء 10% 57
- شكل 18 الأدوات المستخدمة بالبحث 60
- شكل 19 بياكوليس رقمي..... 61
- شكل 20 شكل جهاز التسخين..... 61
- شكل 22 المكبرة الضوئية Stereomicroscope المستخدمة في تحديد نمط الفشل..... 61
- شكل 21 جهاز اختبار الشد Instron 1011 61
- شكل 23 مقياس حرارة بالأشعة تحت الحمراء Amprobe 62
- شكل 24 نموذج من عينة الأسنان..... 63
- شكل 25 سطح السن بعد التحضير 64

شكل 26	سن مثبت ضمن قاعدة راتنجية	64
شكل 27	تحضير طبقة اللطاخة	66
شكل 28	تطبيق المادة الرابطة	67
شكل 29	تخريش مكعب خزفي	68
شكل 30	تطبيق مهيب الخزف	69
شكل 31	مزج الأسمنت الراتنجي	70
شكل 32	تسخين الراتنج المركب التقليدي	71
شكل 33	تسخين الأسمنت الراتنجي المركب كتلي الملء	72
شكل 34	عينات البحث	73
شكل 35	قياس مساحة سطح المكعب الخزفي	74
شكل 36	تحديد أنماط الفشل وفقاً للمواصفة 10365	75
شكل 37	مخطط المتوسط والخطأ المعياري لقوة ارتباط الشد في مجموعات الدراسة	80
شكل 38	نمط الفشل في مجموعات الدراسة	81
شكل 39	فشل التصاقى لإحدى عينات مجموعة Bulk-fill	81
شكل 40	فشل تماسكي لإحدى عينات مجموعة Bulk-fill	82
شكل 41	فشل مختلط لإحدى عينات Resin Cement	82
شكل 42	فشل تماسكي لإحدى عينات مجموعة Traditional	83
شكل 43	شكل فشل مختلط لإحدى عينات مجموعة Bulk-fill	83

قائمة الجداول

48.....	جدول 1 ملخص الدراسات السابقة
58.....	جدول 2 قائمة المواد المستخدمة في البحث
59.....	جدول 3 قائمة الأدوات والأجهزة المستخدمة في البحث
78.....	جدول 3 مجموعات الدراسة
79.....	جدول 4 البيانات الوصفية لقوة ارتباط الشد في لمجموعات المدروسة
80.....	جدول 5 نمط الفشل في مجموعات الدراسة الثلاث
84.....	جدول 6 اختبار التوزيع الطبيعي للبيانات Test of normality
85.....	جدول 7 اختبار تجانس التباينات Tests of Homogeneity of Variances
85.....	جدول 8 اختبار تحليل التباين ANOVA
86.....	جدول 9 اختبار فيشر Fisher Exact Test

ملخص الدراسة

المقدمة: أظهرت الدراسات الحديثة تزايد الاهتمام باستخدام الراتنجات المركبة التقليدية المسخنة كبدايل محتملة للأسمنت الراتنجي التقليدي في إجراءات إلصاق الترميمات غير المباشرة، ويرجع ذلك إلى تحسن سيولتها عند تسخينها. ومع ذلك، يقيد عمق التصلب المحدود للراتنجات التقليدية استخدامها في الترميمات واسعة السطح أو المعتمدة. وللتغلب على ذلك، قد توفر الراتنجات المركبة كتلية الملء المسخنة، التي تتميز بعمق تصلب محسن وتطبيق مبسط، خياراً أكثر ملاءمة لإلصاق الترميمات غير المباشرة.

الهدف: هدفت هذه الدراسة المخبرية إلى مقارنة قوة ارتباط الشد للراتنج المركب التقليدي المسخن Tetric N-Ceram والراتنج المركب كتلي الملء المسخن Tetric N-Ceram Bulk Fill مع الأسمنت الراتنجي Variolink N عند استخدامها كماد إلصاق للترميمات غير المباشرة.

المواد والطرق: جُمعت ثلاثون سناً بشرية من الأرحاء الثالثة، وقُسمت إلى ثلاث مجموعات 10 عينات لكل مجموعة حسب مادة الإلصاق المستخدمة. حُضرت السطوح الإطباقية ليصبح مستوياً. حُرش العاج بحمض الفوسفور 37%، ثم طبقت مادة الربط Tetric N-Bond Universal. حُرش مكعبات خزفية مصنعة من IPS e.max Press (4 × 4 × 6 mm) بحمض فلور الماء 10%، وهيئت بمادة Monobond، ثم ألصقت إلى العاج. سُخّنت الراتنجات المركبة إلى 69 درجة مئوية باستخدام جهاز AR Heater، قبل تطبيقها على سطوح الأسنان ثم تم تصلبها ضوئياً. أما بالنسبة للأسمنت الراتنجي، خلطت المادة بدرجة حرارة الغرفة وطُبقت. خضعت جميع العينات إلى 1000 دورة حرارية، ثم اختبرت قوة ارتباط الشد باستخدام جهاز Instron 1011، وتم تحديد نمط الفشل باستخدام المكبرة الضوئية. تم تحليل البيانات باستخدام برنامج SPSS.

النتائج: لم يكشف اختبار ANOVA أحادي الاتجاه عن فروق ذات دلالة إحصائية في قوة ارتباط الشد بين مواد الإلصاق الثلاثة (الأسمنت الراتنجي، الراتنج كتلي الملء، والراتنج التقليدي). وبالمثل، لم تُلاحظ فروق ذات دلالة إحصائية في أنماط الفشل بين المواد الثلاثة.

الخلاصة: ضمن حدود هذه الدراسة المخبرية، تشير النتائج إلى أن الراتنجات المركبة المسخنة مثل Tetric N-Ceram و Tetric N-Ceram Bulk Fill أظهرت قوة ارتباط شد مماثلة للأسمنت الراتنجي التقليدي عند استخدامها كماد إلصاق للترميمات غير المباشرة. ومع ذلك، هناك حاجة إلى دراسات إضافية لتقييم الخصائص الميكانيكية الأخرى والأداء السريري قبل النظر في استخدامها الروتيني في الممارسات السريرية.

الباب الأول: الجزء التمهيدي

Introductory Section

1.1 المقدمة:

شهدت الترميمات الخزفية تطوراً ملحوظاً في العقود الأخيرة، وذلك بفضل التقدم في تقنيات التصميم والتصنيع المحوسب CAD/CAM وتطور المواد الخزفية، مما أدى إلى إنتاج ترميمات ذات خصائص جمالية وميكانيكية عالية، بالإضافة إلى إمكانية إتمام تصنيعها وتثبيتها خلال جلسة علاجية واحدة (Mutlu et al., 2021). ويُعد الخزف المملوء ببلورات ثنائي السيليكات الليثيوم من أبرز المواد المستخدمة في هذا المجال، إذ يتمتع بجمالية ممتازة، وشفافية عالية، وتوافق حيوي، وانخفاض في تراكم اللويحة الجرثومية، ومقاومة للاهتراء، وثبات لوني، ومتانة، وخصائص ميكانيكية جيدة (Tysowsky G., 2009). كما يُسهم الإلصاق باستخدام تقنيات الإلصاق الرابط في تعزيز قوة الخزف المملوء بثنائي سيليكات الليثيوم ومقاومته للكسر، مما يسمح باستخدامه مع تحضيرات سنّية محافظة (Rojpaibool & Leevailoj, 2017). وبالرغم من الأداء السريريّ الجيد لهذه الترميمات، استمرّ تسجيل بعض حالات الفشل، مثل فشل الارتباط والكسر والنخور الثانوية وانحلال الأسمنت، والتي قد تتأثر بعوامل متعدّدة، أبرزها نوع مادة الإلصاق (Liu et al., 2018; Pilecco et al., 2023). استخدم الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب لإلصاق الترميمات غير المباشرة، نظراً لخصائصه التي تجمع بين التصلب الضوئي والكيميائي، مما يحسّن تآثره في المناطق العميقة. إلا أنّ بعض الدراسات السريريّة طويلة الأمد أظهرت محدوديات هذا الخيار، حيث سُجّل حدوث تلون حفافي واهتراء في الأسمنت بعد 11 سنة، إلى جانب تقارير عن حدوث فشل الارتباط ووجود فجوات وكسور مجهرية (Pallesen & Qvist, 2003). يستخدم الراتنج المركّب كمادة إلصاق بديلة، كإحدى محاولات تجاوز هذه المحدوديات، نظراً لمحتواه العالي من الملء والذي ينعكس على خواصه الميكانيكية التي تتفوّق على الأسمنت الراتنجي، بالإضافة إلى ثباته اللوني الأعلى والتنوّع الأكبر في ظلاله اللونية. وقد أظهرت الدراسات أنّ تسخين الراتنج المركّب يقلّل من لزوجه ويزيد من سيولته، ممّا يعزّز تآثره من خلال زيادة حركة الجذور والمونوميرات وتشكيل شبكة بوليميرية أكثر ترابطاً (Yang et al., 2016). ثبت أيضاً أنّ تسخين الراتنج المركّب يُحسّن عدّة خصائص فيزيائية، مثل القساوة (Dionysopoulos et al., 2015; Mohammadi et al., 2016) والانطباق الحفافي، ويقلّل من تشكّل الفجوات في الترميم (Regina Fróes-Salgado et al., 2010)، والتقلص، والثخانة الفلمية (Tauböck et al., 2015). وتُظهر هذه الخصائص مجتمعة أنّ الراتنج المركّب المسخّن يعدّ خياراً واعداً لإلصاق الترميمات غير المباشرة. وقد بيّنت دراسات سابقة أنّه قد يتفوّق الراتنج المركّب المسخّن على الأسمنت الراتنجي من حيث قوة ارتباط الشد (Goulart et al., 2018; Shahin et al., 2021). وقوة ارتباط القص (Aboushahba et al., 2021).

ودرجة التماثر (Acquaviva et al., 2009) ، بالإضافة إلى تحسين الختم والانطباق الحفافي (Alvarado et al., 2020) والثبات اللوني (Almeida et al., 2015).

وعلى الرغم من أن الراتنج المركب التقليدي المسخن درس بشكل واسع نسبياً، إلا أن الراتنج المركب كتلي الملء (Bulk Fill) لم يُدرس بشكل كافٍ كمادة إصاق، رغم امتلاكه مزايا إضافية، أهمها قدرته على التصلب بعمق أكبر. وهذه الميزة تجعله مناسباً خصوصاً في حالات الترميمات العميقة أو الكتيمة للضوء، والتي قد تعيق فعالية التصلب الضوئي التقليدي.

تُشير بعض الدراسات السريرية إلى نتائج واعدة لاستخدام الراتنج المركب المسخن في الإصاق، حيث أظهرت معدلات ديمومة أعلى في ترميمات الأرحاء (Staněk et al., 2022؛ D'Arcangelo et al., 2014). وعلى الرغم من أن الدراسات المخبرية قارنت بين أنواع متعددة من المواد اللاصقة من حيث عدة خصائص مثل قوة الارتباط، والثبات اللوني، ودرجة التماثر، والثخانة الفلمية، لكن ما تزال نتائجها غير حاسمة، خاصة فيما يتعلق باستخدام الراتنج المركب كتلي الملء كمادة لاصقة إذ لا توجد دراسات كافية تقارن استخدامه في إصاق الترميمات بالمقارنة مع الراتنج المركب التقليدي والأسمنت الراتنجي وبالأخص من حيث قوة الارتباط، إذ تُعتبر قوة الارتباط مؤشراً مهماً في تقييم فعالية مواد الإصاق، ويُوصى باستخدامها جنباً إلى جنب مع اختبارات أخرى لتقديم تقييم شامل لأداء المواد الإصاق (El Mourad, 2018).

من هنا، تبرز الحاجة لإجراء دراسات مخبرية إضافية لتقييم فعالية الراتنج المركب كتلي الملء المسخن كمادة إصاق في الترميمات غير المباشرة، خاصةً من حيث قوة ارتباط الشد تحت ظروف تحاكي الواقع السريري.

1.2 مشكلة البحث Statement of the Problem

رغم توفر العديد من الدراسات التي تناولت أداء الراتنج المركب التقليدي المسخن كمادة إصاق؛ ندرت الدراسات التي بحثت استخدام الراتنج المركب كتلي الملء المسخن لهذا الغرض، خصوصاً بالمقارنة مع مواد الإصاق التقليدية الأخرى مثل الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب. ومع ازدياد استخدام الترميمات الخزفية غير النافذة للضوء أو واسعة السطح، تبرز الحاجة إلى مادة إصاق تتمتع بعمق تصلب كافٍ لضمان فعالية التصلب الضوئي تحت هذه الظروف. لذا، تتمثل مشكلة هذه الدراسة في تقييم مدى فعالية الراتنج المركب كتلي الملء المسخن كمادة لاصقة بديلة عند إصاق الترميمات غير المباشرة، ومقارنة قوة ارتباطه مع كل من الراتنج المركب التقليدي المسخن والأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب، لتحديد ما إذا كان يشكل خياراً كافئاً أو متفوقاً من الناحية الميكانيكية.

1.3 الهدف من البحث Objective of the Study

هدفت هذه الدراسة المخبرية إلى مقارنة قوة ارتباط الشد لثلاث مواد مختلفة، عند استخدامها في إلصاق الترميمات الخزفية المصنعة من الخزف الزجاجي المملوء بثنائي سيليكات الليثيوم (IPS e.Max Press) مع العاج، وهي: الراتنج المركب كتلي الملاء المسخن لدرجة 69 مئوية (Tetric-N Ceram Bulkfill)، والراتنج المركب التقليدي المسخن لدرجة حرارة 69 مئوية (Tetric N-Ceram)، والأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب (Variolink N).

1.4 تساؤل البحث Research Question

يطرح هذا البحث التساؤل التالي:

هل يؤثر نوع مادة الإلصاق (الراتنج المركب كتلي الملاء المسخن، الراتنج المركب التقليدي المسخن، الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب) على قوة ارتباط الشد عند إلصاق الترميمات الخزفية المصنعة من الخزف الزجاجي المملوء ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم إلى العاج؟

1.5 فرضيات البحث Study Hypothesis

فرضية العدم (Null Hypothesis):

لا توجد فروق ذات دلالة إحصائية في قوة ارتباط الشد بين المواد الثلاث المستخدمة في إلصاق الترميمات غير المباشرة إلى العاج، وهي: الراتنج المركب كتلي الملاء المسخن، والراتنج المركب التقليدي المسخن، والأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب.

الفرضية البديلة (Alternative Hypothesis):

توجد فروق ذات دلالة إحصائية في قوة ارتباط الشد بين المواد الثلاث المستخدمة في إلصاق الترميمات غير المباشرة إلى العاج، وهي: الراتنج المركب كتلي الملاء المسخن، والراتنج المركب التقليدي المسخن، والأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب.

1.6 مبررات البحث Justification of the Study

مع تطور المواد الترميمية وتقنيات الإلصاق في طب الأسنان الحديث، ازداد الاهتمام بإيجاد مواد لاصقة تجمع بين الكفاءة الميكانيكية وسهولة التطبيق. يُعد الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب مثل Variolink N من المواد المعتمدة تقليدياً في إلصاق الترميمات غير المباشرة، نظراً لخواصه الممتازة من حيث قوة الالتصاق وطول عمره السريري. ومع ذلك، لا يخلو استخدامه من تحديات سريرية، تشمل تعدد خطوات التطبيق، وحساسيته للتقنية والرطوبة، وصعوبة إزالة الفائض، مما قد يؤثر سلباً على النتيجة النهائية ورضا المريض.

(Zarone et al., 2011).

في المقابل، ظهرت محاولات لاستخدام الراتنجات المركبة كمادة لاصقة بديلة، بعد تسخينها لخفض لزوجتها وتحسين سيولتها. ويُعد كل من Tetric N-Ceram التقليدي و Tetric N-Ceram Bulk Fill كتلي الملء من الخيارات الممكنة في هذا السياق، حيث أظهرت الدراسات أن التسخين يعزز من الخصائص الريولوجية لهذه المواد ويزيد من قدرتها على الالتصاق، مما قد يسمح باستخدامها في تطبيقات إلصاق غير تقليدية (Fróes-Salgado et al., 2014; Faria-e-Silva et al., 2018).

إلا أن البيانات المتوفرة حول استخدام هذه الأنواع من الكومبوزيت - خصوصاً كتلي الملء - كمادة إلصاق لترميمات غير مباشرة ما تزال محدودة، وغالباً ما تكون نتائج الدراسات متفاوتة أو غير حاسمة. ومن هنا تتبع الحاجة لإجراء دراسة منهجية مخبرية تقارن بين الأسمنت الراتنجي التقليدي والراتنج المركب التقليدي المسخن والراتنج كتلي الملء المسخن من حيث قوة ارتباط الشد، بهدف تقييم مدى إمكانية اعتماد هذه المواد كبديل عملية في الإلصاق السريري.

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من إمكانية تقديم حلول أكثر بساطة وفعالية من حيث الوقت والكلفة، دون التضحية بالكفاءة الميكانيكية أو جودة الالتصاق. وإذا ثبت أن المواد البديلة تعطي نتائج مماثلة أو أفضل، فقد تُسهم في تحسين سير العمل السريري وزيادة مرونة الخيارات العلاجية المتاحة لطبيب الأسنان.

1.7 أهمية البحث Significance of the Study

تُعتبر قوة الارتباط من العوامل الحاسمة في نجاح الترميمات غير المباشرة واستمراريتها على المدى البعيد، حيث يعتمد ثبات الترميم ومقاومته للعوامل الفموية المختلفة بشكل كبير على فعالية المادة اللاصقة المستخدمة. لذلك فإن البحث في بدائل عملية وفعالة للأسمنتات الراتنجية التقليدية يشكل خطوة مهمة نحو تبسيط الإجراءات السريرية دون المساس بجودة النتائج العلاجية.

تُسهم هذه الدراسة في سد فجوة معرفية تتعلق بمقارنة أداء الراتنجات المركبة المسخنة - سواء التقليدية أو كتلية الملء - مع الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب عند استخدامها في إلصاق الترميمات غير المباشرة. وسعى هذا البحث إلى توفير دليل أولي يدعم إمكانية استخدام هذه المواد كخيار بديل أو مكمل للأسمنتات التقليدية، خاصة في الحالات التي تتطلب تبسيط الخطوات السريرية أو تقليل الوقت.

إن التحقق من فعالية الراتنجات المركبة المسخنة في الإلصاق -من الناحية التطبيقية- قد يُحدث تحولاً في الممارسة السريرية، من خلال اعتماد مواد متعددة الاستخدامات، قادرة على أداء أدوار مزدوجة كمادة ترميمية ولاصقة في آنٍ معاً، مما ينعكس إيجاباً على كفاءة العلاج وراحة المريض.

كما تُعد هذه الدراسة مرجعاً علمياً حديثاً يمكن الاستفادة منه في الأبحاث المستقبلية، وخصوصاً تلك التي تتناول السلوك الميكانيكي والريولوجي للمواد الترميمية تحت ظروف محاكية للبيئة الفموية.

1.8 محدوديات البحث Limitations of the study

رغم حرص هذه الدراسة على تطبيق منهجية مخبرية دقيقة، إلا أن هناك عدة محدوديات ينبغي أخذها بعين الاعتبار عند تفسير النتائج. أولاً، أجريت الدراسة ضمن ظروف مخبرية، لا تعكس تماماً تعقيدات البيئة الفموية السريرية، مثل الرطوبة المتغيرة، والضغط الإطباق، والعوامل البيولوجية الأخرى. ثانياً، اقتصرَت العينة على أسنان دائمة من نوع الأرحاء الثالثة، وهو ما قد يحد من تعميم النتائج على أنواع أسنان أخرى أو على مرضى من فئات عمرية مختلفة. وأخيراً، لم تُقيّم الدراسة تأثير أنواع مختلفة من الترميمات أو المواد الخزفية، مما يترك المجال لدراسات مستقبلية تبحث في هذه المتغيرات.

الباب الثاني: المراجعة
النظرية Literature
Review

2.1 مقدمة

تُعدّ الترميمات غير المباشرة من الرّكائز الأساسيّة في طبّ الأسنان التّرميميّ الحديث، نظراً لقدرتها على استعادة الشّكل والوظيفة والجماليّة للأسنان المتضررة بشكلٍ دقيقٍ ومُستدام (Soares et al., 2008). وقد أدى التّقدم في تقنيات التّصنيع، وظهور المواد الخزفية عالية الجودة، إلى توسّع نطاق استخدام هذه الترميمات، خاصّةً في الحالات التي تتطلب حلولاً ترميمية محافظة وطويلة الأمد (Pjetursson et al., 2015).

يُعدّ اختيارُ مادّة الإصاق عاملاً حاسماً في نجاح الترميمات غير المباشرة، إذ يُعدّ الالتصاق القويّ والمستقر عاملاً رئيسياً في ضمان تحمّل الترميم للقوى الميكانيكية، ومنع حدوث التسرب الحفافيّ، والتقليل من خطر انكسار الترميم أو فشله المبكر (Braga et al., 2010; Özcan & Vallittu, 2003). وهنا تبرز أهمية مواد الإصاق التي تمثل الوسيط الرابط بين البنية السنية والترميم، والتي تتنوع في خصائصها وآلية عملها وكفاءتها بحسب نوعها وطريقة تطبيقها (Manso & Carvalho, 2017) لذلك، يعد اختيار المادة اللاصقة المثلى، وفهم تأثير العوامل المختلفة على أدائها، من الأسس التي ينبغي مراعاتها لضمان النجاح السريري طويل الأمد للترميمات غير المباشرة (Peumans et al., 2005a).

يتناول هذا الفصل مراجعة الأدبيات العلمية المتعلقة بعدة محاور أساسية ترتبط بموضوع الأطروحة، بدءاً من التعريف بالترميمات غير المباشرة وأنواعها وخصائص المواد المستخدمة فيها، مروراً بأنواع المواد اللاصقة ومزايا وعيوب كل منها، وانتهاءً بمناقشة مفهوم قوة ارتباط الشد والعوامل التي تؤثر فيها، بالإضافة إلى استعراض الدراسات السابقة ذات الصلة وتحديد الفجوات البحثية التي تهدف هذه الدراسة إلى معالجتها.

2.2 الترميمات غير المباشرة Indirect Restorations

2.2.1 تعريفها

الترميمات غير المباشرة هي الترميمات التي تعوّض عن فقد في النسيج السنيّة، وتُصنّع خارج الحفرة الفموية على أمثلة منسوخة للأسنان المحضّرة ثم تُثبت في مكانها داخل الفم بواسطة مواد إصاق. (Rosenstiel et al., 2016)

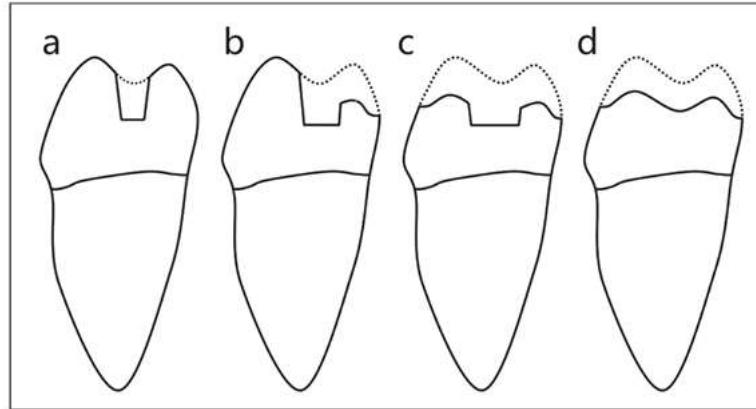
2.2.2 أنواعها

- تشمل هذه الترميمات أنواعاً مختلفة وفقاً لموقعها ومدى تغطيتها للسطح السني، ومن أبرزها:
- الترميمات الضمنية Inlay: هي ترميمات ضمن تاجية intracoronال تُستخدم لترميم النسيج السنية دون تغطية الحدبات. تُستطب عادةً لترميم الأسنان التي تعرّضت لفقدان بسيط إلى متوسط في بنيتها وهي تمثل a من الشكل 1.

- الترميمات المغطّية Onlays: هي ترميمات خارج تاجية extracoronar تستخدم لترميم منطقة أوسع من النسيج السنيّة وقد تمتد لتشمل حذبة واحدة أو أكثر من حذبات السن، وتُستخدم عندما يمتد التلف إلى السطوح الخارجية ويتضمن رؤوس الحذبات، دون الحاجة إلى تغطية كاملة كما في التاج. وهي تمثل b في الشكل 1.
- Overlays: هو نوع خاص من الترميمات المغطّية، التي تغطي جميع الحذبات السنية وتوفّر تغطية كاملة للسطح الإطباق، دون أن تمتد إلى تغطية كاملة لكل السن كما في التاج. وتُعدّ خيارًا محافظًا أكثر من التاج الكامل. وتُستطب لترميم فقدان النسيج السنيّة المتوسط إلى كبير الحجم الذي يترافق مع فقدان حذبة واحدة أو أكثر، ولتعديل الشكل التشريحي للسطح الإطباق و/أو زيادة البعد العمودي الإطباق في حالات إعادة التأهيل الفموي الكامل، كبديل عن التداخلات الجائرة مثل الترميمات التاجية الكاملة. وهي تمثل c و d في الشكل 1 مع اختلاف في طريقة التحضير وفقاً للحالة السريرية للسن.
- التيجان Crowns: هي ترميمات تاجيّة كاملة تغطّي كامل التاج السريري للسن. وتُستطبّ عندما يكون هناك فقدان كبير في بنية السن لا يمكن تعويضه بترميم أكثر محافظةً.
- الوجوه Veneers: هي طبقة رقيقة من مادة ترميمية تُوضع على السطح الدهليزي للسن بهدف تحسين المظهر الجمالي أو ترميم أضرار موضعية، وغالبًا ما تُستخدم في الأسنان الأمامية

(Fan et al., 2021)

(;Rosenstiel et al., 2016 Roberson et al., 2019)



شكل 1 مخطط ترسمي لبعض أنواع الترميمات غير المباشرة

(Fan et al., 2021)

تمتاز الترميمات غير المباشرة بالمقارنة مع الترميمات المباشرة، بسهولة استعادة الشكل التشريحي الإطباق ونقاط الستماس، فضلاً عن تقليل التقلص التصلبي (Fan et al., 2021). وعلى الرغم من أن ترميمات التاج الكامل أو التاج المدعم بوند قد أظهرت نتائج مثووقة، إلا أن تحضير التاج يتطلب إزالة كمية كبيرة من النسيج

السنية السليمة (Edelhoff & Sorensen, 2002). أفاد مؤخرًا فاغروبولو *Vagropoulou* وزملاؤه بأن معدلات البقاء لخمس سنوات لترميمات التيجان، والترميمات الضمنية Inlays والمغطّية Onlays تجاوزت 90% (Vagropoulou et al., 2018).

غالبًا ما تُصنّع ترميمات Inlays و Onlays و Overlays من مواد مشابهة للون السن مثل الراتنجات المركبة والخزف نظرًا للمتطلبات الجمالية المتزايدة (Murgueitio & Bernal, 2012). وقد أدت التحسينات الكبيرة في الخواص الميكانيكية للراتنجات المركبة المشابهة للون السن إلى إمكانية استخدامها كإصاق في ترميم الحفر كبيرة الحجم بترميمات غير مباشرة (Huth et al., 2011). وبالمقارنة مع الراتنجات المركبة، تتمتع الترميمات الخزفية بمقاومة أعلى للاهتراء وقدرة أكبر على تحمل القوى الانضغاطية، ومع ذلك، فإن الخزف قصف وأكثر عرضة للكسر تحت تأثير قوى الشد مقارنة بالراتنجات المركبة (Mörmann et al., 2013). وبالإستناد إلى دراستين سريريتين (RCTs) استنتج الباحثون أن الترميمات الخزفية غير المباشرة أبدت أداءً أفضل من ترميمات الراتنج المركب غير المباشرة خلال الأشهر الستة الأولى، إلا أن هذه النتيجة قد لا تكون ثابتة عند التقييم السريري طويل الأمد (Fron Chabouis et al., 2013). ومع ذلك، فإن التكلفة المرتفعة للمواد الخزفية، بالإضافة إلى حساسيتها الشديدة لطريقة الإصاق، تفسّر سبب حصر استخدامها من قبل الأطباء في حالات سريرية محددة. ونتيجة لذلك، ما يزال اختيار نوع الترميم الأمثل والمادة المصنوع منها يتطلب موازنة دقيقة بين المتطلبات الجمالية والوظيفية وطبيعة الحالة السريرية.

2.2.3 المواد المستخدمة في الترميمات غير المباشرة

يعتمد نجاح الترميمات غير المباشرة على خواص المادة المستخدمة، وتتنوع المواد المتاحة بحسب الخصائص الميكانيكية والجمالية المطلوبة. من بين أكثر المواد شيوعاً:

- خزف الفلسبار Feldspar: يتميز بجمالية عالية لكنه قصف ويتطلب دعماً قوياً من السن.
- الزركونيا Zirconia: مادة شديدة الصلابة وتتميز بمقاومتها العالية للكسر، لكن تكمن صعوبة استخدامها في إجراء الإصاق الرابط بسبب طبيعتها البلورية (Thompson et al., 2004)
- الخزف الزجاجي المملوء ببلورات الليثيوم ديسيليكات Lithium disilicate: يجمع بين القوة والجمالية، وهو مناسب للاستخدام في ترميمات أمامية وخلفية (Kelly et al., 2011). يعتمد اختيار المادة على عوامل متعددة مثل موقع السن، المتطلبات الجمالية، ومساحة الترميم.

2.2.4 متطلبات تثبيت الترميمات

تتطلب الترميمات غير المباشرة إصاقاً رابطاً دقيقاً للحصول على نتائج طويلة الأمد. ويُعدّ الارتباط القوي بالعاج وبالمادة الترميمية عاملاً حاسماً لضمان ثبات الترميم ومقاومته للإجهادات أثناء المضغ وديمومته. كما أن

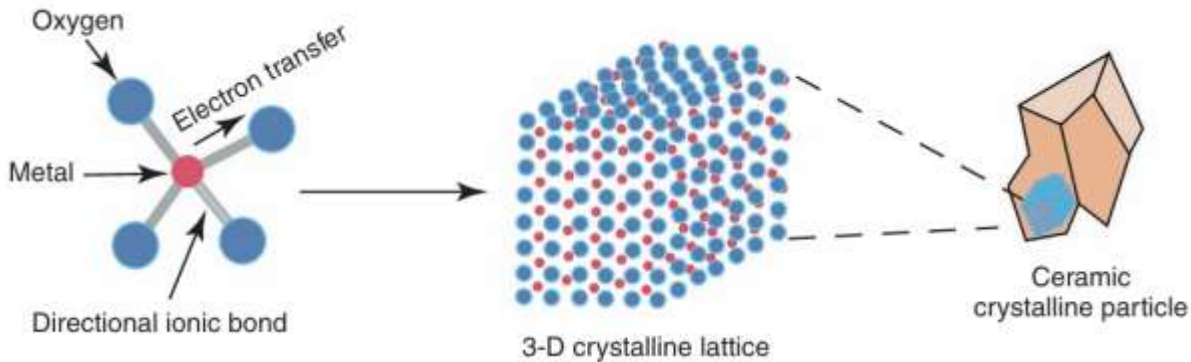
تحضير السطح المناسب لكلا الجانبين—السن والترميم—هو خطوة أساسية في تحقيق قوة ارتباط مثالية (D'Arcangelo et al., 2015). وتشمل خطوات تحضير الترميمات الخزفية للإصاق استخدام مواد رابطة، والتخريش الحمضي، وتطبيق عامل السيلان في حال استخدام المواد الخزفية المحتوية على الزجاج.

2.3 الخزف السني Dental Ceramic

2.3.1 التعريف والتركيب

الخزف السني هو مادة غير معدنية، غير عضوية، تُستخدم في الترميمات السنية بسبب خصائصها الجمالية والفيزيائية، وتُعرف بأنها مركبات تحتوي على روابط أيونية بين المعادن (مثل السيليكون أو الزركونيوم أو الألمنيوم) والأوكسجين، تُشكّل بنى بلورية صلبة وقصفة، قادرة على محاكاة مظهر النسيج السني الطبيعية بدرجة عالية من الشفافية والانكسار الضوئي (Sakaguchi & Powers, 2019).

تتكوّن المواد الخزفية على المستوى الذري من روابط أيونية بين المعادن والأوكسجين. ومن العناصر المعدنية الشائعة التي تدخل في تركيب الخزف السيليكون والزركونيوم والألمنيوم، حيث تتحد هذه العناصر مع الأوكسجين لتشكيل البنية الخزفية. وتختلف الروابط الأيونية عن الروابط المعدنية الموجودة في السبائك أو الروابط التساهمية في البوليمرات، إذ تنتج عن انتقال كامل للإلكترونات من العنصر المعدني إلى الأوكسجين. وتُعدّ الروابط الأيونية قوية وموجّهة directional، أي أنها لا تتحمل الانثناء. وتُعدّ هذه الحساسية تجاه التشوّه سبب قسافة المواد الخزفية. أما السمة الثانية المميزة للخزف، فهي أنّ الروابط الأيونية بين المعدن والأوكسجين تتوزع ضمن مصفوفات بلورية واسعة. وعلى الرغم من أن المعادن أيضًا تتواجد في مصفوفات بلورية، فإن روابطها ليست أيونية ولا تتمتع بنفس التوجيه، لأنّ الإلكترونات تكون مشتركة. وقد تكون البوليمرات أيضًا ذات طبيعة بلورية، لكن الوحدة الأساسية في هذه البلورات هي جزيء البوليمر نفسه، المؤلف من روابط تساهمية (Sakaguchi & Powers, 2019).



شكل 2 البنية الكيميائية للخزف البلوري

(Powers & Wataha, 2017)

2.3.2 الخزف والبورسلين

غالبًا ما تُستخدم مصطلحات "الخزف" (ceramic) و"البورسلين" (porcelain) بشكل متبادل، لكن هذا الاستخدام غير دقيق. فالخزف يشير إلى أي مادة تتكوّن من مصفوفات روابط أكسجينية معدنية كما ذُكر سابقًا. أما البورسلين، فهو نوع محدد من الخزف ينتج عند خلط الفلدسبار ($K_2O-Al_2O_3-SiO_2$)، والسيليكا (SiO_2)، والألومينا (Al_2O_3) مع مواد مُساعدة للصهر مثل كربونات الصوديوم (Na_2CO_3) أو كربونات البوتاسيوم (K_2CO_3)، ومن ثم تعريض الخليط للخَبز. خلال الخَبز، تتشكّل مناطق واسعة من الخزف غير المتبلور، مع وجود جزر صغيرة من الطور البلوري تُعرف باسم اللوسيت ($K[AlSi_2O_6]$) (McLaren, et al. 2015).

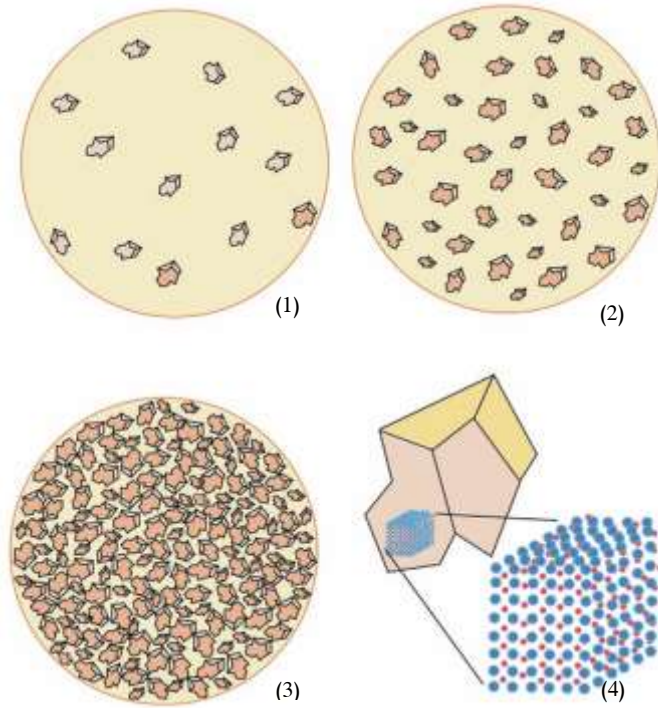
2.3.3 أنواع الخزف السّني واستخدامه في طب الأسنان:

يمكن تصنيف المواد الخزفية السنية وفقاً لنسبة الطور الزجاجي إلى الطور البلوري إلى أربعة أنواع:

1. الخزف الفلسباري التقليدي (أو الزجاجي)
2. الخزف الذي يغلب عليه الطور الزجاجي
3. الخزف الذي يغلب عليه الطور البلوري
4. الخزف البلوري بالكامل

(Sakaguchi & Powers, 2019).

ويستند هذا التصنيف إلى نسبة الطور غير المتبلور (الزجاجي) إلى الطور البلوري، وطبيعة التفاعل بين هذين الطورين. (الشكل 3).



شكل 3 أصناف الخزف

(Powers & Wataha, 2017)

يتكوّن الخزف الفلسباري التقليدي -أو الزجاجي- (في الأعلى يسار الصورة) بشكل أساسي من طور زجاجي غير متبلور يحتوي على جزر من الطور البلوري، وغالبًا ما يكون من مادة اللوسيت. أما الخزف الذي يغلب عليه الطور الزجاجي (في الأعلى يمين الصورة) فيحتوي كذلك على طور زجاجي بنسبة كبيرة، ولكن مع زيادة في كمية الطور البلوري الذي قد يتكوّن من اللوسيت أو مركبات أخرى. في حين أن الخزف الذي يغلب عليه الطور البلوري (في الأسفل يسار الصورة) يتكوّن بشكل أساسي من الطور البلوري، والذي قد يضم عدة أنواع من البلورات، وتحيط به طبقة زجاجية. وأخيرًا، فإن الخزف البلوري بالكامل (في الأسفل يمين الصورة) لا يحتوي على أي طور زجاجي على الإطلاق.

الخزف الفلدسباري (Feldspathic or Glassy Ceramics): هو نوع من البورسلان Porcelain يتكون بشكل أساسي من طور غير متبلور amorphous phase يُعرف بالقالب matrix، يحتوي على بلورات اللوسيت (leucite). وتجعل بلورات اللوسيت البورسلان أكثر عتامةً opaque، وتمنحه صلابة أكبر، وزيادة في درجة الانصهار، وتعطي الخزف قابلية للتمدد عند التسخين. كما تحتوي هذه الأنواع من الخزف الفلدسباري على كميات ضئيلة من الأكاسيد المعدنية تعطيها اللون والبريق fluorescence اللازمين لتحسين المظهر الجمالي.

استُخدمت هذه المواد في السابق لصناعة التيجان الخزفية الكاملة -المعروفة باسم porcelain jacket crowns-، ولكن بسبب ضعفها النسبي، كان لها معدلات فشل عالية. لا يزال هذا النوع من الخزف الفلسباري اليوم من أكثر المواد جمالية في طب الأسنان، ويقتصر استخدامها عادةً كوجوه خزفية تُطَبَّق فوق دعائم معدنية أو خزفية تُكسب الترميم قوة وتوفّر دعماً للقشرة الأضعف، أو في صناعة الوجوه التجميلية (veneers) اللاصقة خاصة في الأسنان الأمامية، حيث توفر رابطة الإلصاق مع الميناء دعماً إضافياً.

الخزف الذي يغلب عليه الطور الزجاجي (Glass-Dominated Ceramics): يحتوي على نسبة أعلى من الطور البلوري مقارنة بالخزف الزجاجي الكامل، وقد تكون البلورات المضافة من نوع اللوسيت أو الفلوروأباتيت. وتمنح هذه الزيادة في الطور البلوري المادة صلابة أعلى، مع الحفاظ على شفافية كافية تتيح استخدامها في تطبيقات جمالية. تمكّنها هذه الزيادة في الصلابة من الاستخدام في التيجان الأمامية الكاملة شرط ألا تكون تحت ضغط إطباق كبير. لكنها لا تصلح عادةً للاستخدام في التيجان أو الجسور الخلفية، إلا كطبقة مغطية لدعائم معدنية أو خزفية.

الخزف الذي يغلب عليه الطور البلوري (Crystalline-Dominated Ceramics): يتكوّن في معظمه (حوالي 70% بالحجم) من طور بلوري. وتتخلل هذا الطور شبكة زجاجية غير متبلورة، مما يخلق تآزراً بين الطورين يعزز القوة الميكانيكية للمادة بشكل ملحوظ. تشمل المواد البلورية المستخدمة في هذا النوع: ألومينات المغنيزيوم $(\text{MgAl}_2\text{O}_4)$ spinel، الزركونيا (ZrO_2) ، الألومينا (Al_2O_3) ، وثنائي سيليكات الليثيوم. تتميز هذه المواد بعتامتها، ما يجعلها أقل ملاءمة للاستخدامات الجمالية كالوجوه. والاستثناء هو ليثيوم ثنائي السيليكات، الذي طُوّرت منه أشكال جديدة ذات خواص جمالية مقبولة تتيح استخدامها في بعض الترميمات الأمامية والخلفية.

تُستخدم هذه المواد غالباً كقُبعة (Cores) في التيجان الأمامية أو الخلفية، ويُضاف فوقها خزف زجاجي أو شبه زجاجي كطبقة تغطية. ويمكن استخدامها بحذر في ترميمات مثل الترميمات الضمنية (inlays) أو المغطية (onlays) أو التيجان عندما تكون القوى الإطباقية منخفضة. ويُعد الخزف المعتمد على السبيلنل الأضعف من حيث الصلابة، في حين أن الزركونيا والألومينا يُعتبران الأقوى.

الخزف البلوري الكامل (Fully Crystalline Ceramics): يُعد هذا النوع الأحدث والأقوى من بين أنواع الخزف المستخدمة في طب الأسنان. يتكون من الألومينا أو الزركونيا المُعالَجة بإضافة عناصر مثل المغنيزيوم أو الإيتريوم لتحسين خصائصها للتطبيقات السنية. لا يحتوي هذا النوع من الخزف على طور زجاجي، وهو معتم تماماً، ما يمنع من استخدامه كطبقة جمالية على الأسنان أو على المعادن. لكن نظراً لصلابته العالية، يمكن استخدامه كدعامة قوية في معظم الترميمات السنية، بما في ذلك التيجان والجسور الخلفية. وعندما لا

تكون الجمالية من الأولويات، يمكن استخدام الزركونيا المعالجة لتصنيع الترميمات التشريحية الكاملة monolithic restorations للأسنان الخلفية.

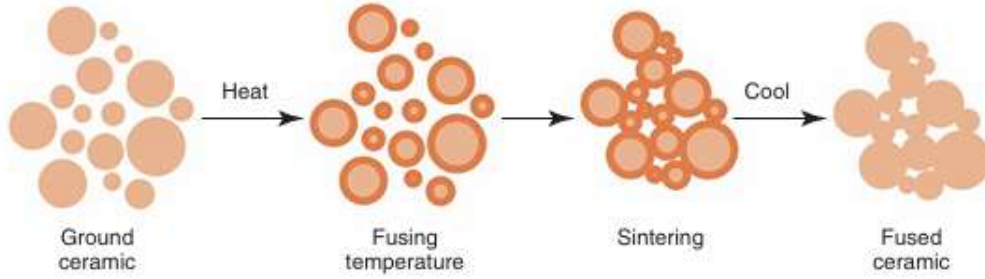
(McLaren, et al. 2015; Gracis, et al. 2015; Sakaguchi & Powers, 2019)

2.3.4 تقنيات تصنيع الخزف

لا تُصَبّ الترميمات الخزفية عادةً كما تُصَبّ ترميمات الخلائط المعدنية (رغم وجود أنواع قابلة للصب من الخزف)، لأن هذه المواد تنصهر فقط عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً بسبب الروابط الأيونية القوية في المواد الخزفية. وعوضاً عن ذلك، تُستخدم تقنيات أخرى لتشكيل الترميم السني النهائي، منها التراص stacking، التشريب infusing، الحقن pressing، أو القطع الآلي machining. وسيُعرض شرح موجز لكل من هذه التقنيات فيما يلي:

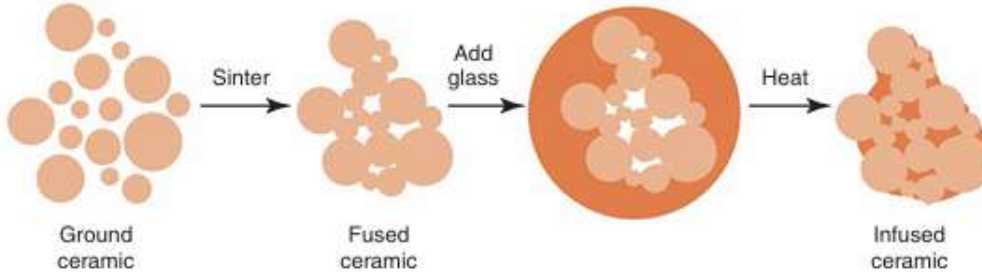
في تقنية التراص **Stacking**، يُطحن الخزف الخام إلى جزيئات ليشكل ما يُعرف بـ "الحالة الخضراء" green state -وهي حالة ضعيفة الصلابة- وتكون الجزيئات قد أخذت هيئة قريبة من الشكل النهائي. ثم تليها عملية تُسمى التكثيف Condensation. يُوضع مزيج لزج من جزيئات الخزف في الماء أو مزيج الماء مع الغليسيرول على القاعدة التي سيبنى عليها الخزف، ويُستخدم الاهتزاز لتقريب الجزيئات من بعضها وطردها السائل إلى السطح. ثم يُزال السائل باستخدام منديل ماص. وعبر تكرار عملية الاهتزاز ثم إزالة السائل، تتراكم الجزيئات بشكل محكم في الحالة الخضراء. وفي هذه الحالة، يمكن نحت وتشكيل الخزف إلى شكل نهائي تقريبي. وكلما كانت عملية التكثيف أفضل، قلّ التقلص الناتج خلال عملية التلبيد sintering لاحقاً (Silva, et al 2017) تُستخدم تقنية التراص لتطبيق الخزف على الخلائط المعدنية أو القبعات الخزفية عالية الصلابة، أو لتصنيع الوجوه التجميلية. ويُستخدم التراص عادةً مع الخزف الزجاجي أو الخزف الذي يغلب عليه الطور الزجاجي. (Silva, et al 2017)

بعد تشكيل الحالة الخضراء، يُخبز الخزف في فرن خاص في عملية تُعرف بـ التلبيد Sintering. خلال هذه العملية، تنصهر الجزيئات وتندمج عند السطوح. وبعد عدة دقائق من التسخين، تُبرّد العينة إلى درجة حرارة الغرفة، وتُشكل الترميمات الخزفية النهائية. ومن أجل تقليل الفراغات الهوائية داخل الخزف، يُطبّق في كثير من الأحيان ضغط مفرغ من الهواء. وقد تحدث تغيرات في نسبة الطور البلوري إلى الطور غير المتبلور خلال التلبيد. يُرافق هذه العملية تقلص ملحوظ يصل إلى 10%، ويجب أخذ ذلك في الحسبان أثناء تصنيع الترميم. حيث تتأثر نقاط التماس الإطباقية والملاصقة، والارتفاعات الحفافية، والفجرات السنية، لذا يُشكل الخزف في الحالة الخضراء بحجم أكبر قليلاً من الشكل النهائي المطلوب. وغالباً ما يُشار إلى درجة حرارة التلبيد بأنها درجة انصهار الخزف (Silva, et al 2017).



شكل 4 مخطط ترسمي لتقنية التراص

التشريب Infusion: هي طريقة تصنيع يُشرب فيها هيكل مسامي من الخزف المُلبّد بزجاج السيليكا. في الخطوة الأولى، يُرصّ مزيج خزفي فوق مثال مقاوم للحرارة لسن محضرة، ثم يُلبّد ليكتسب صلابة متوسطة، ويُشكّل ويُنحت إلى شكل قريب من النهائي. ومن ثم، يُضاف زجاج السيليكا وتُعاد عملية التلبيد. خلال التلبيد الثاني، ينصهر زجاج السيليكا ويتغلغل في جميع المسامات الشعرية للهيكل الأصلي، مما يُنتج خزفًا مشربًا ذا صلابة عالية جدًا. تُستخدم تقنية التشريب مع نوع معين من الخزف الذي يغلب عليه الطور البلوري.



شكل 5 مخطط ترسمي لتقنية التشريب

تُستخدم **تقنيات الحقن pressing** لدفع كتلة لزجة من الخزف المنصهر داخل قالب لإعطاء الشكل النهائي المطلوب، وهي عملية مشابهة لصب الخلائط المعدنية، إلا أن الخزف لزج للغاية ليدفع بسرعة عالية إلى داخل القالب، لذا يتطلب دفعه تطبيق ضغط عالٍ. بالإضافة إلى ذلك فإن هذه العملية تتطلب إضافة مواد كاسية investments تدعى بالمواد المقاومة للحرارة refractories لتحمل درجات الحرارة المرتفعة للخزف المنصهر، مع تجنب التفاعل الكيميائي بين الخزف والمادة الكاسية. من مزايا الكبس أنه يُعوض جزئيًا عن الانكماش الناتج عن التلبيد، مما يُنتج شكلًا نهائيًا أقرب إلى الحجم المطلوب. تُستخدم هذه التقنية حاليًا لتصنيع القبعات cores الخزفية الكاملة من الخزف الذي يغلب عليه الطور الزجاجي أو البلوري (Silva, et al 2017).

القطع الآلي machining: هو تقنية حديثة يتم فيها تشكيل الخزف إلى شكله النهائي دون الحاجة إلى تكثيف أو تلبيد أو انصهار. حيث يُمسح مثال السن المحضرة رقميًا، ثم تُرسل البيانات إلى الحاسوب الذي يُدير أدوات خراطة دقيقة لنحت كتلة خزفية إلى الشكل النهائي خلال دقائق. في التقنيات الأكثر تقدمًا، تُمسح السن المحضرة

مباشرةً بشكل رقمي بما يُعرف بـ "الطبعة الرقمية"، وتُرسَل البيانات مباشرةً للمختبر للتصنيع. تُعرف هذه الطريقة باسم التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسوب CAD-CAM. لهذه التقنية عدة مزايا مقارنة بالتقنيات التقليدية؛ فهي تُلغي الحاجة للتسخين أو التكتيف، وبالتالي تُجنب التقلص المرتبط بالخزف المكس، رغم أن بعض أنواع الخزف تُخرب في الحالة الخضراء وتخضع لتقلص لاحق. كما أن خواص الترميم تكون أكثر انساقاً بسبب إمكانية ضبط تصنيع الكتلة الخزفية بدقة في بيئة صناعية، دون أن تتأثر بعملية تليد أو صب قد تُغير من خصائصها. تُستخدم تقنيات CAD-CAM لتصنيع البنى التحتية substructure الخزفية عالية الصلابة من الخزف الذي يغلب عليه الطور الزجاجي، أو الذي يغلب عليه الطور البلوري، أو الخزف البلوري بالكامل (Silva, et al 2017).

2.4 الخزف المقوى ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم IPS e.max

2.4.1 تطوره

قُدِّم الخزف السني المصنوع من ثنائي سيليكات الليثيوم ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O}_2$) لأول مرة عام 1988 ليُصنَّع بطريقة الحقن الحراري heat-pressed لاستخدامه في صنع قبعات التيجان، وسُوق تحت اسم IPS Empress 2 (Ivoclar Vivadent, Lichtenstein). وقد صُنِّف Empress 2 ضمن فئة الخزف الزجاجي، وهو أحد الأنواع الفرعية للخزف الزجاجي المملوء بالبلورات، واحتوى على نحو 70% من المواد المألوفة البلورية لثنائي سيليكات الليثيوم. (Willard & Gabriel Chu, 2018)

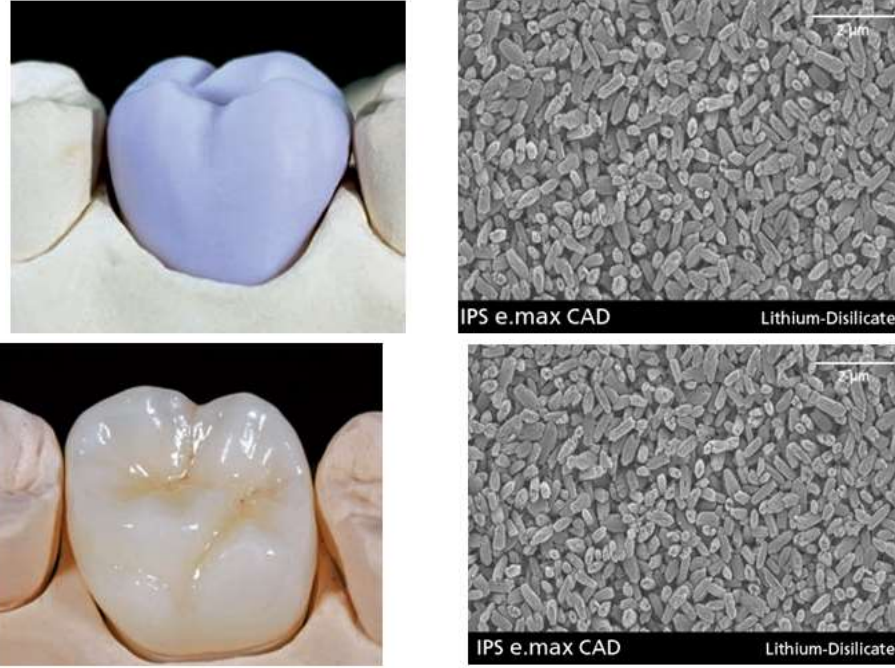
أدى إعادة تشكيل الصيغة الكيميائية لـ Empress 2 وتحسين عملية تصنيعه إلى إنتاج خط خزف جديد. وقد طُرِحت التركيبة الجديدة في عام 2005 تحت اسم العلامة التجارية IPS e.max Press. وفي نهاية المطاف، أدى إدخال خط e.max إلى إيقاف إنتاج خط Empress 2 في عام 2009 (Li et al., 2024).

ومع تطور طب الأسنان الرقمي وتقدم تقنيات التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسوب CAD/CAM، طُرِح IPS e.max CAD في عام 2006 كخزف زجاجي مملوء ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم مُصمم خصيصاً لتقنيات الكاد/كام. حيث قُدِّمت المادة في شكل يُعرف بـ "الحالة الزرقاء"، حيث تتكوّن بشكل رئيسي من ميتا سيليكات الليثيوم (Li_2SiO_3)، وهي مادة سهلة الخراطة، وتقلل من اهتراء سنابل التحضير. وبعد الانتهاء من عملية الخراطة، تُخضع المادة للمعالجة الحرارية والتزجيج في خطوة واحدة، لتشكيل الترميم النهائي من ثنائي سيليكات الليثيوم. (Willard & Gabriel Chu, 2018)

2.4.2 البنية المجهرية

يحتوي IPS e.max CAD على نوعين من البلورات خلال مراحل تصنيعه. في المرحلة المتوسطة المعروفة بـ "المرحلة الزرقاء"، يتكوّن من حوالي 40% من بلورات ليثيوم ميتا سيليكات (Li_2SiO_3) بحجم يقارب 0.5

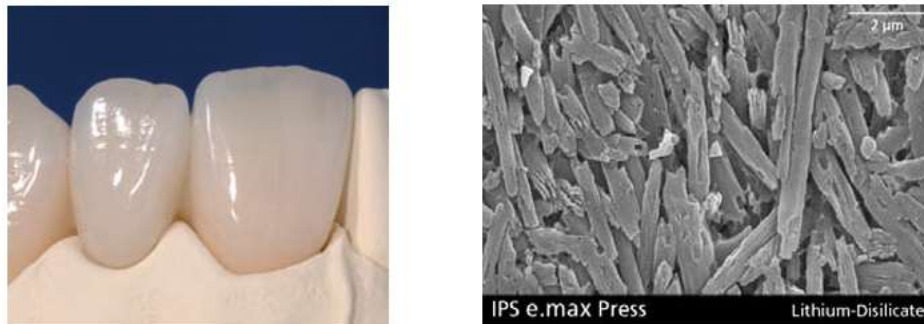
ميكرون، مما يسهل عملية الخراطة. أما بعد المعالجة الحرارية، فيتحول إلى بنية تحتوي على نحو 70% من بلورات ثنائي سيليكات الليثيوم ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) بحجم يقارب 1.5 ميكرون، ما يمنحه قوة عالية وتدرجات مختلفة من الشفافية واللون (Ivoclar Vivadent, 2009).



شكل 6 خزف IPS e.max CAD في الحالة الزرقاء وبعد المعالجة الحرارية

خزف IPS e.max CAD في الحالة الزرقاء وبعد المعالجة الحرارية مع صور بالمجهر الإلكتروني توضح شكل البلورات (Ivoclar Vivadent, 2009)

أما IPS e.max Press، فيُصنَّع باستخدام طريقة صب الكتلة bulk casting والتي تعتمد على تكنولوجيا الزجاج (الانصهار، التبريد، تشكيل أنوية لنوعين مختلفين من البلورات، ونمو البلورات)، ويتم تحسينها باستمرار لتقليل العيوب. وتحتوي بنيته المجهرية على حوالي 70% من بلورات ليثيوم ثنائي السيليكات ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) والتي تكون بشكل إبر، يتراوح طولها بين 3 إلى 6 ميكرون، وموزعة ضمن مصفوفة زجاجية.



شكل 7 خزف IPS e.max Press صورة بالمجهر الإلكتروني توضح شكل البلورات (Ivoclar Vivadent, 2009)

إنّ بلورات كل من IPS e.max Press و IPS e.max CAD متطابقة من حيث التركيب الكيميائي. فكلتا البينيتين المجهريتين تحتويان على 70% من بلورات ثنائي سيليكات الليثيوم ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$)، لكن حجم وطول هذه البلورات يختلف بين المادتين. ولهذا السبب، فإن الخصائص الفيزيائية مثل معامل التمدد الحراري CTE، ومعامل المرونة، والانحلال الكيميائي تكون متشابهة، بينما تكون مقاومة الانثناء ومتانة الكسر أعلى قليلاً في مادة IPS e.max Press.

2.4.3 مراحل صنع ترميمات IPS e.max Press

إن مراحل صنع ترميم خزفي باستخدام IPS e.max Press تمر بعدة خطوات دقيقة لضمان الحصول على ترميم قوي وجمالي:

1. التحضير السريري Clinical Preparation: تُحضّر السن بسماكات محددة حسب نوع الترميم (تاج، وجه خزفي، ضمنية، مغطّية..) ثم تُؤخذ طبعة رقمية أو تقليدية وترسل الطبعة إلى المختبر.
2. تصميم النموذج الشمعي Wax-up: يصنع فني الأسنان نموذجاً شمعيّاً دقيقاً للترميم النهائي. يجب أن يُراعى التصميم الأبعاد والسماكات الدنيا حسب التوصيات، خاصة إن كان الترميم سيُغطى بطبقة خزفية veneered. يجب أن يكون النموذج الشمعي دقيقاً لتقليل الحاجة إلى التعديل لاحقاً.
3. الإكساء Investing: يُثبّت النموذج الشمعي في بوتقة خاصة. ثم يُصبّ عليه الجبس المقاوم للحرارة (مادة الإكساء) لتشكيل قالب.
4. إزالة الشمع Wax Elimination – Burnout: تُسخّن البوتقة لإذابة الشمع داخلها وترك تجويف فارغ يأخذ شكل الترميم.
5. الكبس Pressing: يُوضع ingot خزفي من مادة IPS e.max Press داخل فرن الضغط. يُضغط ال ingot لدرجة حرارة مرتفعة لينساب الخزف داخل القالب ويملأه بالكامل. تتم العملية في أفران خاصة مثل EP3000 أو EP5000 من Ivoclar.
6. إزالة مادة الإكساء Divesting: بعد التبريد، يُزال الجبس المحيط بالترميم، ثم يُقطع الود sprue بعناية.
7. إزالة طبقة التفاعل Reaction Layer Removal: يُنقع الترميم في محلول حمضي ضعيف مثل محلول Invex Liquid المدة 20–30 دقيقة. ثم يُرْمَلُ بأكسيد الألمنيوم (100) ميكرون، ضغط 2–1 بار لإزالة البقايا بدقة.
8. الإنهاء والتلميع Finishing & Polishing: يُنهي الترميم لتعديل نقاط التماس الملاصقة والإطباقية. ثم يُلمّع للوصول إلى الشكل اللامع النهائي أو يُحضّر لمرحلة التغطية بالخزف.

9. التغطية Veneering: يمكن تغطية البنية الأساسية بطبقة خزف IPS e.max Ceram حسب الحاجة الجمالية.
10. التلوين والتزجيج Staining & Glazing: تُضاف الألوان stains حسب لون الأسنان. ويُزجج الترميم للحصول على لمسة نهائية لامعة وجمالية.
11. الإلصاق السريري Cementation: يُجرى في العيادة باستعمال أسمنت راتنجي مناسب، إذ يُحضّر السطح الداخلي بحمض الفلور HF والسيلان Silane حسب البروتوكول. (Ivoclar Vivadent, 2020)

2.5 الارتباط إلى النسيج السنيّ Adhesion to Tooth Structure

إن تطوّر المواد الرابطة واستخدامها قد أحدث ثورة في جوانب عديدة من طب الأسنان الترميمي. مما ساهم بشكل كبير بالمحافظة على النسيج السني وتعزيز نتائج الترميمات التجميلية. وكمثال على ذلك، إمكانية تثبيت الوجوه الخزفية الرقيقة على الأسنان الأمامية بواسطة المواد الرابطة دون الحاجة إلى تحضير ميكانيكي واسع. تتكوّن المواد الرابطة السنية Dental adhesives من محاليل تحتوي على مونوميرات راتنجية تتيح التفاعل بين الراتنج وسطح السن (Perdigão, 2007). وتتألف أنظمة الربط من مونوميرات تحتوي على مجموعات محبة للماء وأخرى كارهة للماء؛ حيث تعزز المجموعات المحبة للماء قابلية الترطيب للنسيج السني الصلب، في حين تسمح المجموعات الكارهة للماء بحدوث التفاعل والتشابك المشترك مع المادة الترميمية. كما تحتوي المواد الرابطة في تركيبها الكيميائي على مبدئات للتصلب، ومثبطات أو مثبتات، ومذيبات، وفي بعض الحالات، مواد مألثة غير عضوية (Van Landuyt et al., 2007)

ومن الضروري أخذ البنية التشريحية للسن بعين الاعتبار، ولا سيما تركيب وبنية النسيج الرئيسي فيه: المينا والعاج، لفهم كيفية تأثيرهما في آلية الارتباط. يتكوّن الجزء المتمعدن من السن من بنى صلبة مختلفة ذات تركيب وشكل نسيجي متميّز. فالمينا يتكوّن من بنية بلورية صلبة من هيدروكسي أباتيت (HAp)، ذات قوى جزيئية بينية عالية وسطح عالي الطاقة، بالإضافة إلى الماء والمكونات العضوية. أما العاج، فهو مركب حيوي يحتوي على ألياف الكولاجين المغلفة بهيدروكسي أباتيت، ويتميّز بكونه ذو طبيعة رطبة، وهو أقل صلابة من المينا، وذو قوى بينية منخفضة وسطح منخفض الطاقة. ويختلف العاج عن المينا بوجود طبقة اللطخة smear layer، والمحتوى العضوي، والسوائل داخل الفُنيات العاجية. كما تختلف كثافة الفُنيات العاجية تبعاً لعمق العاج، وكذلك محتواه المائي، إذ يكونان في أدنى مستوياتها في العاج السطحي، وأعلى مستوياتها في العاج العميق. ففي العاج السطحي، حيث تكون الفُنيات أقل عدداً، يعتمد الارتباط بالدرجة الأولى على نفوذ

الراتنج إلى العاج بين القنيتات. أما في العاج العميق، حيث يزداد عدد القنيتات، فتكون نفوذية الراتنج داخل القنيتات العاجية هي المسؤولة عن تحقيق قوى ارتباط أعلى (Susin et al., 2007). يسهم تخريش الميناء في تشكيل مسامات دقيقة تخترقها الراتنجات مكونة ارتباطاً ميكانيكياً مجهرياً، إلا أن تطبيق التقنية ذاتها على العاج صعب بسبب طبيعة العاج الرطبة والمواد الراتنجية الكارهة للماء.

2.5.1 طبقة اللطاخة

تنتج عملية التحضير طبقة سطحية رقيقة من الحطام تُعرف باسم **طبقة اللطاخة**، بسماكة 1 ميكرون تقريباً، وتتكون من بللورات محطمة من هيدروكسي أباتيت وكولاجين مخرب البنية. تسد هذه الطبقة فتحات القنيتات العاجية بما يُعرف بـ"سدادات اللطاخة" التي قد تمتد حتى 10-1 ميكرون داخل القنيتات. تختلف سماكة طبقة اللطاخة وتركيبها بحسب طريقة التحضير، وقد تكون ملوثة باللعاب أو البكتيريا. تعمل طبقة اللطاخة كحاجز فيزيائي حقيقي، إذ تُقلل من نفوذية العاجية بنسبة تصل إلى 86%. لذلك، فإن التغلب على هذه الطبقة ضروري لتحقيق ارتباط فعال ودائم إلى النسيج السنية.

توجد طريقتان رئيسيتان لمعالجة طبقة اللطاخة: إزالتها عبر تقنية "التخريش والغسل" باستخدام حمض الفوسفور، أو تعديلها ودمجها ضمن الطبقة الرابطة باستخدام أنظمة الربط ذاتية التخريش. في الخيار الأول، يُذاب الحطام ويُغسل، بينما في الخيار الثاني تُستخدم بادئات حمضية لتفكيك طبقة اللطاخة جزئياً دون إزالتها. وفي كلتا الطريقتين، يُعتمد على الارتباط الميكانيكي المجهرى كمبدأ أساسي للربط إلى الميناء والعاج (Migliau, 2017).

2.5.2 العوامل المؤثرة في أداء أنظمة الربط السني

طُوّرت العديد من أنظمة الربط لتحقيق ارتباط فعال بالنسيج السنية، رغم التحديات الناتجة عن تباين بنية السن، وطبيعة العاج المحبة للماء، وخصائص المادة الرابطة (Van Landuyt et al., 2007). وبصرف النظر عن اختلاف تقنيات التخريش، يمكن أن تكون مراحل التهيئة **priming** والربط **bonding** منفصلة أو مدمجة. تحتوي المواد الرابطة على مونوميرات محبة للماء وأخرى كارهة له.

الفرق الرئيسي بين المواد الرابطة المحبة للماء وتلك الكارهة للماء يكمن في التركيب الكيميائي للمونوميرات والمذيبات المستخدمة فيها. يُعد كل من هيدروكسي إيثيل ميثاكريلات HEMA وبيسفينول غليسيديل ميثاكريلات Bis-GMA من أكثر المونوميرات استخداماً في أنظمة الارتباط السني. الأول، HEMA، يمتزج تماماً مع الماء، ويُعد عامل ترطيب قابل للبللرة ممتازاً في المواد الرابطة السنية. أما Bis-GMA، فهو المونومير الرئيسي المستخدم في معظم الراتنجات المركبة والعديد من المواد الرابطة، ويتمتع بخصائص كارهة للماء بدرجة كبيرة، إذ لا يمتص أكثر من 3% من وزنه ماءً عند بلمرته. ويؤدي مزج المونومرين إلى الحصول على خصائص وسطية، مما يجعله مادة رابطة فعالة للأسنان (Anusavice et al., 2013).

ولتحسين قدرة المونومرات القابلة للبلورة على الترطيب والانتشار والتغلغل ضمن العاج، تُضاف عادةً مذيبات solvents إلى الخليط وتشمل هذه المذيبات الماء والكحول الإيثيلي والكحول البوتيلي والأسيتون. وتُعدّ المذيبات الثلاثة الأولى محبة للماء بدرجة عالية، مما يعزز من تفاعل المونوميرات مع الماء السطحي، بينما يتميز الأسيتون بقدرته على إزالة الماء من داخل العاج. ولكن في حال لم تتم إزالة المذيب بشكل كافٍ أثناء تطبيق المادة الرابطة مثلاً بعدم تجفيف السطح جيداً - فقد يبقى ضمن طبقة الارتباط، ما قد يُضعف البنية ويعمل كمُلوّث يُقلل من قوة الارتباط (Breschi et al., 2009). تتشابه المونوميرات المستخدمة في المواد الرابطة السنية مع تلك المستخدمة في الراتجات المركّبة الترميمية، مما يضمن تفاعلاً قوياً بين المادة الرابطة والراتنج المركّب فوقها.

يشكّل تخريش العاج تحدياً في عملية الرّبط بسبب خطورة التجفيف أو الترطيب الزائد، إذ أنّ كلاهما يؤدي إلى ضعف الارتباط. فالتجفيف المفرط يسبب انهيار شبكة الكولاجين، في حين أنّ الترطيب الزائد يخفف من تركيز المادة الرابطة. كما أنّ التخريش الزائد قد يمنع المونوميرات من النفاذ بعمق كافٍ، مما يزيد من الحساسية والتسرّب المجهرى. ويُوصى بأن تكون مدة التخريش 15-30 ثانية (Perdigão, 2007).

2.5.3 مكونات أنظمة الرّبط السّني

لفهم تفاعل الطبقة الهجينة مع تقنية التخريش الكلي Total-etch وتقنية التخريش الذاتي Self-etch، من الضروري فهم مكونات أنظمة الربط التي تتكوّن من ثلاثة مكونات رئيسية:

1. **المادة المخرّشة Etchant** في تقنية التخريش الكلي، تُستخدم مادة حمض الفوسفور بتركيز 35-37%، وتقوم هذه المادة بتحضير الميناء والعاج لاستقبال المادة المهيّنة، وتُحدث مساماً مجهرية تصل حتى 7.5 ميكرون، مما يساعد في تشكّل أوتاد راتنجية resin tags، وبالتالي ينتج عنه ارتباط ميكانيكي مجهرى. أما في أنظمة الربط ذاتية التخريش، فالمادة المخرّشة عادةً ما تكون مونوميراً حمضياً يعمل أيضاً كمادة مهيّنة.

2. **المادة المهيّنة Primer**: تتكوّن هذه المادة من مونومرات محبة للماء، تُقلّ عادةً في مذيب قابل للذوبان في الماء (مثل الأسيتون أو الإيثانول أو الماء)، وذلك لتعزيز التدفق الجيد والاختراق إلى العاج المحبّ للماء، مما قد يؤثر في قوة الارتباط الناتجة. تستخدم أنظمة الربط ذاتية التخريش مبدئات مكونة من مونومرات حمضية.

3. **عامل الربط إلى العاج Dentin Adhesive**: يمكن تعريفها على أنها طبقة رقيقة من الراتنج (غير المملوء عادةً) تُطبّق بين العاج المهيّأ والقالب الراتنجي للترميم. تعمل المادة الرابطة على تعزيز الارتباط بين الميناء أو العاج وبين مادة الترميم الراتنجية أو الأسمنت الراتنجي. وتُعدّ المادة الرابطة حلقة الوصل

بين المادة المهيئة المحبة للماء والراتنج المركب الكاره للماء. ويتطلب تحقيق الثبات الجيد والختم المحكم عملية تصليب مناسبة. وتستعمل مواد الجيل السابع من أنظمة الربط برايمرات-رابطات مؤلفة من مونومرات حمضية.

4. **المواد المائلة Fillers:** أضيفت مواد مائلة نانوية مؤخراً إلى أنظمة الربط من الجيل الثامن، بنسبة تتراوح بين 0.5% إلى 40% من الوزن. تساهم هذه المواد المائلة في تحسين خصائص التعامل مع المادة، وقد تعزز من قوتها. كما أنها قد تؤدي إلى زيادة سماكة طبقة المادة الرابطة.

5. **المذيبات Solvent:** تشمل المذيبات المستخدمة الأسيتون، والإيثانول، والماء. ويؤثر نوع المذيب في معدل التبخر على الصينية وفي الغم. فالأسيتون يتبخر بسرعة ويتطلب وقت تجفيف قصيراً، بينما يتبخر الإيثانول بوتيرة أبطأ ويحتاج إلى وقت تجفيف معتدل. أما الماء فيتبخر ببطء شديد ويتطلب أطول وقت للتجفيف. ينبغي إخراج مواد الربط من العبوة مباشرة قبل تطبيقها داخل الغم لتفادي التبخر المبكر للمذيب.

(Migliau, 2017)

2.5.4 تصنيف المواد الرابطة

اقترحت تصنيفات عديدة لعوامل الربط إلى العاج، على مرّ السنوات، بعض هذه التصنيفات يعتمد على **جيل** المادة، أو **عدد الخطوات السريرية**، أو على **استراتيجية الربط**. وفي هذه الفقرة، سيتم التركيز على تصنيف أنظمة الربط اعتماداً على استراتيجية الربط المتبعة:

الأنظمة الرابطة من نوع التخريش والغسل Etch-and-Rinse

تُعد أنظمة التخريش والغسل من أقدم أنظمة الربط الراجحي، وقد ظهرت أنظمة الربط ثلاثية الخطوات في أوائل التسعينات (Deliperi et al., 2007) وتشمل: التخريش الحمضي، تطبيق المادة المهيئة، ثم تطبيق المادة الرابطة بشكل منفصل. يُزيل التخريش الحمضي طبقة اللطاخة ورساداتها، ويُشكّل طبقة هجينة نتيجة لتداخل الراتنج مع النسيج السنية. إذ يؤدي تخريش سطح الميناء إلى انحلال المواشير المينائية وتكوين مسام ميكروية تُسهّل ارتشاح الراتنج. (Gwinnett & Matsui, 1967) أما في العاج، فيُعدّ الارتباط أكثر تعقيداً بسبب بنية العاج، مما يجعل التقنية حساسة للغاية. (Peumans et al., 2005b)

يؤدي التخريش إلى إزالة تمعدن العاج حتى عمق 3-5 ميكرون، كاشفاً شبكة من ألياف الكولاجين (Gwinnett & Matsui, 1967). بعد ذلك، تُطبق المادة المهيئة التي تحتوي على مونوميرات محبة للماء مثل HEMA، مذابة في محل عضوي (مثل الأسيتون أو الإيثانول)، لتساعد على إعادة ترطيب شبكة الكولاجين وطررد الماء، مما يهيئها لارتشاح الراتنج (Van Meerbeek et al., 1993) ثم يُطبق لاحقاً الراتنج الرابط

الخالي من المذيبات، فيتغلغل إلى الفراغات بين ألياف الكولاجين وأنايبب العاج، ثم يُصلَّب موضعياً مشكلاً طبقة هجينة مع أوتاد راتنجية توفر ثباتاً ميكانيكياً مجهرياً (Van Meerbeek et al., 2005). طُوِّرت لاحقاً أنظمة مبسّطة ذات خطوتين، تدمج المادة المهيّنة مع المادة الرابطة في محلول واحد، لكنها أقلّ قدرة على الارتشاح ضمن العاج منزوع التمعدن، مما يؤدي إلى طبقة هجينة دون المستوى الأمثل، كما أنّ طبيعتها المحبة للماء تجعلهما أكثر عرضة لامتصاص الرطوبة والتحلل المائي. اعتمدت جودة الربط في هذه الأنظمة بشكل كبير على مستوى رطوبة العاج؛ فالتجفيف الزائد يؤدي إلى انهيار ألياف الكولاجين، أما الرطوبة الزائدة فتسبب انفصال المكونات المحبة والكارهة للماء عن بعضها، وتشكّل فراغات تعيق الربط وتقلل من قوة الطبقة الهجينة. ولذلك يجب التحكم بالرطوبة بدقة، بحيث يبدو الميناء أبيضاً طبشورياً ويبدو العاج عاتم dull بعد التجفيف. ورغم أنّ هذه الأنظمة تُعد المعيار الذهبي للربط السني، إلا أنها لا تمنع تماماً حدوث التسرب النانوي، الذي قد يؤثر سلباً على ديمومة الربط. ولهذا تتجه الأبحاث حالياً نحو تطوير أنظمة أبسط من نوع التخريش الذاتي self-etch.

أنظمة الربط ذاتية التخريش Self-etch

تم تطوير أنظمة الربط ذاتية التخريش لتقليل حساسية التقنية التقليدية etch-and-rinse تجاه الرطوبة وتبسيط خطوات التطبيق السريري، مما يقلل زمن المعالجة. (Sundfeld et al., 2005) تُصنّف هذه الأنظمة حسب عدد خطوات التطبيق إلى أنظمة من خطوة واحدة أو خطوتين، وتحتوي على مونوميرات حمضية فعالة ذات درجة pH أعلى من حمض الفوسفور، تقسم حسب درجة الحموضة إلى قوية ($\text{pH} \leq 1$)، متوسطة ($\text{pH} = 1.5$)، وخفيفة ($\text{pH} \geq 2$). تخرّش الأنظمة الخفيفة العاج بشكل سطحي فقط، مما يسمح بتفاعل كيميائي مع الهيدروكسي أباتيت المتبقي، بينما تُحدث الأنظمة القوية تخریشاً شبيهاً بالتقنية التقليدية (Koshiro et al., 2006) (Kenshima et al., 2006)

تتضمن تركيبة هذه الأنظمة مونوميرات مثل HEMA لتحسين التوافق بين المكونات وزيادة رطوبة العاج، إضافة إلى مونوميرات متعددة الوظائف لتعزيز مقاومة الشبكة الراتنجية. (Van Landuyt et al., 2007b) (Van Landuyt et al., 2005)

لا تتطلب هذه الأنظمة تخریشاً منفصلاً للعاج قبل التطبيق، إذ تخرّش العاج وترتّش ضمنه في خطوة واحدة، (Peumans et al., 2010) وتكوّن طبقة هجينة بعمق 0.5–1.2 ميكرومتر. (A. Reis et al., 2005) ولكن يُلاحظ قصر الأوتاد الراتنجية وندرتها بسبب بقاء طبقة اللطاخة وانخفاض الحموضة، مما قد يؤثر سلباً على تغلغل الراتنج (Price et al., 2003)

تشمل أنظمة الخطوتين مادة مهيئة حامضية ومادة رابطة منفصلين، في حين تدمج أنظمة الخطوة الواحدة كل المكونات في محلول واحد. (Yeniad et al., 2008) إلا أن زيادة المحتوى المائي والحموضة في الأنظمة ذات الخطوة الواحدة يجعلها أكثر نفوذية للماء حتى بعد التصلب، مما يُضعف من متانة الارتباط مع مرور الزمن. (Hashimoto et al., 2003; Tay et al., 2002; Van Landuyt et al., 2008)

أنظمة الربط الشامل Universal Adhesives

ظهرت الأنظمة الشاملة منذ 2011، وتتميز بمرونتها إذ يمكن استخدامها كأنظمة تخريش ذاتي أو تخريش كلي أو بتقنية التخريش الانتقائي للمينا. (Hanabusa et al., 2012; Perdigão et al., 2012) تتيح هذه الأنظمة تطبيقاً مبسطاً بفضل نظام الخطوة الواحدة وتُستخدم بطرق متعددة بحسب نوع النسيج السنية (Hanabusa et al., 2012; Perdigão et al., 2012). ورغم إمكانية استخدام التخريش الذاتي على العاج لتقليل أخطاء التجفيف أو الغسل، إلا أن فعالية هذه الأنظمة على المينا غير المخرشة أقل من حمض الفوسفور، مما يزيد خطر حدوث تلون حفاقي (Erickson et al., 2009; Van Landuyt et al., 2010). لذلك يوصى غالباً بالتخريش المسبق للمينا.

تتميز هذه الأنظمة باحتوائها على مونوميرات مثل MDP التي ترتبط كيميائياً مع الكالسيوم في الهيدروكسي أبائيت، وتُعزز من متانة الربط (Fukeygawa et al., 2006; Yoshihara et al., 2014). كما قد تحتوي على مكونات مثل BPDMA، PEN-TA، و HEMA، إضافة إلى مونوميرات كارهة للماء مثل D3MA ومتوسطة مثل bis-GMA، ما يسمح لها بتشكيل جسر بين النسيج السنية المائية والراتنجات الترميمية الكارهة للماء (De Munck et al., 2003; Tay & Pashley, 2001). وتحتوي بعض الأنظمة الشاملة على سيلان، مما يلغي الحاجة إلى خطوة إضافة السيلان عند الربط مع الخزف أو المواد الترميمية المركبة (Migliau, 2017).

رغم مرونتها، إلا أن هذه الأنظمة قد تتطلب أحياناً استخدام مواد تفعيل منفصلة أو برايمرات مخصصة حسب نوع السطح (Muñoz et al., 2014; Van Meerbeek et al., 2011). لذا يُفضل اختيار طريقة التطبيق حسب الحالة السريرية، مثل إجراء تخريش مسبق في حالة المينا أو العاج المتصلب، أو استخدام النمط الذاتي عند وجود صعوبات في التطبيق مثل الأطفال أو محدودى التعاون.

2.6 تسخين الراتنج المركب Preheating Composite Resins

تم تقديم الراتنج المركب إلى عالم طب الأسنان لأول مرة بواسطة رافاييل بوين عام 1957 (Bowen, 1956). منذ ذلك الحين، أحدثت الراتنجات المركبة ثورة في ممارسة طب الأسنان وأصبحت واحدة من أهم المواد الترميمية. ومع ذلك، فإن التقلص التصلبي والقوى الناتجة عنه يُعدّ من أكبر عيوب الراتنجات المركبة التقليدية

(Davidson et al., 1984). أما على الصعيد السريري، فيمكن أن تؤدي قوى النّقلّص التّصلبي والتي قد تتراوح درجتها بين 1.28-2.10% (Xu et al., 2020) إلى عدة مضاعفات مثل التواء الحديبات (Suliman et al., 1993)، وشقوق مجهرية وكسور في حواف الميناء (JÖRGENSEN et al., 1975)، وتسرب حفافي مجهري (Pashley, 1990)، وفقدان الارتباط (Ferracane & Mitchem, 2003)، والحساسية التّالية للترميم (Opdam et al., 1998)، وتهيج لب السن (M., 1976).

وللتقليل من هذه القوى، تم تقديم تقنية الإضافة التدريجية incremental technique لتطبيق الراتنج المركب ضمن الحفرة المحضرة. تضمن هذه التقنية تحقيق تصلب ضوئي كافٍ للراتنج وتقليل قوى النّقلّص التّصلبي ضمن الحفرة المحضرة. تضمن هذه التقنية تحقيق تصلب ضوئي كافٍ للراتنج وتقليل قوى النّقلّص التّصلبي (Kim & Park, 2011; Kwon et al., 2012). ومع ذلك، فإن تقنية الإضافة التدريجية هي تقنية حساسة وتتطلب مهارات سريرية وأدوات خاصة، بالإضافة إلى استهلاكها وقتاً طويلاً. لذلك، نشأت الحاجة إلى طرق أكثر كفاءة وأقل حساسية لتطبيق الراتنج المركب.

استجابة لذلك، طورت الشركات المصنعة الراتنجات المركبة كتلية الملء، وهي مواد يمكن تطبيقها وتصلبها ضوئياً في طبقة واحدة بسماكة قد تصل إلى 4 أو 5 مم (A. F. Reis et al., 2017). وتتطلب ذلك تغييرات في التركيب الكيميائي للمونومرات، بالإضافة إلى تعديل حجم وشكل جزيئات المادة المائلة لتتناسب التطبيق الكلي.

تُستخدم بروتوكولات وتقنيات متعددة من قبل الأطباء أثناء تطبيق الراتنجات المركبة في الممارسة السريرية. ومن بين هذه التقنيات، يُعد تسخين الراتنج المركب تقنية شائعة نسبياً، حيث ثبت أنها تعزز سيولة المادة وتقلل من ثخانتها الفلمية (Yang et al., 2016). بالإضافة إلى ذلك، قد يعمل التسخين المسبق على تحسين درجة التماثر (Munoz et al., 2008)، وتقليل قوى النّقلّص التّصلبي (Daronch et al., 2006)، وزيادة صلابة سطح الراتنج المركب (Tauböck et al., 2015).

وقد فتحت هذه التعديلات الباب أمام إمكانية استخدام الراتنج المركب، بعد تسخينه، كمادة إلصاق بديلة عن الأسمنتات الراتنجية التقليدية، مما يسمح بتبسيط خطوات الإجراء السريري وتقصير الزمن المطلوب دون المساس بكفاءة الالتصاق. وفي هذا السياق، يكتسب الراتنج المركب كتلي الملء أهمية خاصة، نظراً لقابليته للتطبيق بطبقات سميكة نسبياً، واحتوائه على محفزات ضوئية محسّنة تسمح بتصلب فعال حتى في الأعماق. من هنا، برز تساؤل جوهري حول إمكانية الاستفادة من هذه الخصائص عند تسخين الراتنج كتلي الملء واستخدامه كمادة إلصاق للترميمات غير المباشرة، كبديل للأسمنتات الراتنجية، مع الحفاظ على جودة الارتباط إلى النسيج السنية.

2.7 الراتنج المركب Composite Resin

هو مادة ترميمية تجميلية، تستخدم لترميم الأسنان الأمامية والخلفية

2.7.1 التركيب الكيميائي للراتنج المركب

يتكوّن الراتنج المركب من ثلاثة مكونات رئيسية : قالب راتنجي عضوي، وجزيئات مالئة غير عضوية، وعامل ربط المضاعف coupling agent تساهم هذه المكونات في تحديد خصائص المادة من حيث القساوة، المقاومة الميكانيكية، الثبات اللوني، وسلوك التصلب.

1. القالب الراتنجي العضوي Organic Resin Matrix

إن الراتنج هو المكوّن الفعّال كيميائياً في الكومبوزت. حيث يكون بدايةً عبارة عن مونومير سيّال، لكنّه يتحول إلى متماسك صلب نتيجة تفاعل وارتباط الجذور الحرة بالإضافة. ومن المونوميرات التي تدخل في تركيب القالب الراتنجي للراتنج المركب السّني:

Bis-GMA (Bisphenol A Glycidyl Methacrylate)

هو مونومير راتنجي ذو وزن جزيئي عالٍ، يستخدم كأساس في صناعة الراتنجات المركبة السنية، يتكون من جزيء Bisphenol A مرتبط بمجموعة Glycidyl Methacrylate. يحتوي Bis-GMA على مجموعات هيدروكسيل ($\text{OH}-$) التي تجعله ذا لزوجة عالية جداً، مما يؤثر على قوام الراتنج ويجعل المادة أكثر سماكة. بسبب هذه اللزوجة، غالباً ما يتم خلطه مع مونوميرات أخرى أقل لزوجة مثل TEGDMA لتحسين قابلية التشكيل والتطبيق. كما أن مركب Bis-GMA يعطي راتنجاً قوياً وصلباً لكنه يتصلب ببطء نسبياً.

Bis-EMA (Ethoxylated Bisphenol A Dimethacrylate)

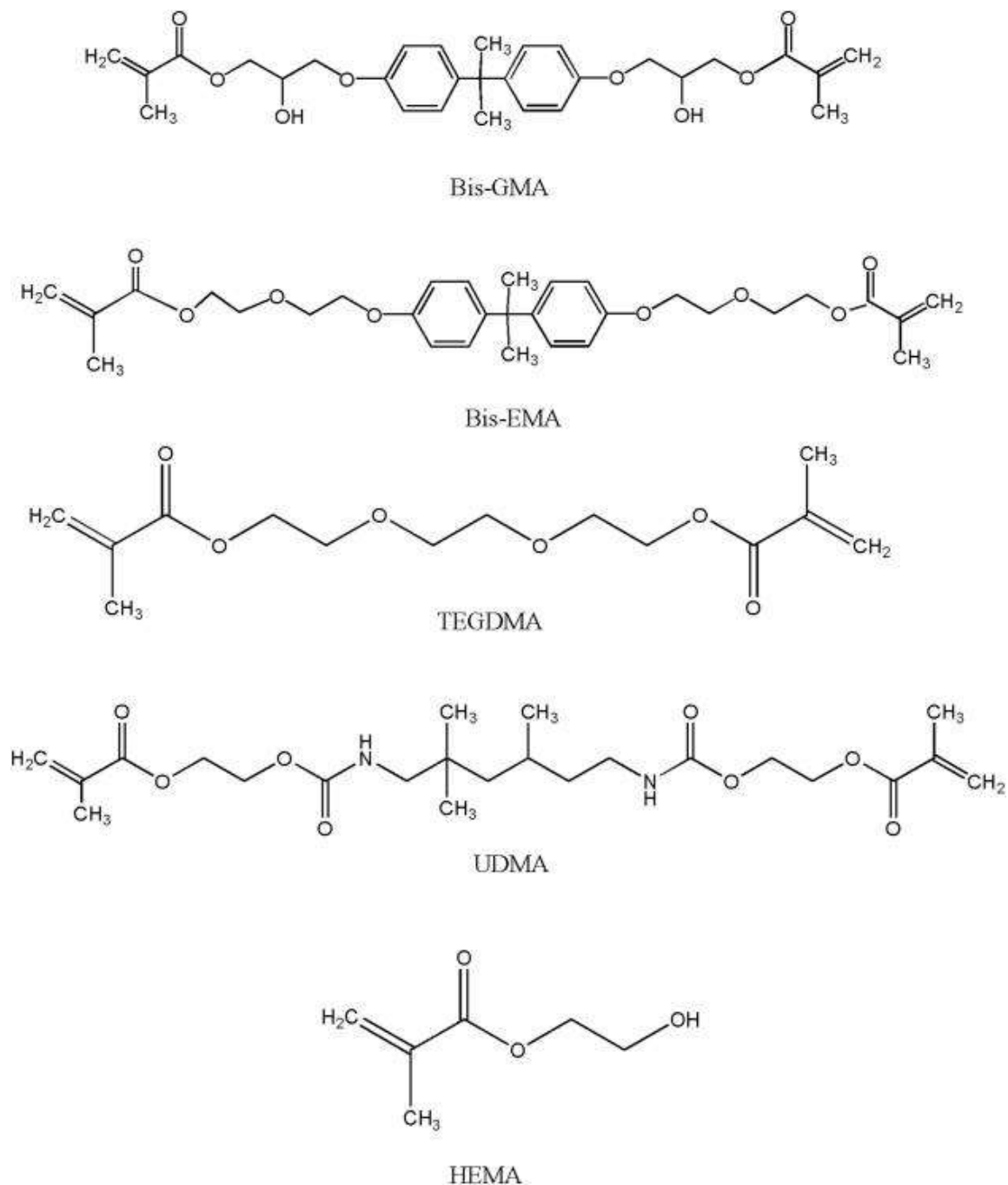
هو مونومير راتنجي مشتق من Bisphenol A أيضاً، لكنه يخلو من مجموعات الهيدروكسيل ($\text{OH}-$)، ويتميز بوجود مجموعات إيثوكسيل (Ethoxy groups) التي تقلل بشكل كبير من لزوجته. هذه الخاصية تجعله أكثر سيولة، مما يتيح تصلباً أسرع وتقلصاً أقل أثناء البلمرة مقارنة بـ Bis-GMA. Bis-EMA ينتج راتنجاً ذا خصائص ميكانيكية جيدة، مع مرونة وتحمل أفضل في بعض الحالات.

يُعدّ TEGDMA (Triethylene Glycol Dimethacrylate) مونوميراً ذو وزن جزيئي منخفض. وهو منخفض اللزوجة يُستخدم عادةً كمخفف لمونومر Bis-GMA عالي اللزوجة، حيث يساهم في تقليل لزوجة الراتنج الكلي، مما يسهل تشكيل المادة وتطبيقها. كما يعمل TEGDMA على زيادة درجة التحول التماثري وسرعة التصلب، لكنه قد يؤدي إلى زيادة التقلص أثناء عملية التماثر. يمنح هذا المونومير بفضل خصائصه، الراتنج المركب القدرة على توصيل الجزيئات لتعزيز الشبكة البوليمرية.

أما UDMA (Urethane Dimethacrylate)، فهو مونومير يتميز بلزوجة متوسطة إلى منخفضة ويستخدم كبديل أو مكمل لـ Bis-GMA. يمنح UDMA الراتنج مرونة أكبر مقارنةً بـ Bis-GMA، مما يساهم في تحسين مقاومة الكسر والمرونة للمادة. يتميز هذا المونومير بدرجة تحوّل تماثري عالية وأداء ميكانيكي متوازن، كما يقلل من التقلّص النسبي أثناء التصلب بالمقارنة مع TEGDMA.

من جهة أخرى، يُستخدم HEMA (2-Hydroxyethyl Methacrylate) كمونومير منخفض الوزن الجزيئي بهدف تحسين الترطيب والإلصاق، وهو مونومير محبّ للماء إذ تحتوي بنيته على مجموعة هيدروكسيل (-OH) تمنحه القدرة على التفاعل مع الرطوبة والأنسجة السنية الرطبة، مما يُحسن من قدرته على التغلغل داخل النسيج السنية، وخاصة العاج. إلا أن هذه الخاصية تجعل منه أكثر عرضة لامتصاص الماء بمرور الوقت، ما يؤدي إلى انخفاض الاستقرار البنيوي للمادة، وزيادة احتمالية التحلل المائي وتدهور الخصائص الميكانيكية على المدى الطويل. لذلك يُستخدم HEMA بكميات قليلة لتجنب التأثير السلبي على الخصائص الميكانيكية العامة للمادة.

بشكل عام، تتكون معظم الراتنجات المركبة الحديثة من خليط من هذه المونوميرات بنسب متباينة بهدف تحقيق توازن بين اللزوجة، وسرعة التصلب، ومستوى التقلّص، والقوة الميكانيكية. يعمل Bis-GMA وUDMA كقاعدة صلبة توفر خصائص ميكانيكية عالية، في حين يُستخدم TEGDMA وHEMA لتعديل اللزوجة وسهولة التطبيق مع مراعاة تأثيرهما على التقلّص والاستقرار. أما Bis-EMA فيسهم في تعزيز السلاسة وسرعة التصلب مع تقليل التقلص، مما يُحسن من الأداء الكلي للراتنج المركب.



شكل 8 البنية الجزيئية للمونوميرات الشائعة في الراتنجات السنية

(Pratap et al., 2019)

هذه الصورة توضح البنية الجزيئية للمونوميرات الشائعة في الراتنجات السنية، Bis-GMA يتميز بوجود حلقات عطرية وهيكل ثقيلة نسبياً مما يمنحه لزوجة عالية ويقلل من التقلص أثناء التصلب. Bis-EMA مشابه لـ Bis-GMA لكن بدون مجموعات الهيدروكسيل، مما يمنحه لزوجة أقل قليلاً وقابلية خلط أفضل. UDMA

يحتوي على روابط يوريثان، ما يجعله أكثر مرونة وأقل لزوجة من Bis-GMA، ويعزز المتانة. TEGDMA مونومير منخفض الوزن الجزيئي يستخدم لتقليل اللزوجة لكنه يزيد من التقلص. HEMA مونومير صغير محب للماء يُستخدم لتحسين الاختراق في المناطق الرطبة، لكنه يضعف من الاستقرار طويل الأمد إذا استخدم بكثرة.

2. الجزيئات المائلة غير العضوية Inorganic Filler Particles

تشكل المواد المائلة الجزء الأكبر من وزن المركبات الراتنجية السنية، حيث تتراوح نسبتها بين 70% إلى 80% بالوزن، وتعمل بشكل رئيسي كمعزز لتحسين الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للراتنج المركب. بعد تصلب القالب الراتنجي، تحاط المواد المائلة بالراتنج لمنع انتشار الشقوق عند حدوث كسر، مما يغير نمط الفشل ويعزز متانة الترميم.

توجد عدة تصنيفات حديثة للمواد المائلة المستخدمة في المركبات الراتنجية السنية، تختلف باختلاف زاوية التحليل العلمي أو التقني. من بين هذه التصنيفات:

- حسب الشكل المورفولوجي: تُصنّف الجسيمات إلى كروية، ألياف، هياكل جوفاء، جسيمات مسامية، أو هياكل مركبة (مثل نواة وقشرة). يهدف هذا التصنيف إلى ربط الشكل بخصائص مثل مقاومة الكسر والتحكم في التقلص.
- حسب المعالجة السطحية والنسبة السطحية: تُعتمد على مساحة السطح الفعالة ومعالجة الجسيمات بمواد رابطة (مثل السيلان)، مما يؤثر على قوة الترابط داخل القالب الراتنجي.
- حسب التركيب الكيميائي: مثل المواد المائلة غير العضوية (زجاج، سيراميك)، أو العضوية، أو المواد المائلة النانوية ذات وظائف إضافية (مثل مضادة للبكتيريا).
- تصنيفات متعددة الأبعاد: تدمج بين الخصائص الميكانيكية والوظيفية، لتطوير مواد مخصصة لتطبيقات معينة كالحشوات الخلفية، أو المركبات المقاومة للتآكل، أو المضادة للميكروبات.

(J. Liu et al., 2021)

عامل الربط المضاعف السيلاني Silane Coupling Agent

يُستخدم لربط الجزيئات المائلة بالقالب الراتنجي، ويعزز من تجانس البنية الكلية للمادة. ويقوم بذلك عن طريق إزاحة الماء الممتص المتوضع على السطح الزجاجي للمواد المائلة، وضمان ارتباط كيميائي قوي بين مجموعة الأكسيد الموجودة على سطح الزجاج وجزيئات الراتنجية (سايس، سهام & البني، صفوح، 2011)

2.7.2 آلية التصلب في الراتنج المركب

يتم تصلب الراتنج المركب التقليدي من خلال تفاعل تماثر الجذور الحرة (Free Radical Polymerization)

تُبنى معظم الراتنجات المركبة السنية من مونوميرات خطية تحتوي على زمري ميثاكريلات في طرفيها، وهي تُعد الوحدة الأساسية في تركيب قالب الراتنجي. تمر عملية تحوّل هذه المونوميرات إلى بوليمرات بثلاث مراحل تُعرف بالبلورة بالنموّ السلسلي: البدء initiation، والانتشار propagation، والانهاء termination.

تبدأ هذه العملية عند تعرّض المادة للضوء، حيث تعمل المُحفّزات الضوئية (Photoinitiators) على إنتاج جذور حرّة. تتفاعل هذه الجذور مع الروابط الثنائية ($C=C$) في زمرة الميثاكريلات، فتكسرها وتحولها إلى روابط أحادية ($C-C$)، مؤدية بذلك إلى بدء سلسلة من التفاعلات. ما يحدث فعلياً هو أن الجذر الحر يتبرّع بالإلكترون، وتتفاعل زمرة الميثاكريلات معه، مما يُحوّل المونومير بأكمله إلى جذر حر جديد قادر بدوره على التفاعل مع مونومير آخر. وهكذا تتكرر العملية، حيث تنمو السلاسل البوليمرية تدريجياً من خلال إضافة مزيد من المونوميرات إلى طرفها النشط.

تستمر هذه السلسلة حتى تتفاعل الجذور الحرّة فيما بينها، مما يؤدي إلى إنهاء النمو وتشكيل شبكة بوليمرية صلبة. في كثير من الحالات، وبسبب استخدام مونوميرات ثنائية الميثاكريلات، لا تنمو السلاسل بشكل خطي فقط، بل تتشابك فيما بينها لتكوّن بنية ثلاثية الأبعاد، وهي المسؤولة عن الخصائص الميكانيكية القوية للراتنج المركب، كالمثانة ومقاومة الاهتراء.

يُقاس مدى نجاح عملية التماثر بما يُعرف بدرجة التحوّل (Degree of Conversion, DC)، والتي تعبر عن النسبة المئوية للمونوميرات التي تم تحويلها إلى بوليمرات. وكلما ارتفعت درجة التحوّل، زادت جودة الراتنج من حيث الثبات والأداء السريري.

(Pratap et al., 2019)

2.7.3 تصنيف الراتنج المركب

تصنيف مركبات الراتنج حسب الاستخدام السريري والخصائص الفيزيائية:

- **المركبات السيالة (Flowable composites):** تتميز بلزوجة منخفضة نتيجة انخفاض نسبة المواد المائلة 42-53% وزيادة نسبة قالب الراتنجي، مما يجعلها مناسبة للتطبيق في الحفر الصغيرة أو كأساس تحت الحشوات.
- **المركبات القابلة لذلك (Packable or condensable composites):** تحتوي على نسبة عالية من المواد المائلة 66-70% وتُصمم لمحاكاة القوام الصلب للأملغم، ما يجعلها مناسبة للحشوات الخلفية.
- **المركبات كتلية المملء (Bulk-fill composites):** مصممة لتطبيقها في طبقات سميكة حتى 4 مم دون التأثير السلبي على التصلب أو التقلص الحجمي، وتُستخدم لتسريع العمل السريري.

تصنيف تجاري حسب خصائص المواد المائلة داخل المركب:

- Microfilled composites: تحتوي على مواد مائلة صغيرة جدًا 0.04-0.1 ميكرون، مما يمنحها لمعاناً عالياً ومتانة سطحية ممتازة، لكنها أقل مقاومة للضغط، لذا تُستخدم في الحشوات الأمامية.
- Hybrid composites: مزيج من جزيئات صغيرة وكبيرة، وتوازن بين الصلابة والمظهر، مناسبة للاستخدام الأمامي والخلفي.
- Nanofilled and nanohybrid composites: تحتوي على مواد مائلة بحجم نانومتري أقل من 100 نانومتر، مما يمنحها خواص ميكانيكية جيدة مع مظهر جمالي ممتاز ولمعان طويل الأمد.

2.8 الراتنج المركب كتلي الملء Bulk-fill Composite Resin

هو نوع من المواد الترميمية التجميلية المصممة لتُستخدم في ترميم الأسنان الخلفية بطريقة مباشرة، ويتميز بإمكانية تطبيقه في طبقات سميكة تصل إلى 4-5 ملم في خطوة واحدة، دون الحاجة إلى تطبيق متعدد الطبقات كما هو الحال في الراتنجات المركبة التقليدية.

2.8.1 التركيب الكيميائي للراتنج المركب كتلي الملء

تشابه المواد كتلية الملء في تركيبها الكيميائي العام مع الراتنجات المركبة التقليدية، مع وجود بعض الاختلافات التي تتعلق بجزيئات المواد المائلة وبالقالب الراتنجي. بشكل عام، تحتوي معظم هذه المواد على نفس المونوميرات الأساسية التي تكوّن القالب الراتنجي، مثل Bis-GMA، وUDMA، وTEGDMA، وBis-EMA، وهي مونوميرات ذات وزن جزيئي متوسط. ومع ذلك، تمت إضافة مونوميرات أخرى منخفضة اللزوجة. وتُسهّم هذه التعديلات في منح المواد كتلية الملء خصائصها التي تسمح بتطبيقها على شكل كتل أو طبقات سميكة دفعة واحدة (Corral-Núñez et al., 2015).

1. تعديلات المونوميرات في الراتنجات كتلية الملء

لا توجد تركيبة موحدة لجميع مركبات الكتلة، حيث تختلف مكوناتها تبعاً للشركة المصنّعة. على سبيل المثال، يحتوي منتج Surefil SDR flow (من شركة DENTSPLY/Caulk) على مونومير محدد هو UDMA. وتدّعي الشركة أن التقنية المستخدمة في هذا المنتج هي تقنية "الراتنج المخفّف للإجهاد"، والتي اشتق منها اسم المنتج. وتُكسب هذه التقنية الجزيء مرونة عالية، ما يخفف من الإجهاد الناتج عن التصلب أثناء عملية التماثر. أما منتج Filtek Bulk Fill Flowable (من شركة 3M ESPE) فيعتمد على مزيج من أربعة مونوميرات مختلفة: Bis-GMA، وUDMA، وProcrilat، وBis-EMA. يتميز مونومير UDMA المستخدم فيه بوزن جزيئي مرتفع، مما يساعد في تقليل التقلسص أثناء التصلب. وقد تم تعديل هذا المونومير ليشمل مجموعة ضوئية فعالة يُشار إليها من قبل الشركة باسم "معدّل البلمرة" (polymerization modulator). فعند تعرّض المادة

للضوء، تتفصل المجموعات الضوئية النشطة، وفي الوقت نفسه تنكسر سلسلة قليلة الوحدات (oligomer chain)، مما يساعد في احتواء الإجهاد الناتج، مع توليد جذور حرة تُعزز من معدل التحول ودرجة التداخل الشبكي للمادة، مع الحفاظ على كفاءة التماثر. بالإضافة إلى ذلك، فإن مونومير Procrylat يمنح المادة سيولة أعلى، مما يساهم أيضاً في تقليل الإجهاد الناتج عن التصلب (Corral-Núñez et al., 2015) أما منتج Tetric N-Ceram Bulk Fill (من شركة Ivoclar Vivadent) فيعتمد في تركيبه على قاعدة من Bis-GMA وUDMA، إلى جانب مونوميرات إضافية ذات لزوجة منخفضة بهدف تحسين انسيابية المادة دون التأثير على خصائصها الميكانيكية. وتُشير الشركة المصنعة إلى أن المادة تحتوي على مكون خاص يُعرف باسم "مُخفف إجهاد التقلص" (shrinkage stress reliever)، وهو عبارة عن مونومير مرن يساعد على تقليل التوترات الناتجة عن التصلب داخل الكتلة الراتنجية.

2. تعديلات المواد المائلة في الراتنجات كتلية الملء

تتراوح نسبة الجزيئات المائلة في مركبات الـ bulk fill بين 66-70% حجمياً، وهي أقل من النسب الموجودة في المركبات الهجينة الدقيقة والهجينة النانوية التقليدية. ومع ذلك، فإنها تُقارب النسبة الحجمية في الراتنجات السيالة التقليدية، ولكنها تمتلك نسبة وزنية أعلى. ويُعزى ذلك إلى كبر حجم الجزيئات المائلة (قد يصل إلى 20 ميكرومتر).

إن انخفاض نسبة الجزيئات المائلة بالتوازي مع كبر حجمها يُقلل من فرق معامل الانكسار بين القالب الراتنجي والجزيئات المائلة، مما يسمح بمرور الضوء بشكل أفضل، وبالتالي يزيد من عمق التصلب ودرجة التحول (Corral-Núñez et al., 2015)

2.8.2 نظام بدء التماثر في الراتنجات كتلية الملء

قامت بعض الشركات المصنعة بإضافة بادئات ضوئية جديدة، مثل Ivocerin من شركة Ivoclar Vivadent والمستخدم في مادة Tetric N-Ceram Bulk Fill وغيرها من المواد. يعمل هذا البادئ الضوئي كمُعزز لعملية البلمرة، ويعتمد في تركيبه على عنصر الجرمانيوم (Ge)، مما يجعل Ivocerin أكثر تفاعلاً نظراً لقدرتها الأكبر على امتصاص الضوء ضمن الطيف 400-450 نانومتر مقارنةً بالبادئ التقليدي Camphorquinone.

2.8.3 تصنيف الراتنج المركب كتلي الملء

التصنيف وفقاً للزوجة:

- المواد عالية اللزوجة (High Viscosity Bulk Fill):

تتميز مواد Bulk Fill الكاملة أو الصلبة (Full Body Bulk Fill) باحتوائها على نسبة أعلى من الجزيئات غير العضوية المألثة مقارنةً بالمواد منخفضة اللزوجة، مما يجعلها أكثر مقاومة للاهتراء، وأفضل في تحمل قوى المضغ. وبالتالي، يمكن استخدامها لملء كامل الحفرة ونحت السطح الإطباق كشكل نهائي، دون الحاجة إلى تغطيتها بطبقة إضافية من مادة راتنجية تقليدية. حيث يتيح إعادة بناء البنية المفقودة من السن من خلال تطبيق طبقة واحدة.

- المواد منخفضة اللزوجة (Low Viscosity Bulk Fill):

تُعرف المواد القاعدية من نوع Bulk Fill بأنها مواد منخفضة اللزوجة وسيالة، مما يُسهّل تطبيقها من خلال فوهة ضيقة للمحقنة. وتُفيد هذه الخاصية في تسهيل التكيف مع الجدران الداخلية في الحفر العميقة أو صعوبة الوصول. لكن، نظرًا لانخفاض محتواها من الجزيئات المألثة مقارنةً بالمواد الراتنجية التقليدية أو المواد الهجينة الدقيقة أو النانوية، فإن خصائصها الميكانيكية تكون أضعف، كما أن سطحها أقل مقاومة للاهتراء. لذلك، يتطلب استخدامها عادةً تطبيق طبقة تغطية من مادة راتنجية تقليدية، ما يمثل تقنية Bulk Fill ثنائية الخطوات. ويُشار إلى هذه المواد أيضًا باسم مواد Bulk Fill السائلة أو الانسيابية (Flowable Bulk Fill).

(Chesterman et al., 2017)

أنواع الراتنج المركب كتلي الملء عالي اللزوجة المعدّل:

- كتلي الملء المنشط صوتياً

تُظهر المواد كتلية الملء عالية اللزوجة خواص ميكانيكية أفضل مقارنةً بنظيراتها منخفضة اللزوجة، بينما تُعد الأخيرة أسهل في التطبيق داخل التجاويف العميقة. وقد تم طرح مواد كتلية ملء تُفعل صوتيًا مثل SonicFill (Kerr). وهي مواد عالية اللزوجة تُطبّق عبر يد تعمل بالهواء باستخدام اهتزازات صوتية، مما يؤدي إلى انخفاض في لزوجة المادة بنسبة تصل إلى 84%. وكنتيجة لذلك، يمكن تطبيقها بسهولة داخل التجويف بشكل سيّال، قبل أن تعود إلى حالتها عالية اللزوجة التي تتيح نحتها بالشكل التشريحي المطلوب.

- كتلي الملء حراري اللزوجة Thermo-Viscous

VisCalor Bulk Fill هو أول منتج في السوق يعتمد على تكنولوجيا "اللزوجة الحرارية". حيث تتم معالجة سطح الجزيئات المألثة وتنسيقه مع القالب الراتنجي، مما يساعد في الحفاظ على لزوجة منخفضة للمادة أثناء ارتفاع درجة الحرارة. تساعد هذه التقنية بتطبيق المادة بوقام سيّال عند درجة حرارة 68°م عبر جهاز تسخين خاص للراتنجات، ثم تعود لتصبح قابلة للنحت والتشكيل مثل المواد المكثفة عند درجة الحرارة العادية.

- كتلي الملء المدعّم بالألياف

يحتوي على ألياف زجاجية مألثة تعمل على تدعيم معقد السن/المادة المركبة عند الترميم. من هذه المواد EverX Posterior (GC). وتُستخدم هذه المركبات المدعّمة بالألياف كبديل للعاج عند ترميم التجاويف

الكبيرة. حيث تساعد الألياف على منع وإيقاف انتشار الشقوق، مما يحمي الترميم من الانكسار، وهو أحد أكثر أسباب فشل الترميمات شيوعاً.

(Van Ende et al., 2017)

2.9 الأسمت الراتنجي Resin Cement

يُعد الأسمت الراتنجي من أهم مواد الإلصاق المستخدمة في تثبيت الترميمات غير المباشرة، وذلك بفضل خصائصه الميكانيكية الممتازة، وتفاعله الكيميائي مع النسيج السنية، وقدرته على تحقيق ارتباط مستمر مع كل من العاج والترميم.

2.9.1 التركيب الكيميائي

يشبه الأسمت الراتنجي في تركيبه العام الراتنج المركب، إذ يتكوّن من قالب راتنجي عضوي غالباً مزيج من Bis-GMA وUDMA و/أو TEGDMA، وجزيئات مالئة غير عضوية، بالإضافة إلى نظام بادئ للتصلب، ومكونات إضافية مثل المذيبات وعوامل الربط.

- **القالب الراتنجي:** يُشكل الأساس العضوي الذي يضمن التفاعل الكيميائي والتحول إلى الحالة الصلبة .
 - **الجزيئات المائلة:** تُضاف لتحسين الخصائص الميكانيكية مثل مقاومة الانضغاط والتآكل، وتختلف نسبتها حسب نوع الأسمت ضوئي أو ثنائي التصلب. وتكون نسبة المواد المائلة أقل من الراتنج المركب مما يجعله أقل لزوجة وأكثر ملائمة لتطبيقات الإلصاق.
 - **أنظمة التصلب:** يتوفر الأسمت الراتنجي بثلاثة أنواع رئيسية حسب آلية التصلب:
 - **ذاتي التصلب (Self-cure):** يعتمد على تفاعل كيميائي داخلي بين المونوميرات والمحفزات.
 - **ضوئي التصلب (Light-cure):** يحتاج إلى ضوء خاص لتفعيل البادئ الضوئي، مثل الكامفوركوينون.
 - **ثنائي التصلب (Dual-cure):** يجمع بين التصلب الضوئي والكيميائي.
 - **عوامل الربط:** تُضاف لتعزيز التوافق مع المواد المائلة المختلفة مثل الخزف أو الزركونيا، وتشمل عوامل سيلانية أو مكونات مخصصة للارتباط بالمعادن أو السيراميك.
- يمتاز الأسمت الراتنجي مقارنةً بالمواد التقليدية مثل فوسفات الزنك أو البوليكريليكولات بقدرة عالية على الالتصاق الرابط بالعاج والبنية التحتية للترميم.

2.10 تقنية التسخين وتطورها ووسائلها

2.10.1 تعريف التسخين

يشير تسخين الراتنج المركب إلى عملية تدفئة المواد الراتنجية الترميمية إلى درجات حرارة تتراوح بين 54°م و 69°م قبل استخدامها سريرياً. وتهدف هذه التقنية إلى تقليل لزوجة الراتنج المركب، مما يُحسن انسيابيته وتكيفه مع جدران التحضير، وبالتالي تحسين خصائص التعامل معه، وربما تحسين الخصائص الفيزيائية للترميم النهائي (Lousan Do Nascimento Poubel et al., 2022).

2.10.2 الخلفية التاريخية والدوافع وراء تسخين الراتنج المركب

طُرحت فكرة تسخين الراتنج المركب لأول مرة من قبل الدكتور جاك إل. فريدمان عام 2001، وذلك من خلال مجموعة من براءات الاختراع الأمريكية التي وصفت كلاً من طريقة وجهاز تسخين المواد الراتنجية قبل وضعها في التحضيرات السنية (Friedman, 2001a, 2001b). وقد كانت الأهداف الرئيسية من هذه التقنية هي تحسين انسيابية الراتنج المركب عالي الملاء دون التضحية بخصائصه الميكانيكية، وتعزيز التكيف مع جدران التحضير، وتقليل الإجهاد الناتج عن التقلص التصلبي. وبخلاف الراتنجات المركبة السيالة flowable composite resin التي تمتاز بسهولة التعامل والتطبيق على حساب انخفاض محتواها من المواد المألثة وضعف خواصها الميكانيكية، فقد قدّمت تقنية التسخين حلاً وسطاً ذو فائدة سريرية واضحة.

2.10.3 وسائل التسخين

ساهم فريدمان في تطوير جهاز Calset™ لتسخين المواد الراتنجية، والذي يُعد من أوائل الأجهزة المتوفرة تجارياً لهذا الغرض وأكثرها استخداماً في الدراسات. الموضح بالشكل (8) (Lousan Do Nascimento Poubel et al., 2022)

ورغم تزايد شعبية هذه التقنية، لم تُنتج حتى الآن مادة راتنجية تم تصنيعها خصيصاً أو تعديلها كيميائياً بغرض التسخين. ومع ذلك، فقد استُخدمت العديد من المواد التجارية المتوفرة على نطاق واسع في الدراسات المتعلقة بالتسخين، مثل Filtek Z250/Z350 XT من شركة 3M/ESPE، و Tetric EvoCeram، من Ivoclar، حيث أظهرت الأدلة تحسناً في خصائص التعامل مع المادة والتكيف مع جدران الحفرة المحضرة ودرجة التحول، وأحياناً في الخصائص الميكانيكية.

(Lousan Do Nascimento Poubel et al., 2022)

تتوفر العديد من أنواع الراتنجات المركبة التجارية بشكل كبسولات (compules)، تُستخدم لمرة واحدة تساعد على تقليل خطر التلوث المتبادل بين المرضى. من الأمثلة على هذه المواد :

Tetric PowerFill من شركة Ivoclar Vivadent، و Filtek One Bulk Fill من شركة 3M/ESPE، و Estelite Bulk Fill Flow من Tokuyama Dental. وتُستخدم هذه الكبسولات عادةً مع فرد خاص للتطبيق، يتيح حقن المادة مباشرةً في الحفرة المحضرة.

وقد استفادت تقنية التسخين المسبق للراتنج المركب بشكل كبير من هذا التصميم. إذ طُوِّرت أنواع من أجهزة التسخين، مثل جهاز Calset™، لتسخين الكبسولة بالكامل وبشكل متجانس إلى درجة حرارة محددة (عادةً بين 54°م و 68°م) قبل الاستخدام مباشرة. وبعد التسخين، تُوضع الكبسولة مباشرة في الفرد وتُحقن داخل الحفرة المحضرة، مستفيدةً من تحسّن انسيابية المادة وتكيّفها مع جدران الحفرة المحضرة.

إن الدمج بين تقنيّة التسخين والتطبيق بالكبسولات يقدم عدة فوائد سريرية مهمة؛ فهو يحافظ على الطابع المعقم للكبسولة ذات الاستخدام الواحد، ويقلل من وقت المعالجة السريري، ويُعزز من كفاءة العمل في العيادة. كما أن تسخين المادة داخل الكبسولة نفسها يقلل من تعرضها للهواء المحيط، مما يُخفف من خطر البلمرة المبكرة أو التلوث. وقد أظهرت دراسات سابقة أن الراتنجات المركبة المُسخنة والمُطبقة بهذه الطريقة تُظهر تحسناً في الانطباق الحفافي ودرجة التحول التماثري، وأحياناً خصائص ميكانيكية أعلى مقارنةً بالمواد غير المُسخنة (Daronch et al., 2006; Lucey et al., 2010).



شكل 9 جهاز CalsetTM لتسخين كبسولات ومحاقن وعبوات الراتنج المركب

التسخين لدرجة حرارة تتراوح بين 54-68°م.



شكل 10 كبسولات راتنج مركب

كبسولات راتنج مركب تُستخدم لمرة واحدة، تُركَّب في فرد خاص للتطبيق ضمن الحفرة المحضَّرة



شكل 11 صورة لعملية إلصاق ترميم غير مباشر خزفي

بواسطة الراتنج المركب المسخن توضّح ارتفاع سيولة المادّة بعد التسخين (Marco Veneziani, 2017)

إن استخدام الأجهزة المخصصة لتسخين الراتنجات المركبة مثل CalsetTM (AdDent)، و ENAHeat و Micerium S.p.A)، و WarmUp (Kerr) هو الأكثر شيوعاً في الدراسات. رغم ذلك، فقد استكشفت العديد من الدراسات طرقاً بديلة لتحقيق الغرض ذاته. فعلى سبيل المثال، استخدم (Daronch 2006) حماماً مائياً بدرجة حرارة 60°م لمدة 10 دقائق لتسخين محاقن الراتنج المركب، ولاحظوا زيادة ملحوظة في معدل التحول التماثري وفعاليته (Daronch et al., 2006).

بالإضافة إلى ذلك، بحث كل من Olivares و Goulart استخدام أجهزة تسخين الشمع في تسخين الراتنج المركب كخيار منخفض التكلفة يحافظ على درجة حرارة مستقرة وفعالة (Goulart et al., 2018). كما قام Almeida باستخدام حاضنة مخبرية بدرجة حرارة 60°م لمدة 30 دقيقة، فأثبتت الحاضنة فاعليتها في الحفاظ على درجة الحرارة المطلوبة لتسخين الراتنج المركب (Almeida et al., 2015) ومن الجدير بالذكر أن بعض التقارير السريرية غير المنشورة تشير إلى استخدام أجهزة تسخين فنانجين القهوة كخيار متاح وبسيط لتسخين الراتنج المركب، وقد حقق هذا الأسلوب نتائج مرضية من حيث سهولة التعامل وتكيّف المادة داخل الحفرة المحضّرة. وفي هذا السياق، أجرت ريم قرصة في جامعة دمشق (2021) دراسة قارنت فيها بين استخدام جهاز تسخين الكوتا المستخدم عادة في المعالجة اللبية وبين الحمام المائي لتسخين الراتنج المركب، وقد أظهرت النتائج فعالية كلا الطريقتين في رفع درجة حرارة الراتنج المركب وتحسين خصائصه العملية. ورغم تباين هذه الأساليب من حيث درجة التقييس والتوفر، فإنها تعكس جميعها اهتماماً سريرياً واضحاً بتحسين الخصائص الفيزيائية وسلوك التعامل للراتنجات المركبة من خلال التسخين.

2.11 تأثير التسخين على خصائص الراتنج المركب

يُستخدم الراتنج المركب ضوئي التصلب على نطاق واسع في الممارسة السريرية، وهو مادة مركبة تحتوي على نظام بادئ للتصلب مفعّل بالضوء، يتكون من محسسات ضوئية ومحفزات. عند تعريض الراتنج للضوء بطول موجي محدد، تمتص المحسسات الضوئية الطاقة وتنتج الجذور الحرة. تتفاعل هذه الجذور الحرة مع جزيئات المونومر، مما يطلق تفاعلاً تسلسلياً يؤدي إلى تماثر وتقسية القالب الراتنجي.

2.11.1 تأثير التسخين المسبق على لزوجة الراتنج المركب، وسيولته والتماثر

أظهر التسخين المسبق للراتنجات المركبة تأثيرات ملحوظة على كل من اللزوجة وقابلية الجريان، وسلوك التماثر. إذ يؤدي التسخين إلى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات، مما يسمح للمونومرات أو الأوليغومرات بأن تتباعد عن بعضها البعض وتنزلق بسهولة، وبالتالي تنخفض اللزوجة وتحسن قابلية الجريان، مما يجعل المادة أكثر سلاسة وأسهل في الاستخدام السريري، وبخاصة عند استخدامها كمادة لإصاق بديلة (Patussi et al., 2023). تُظهر هذه المواد عند التسخين سلوكاً يشبه الأسمنت الراتنجي من حيث خصائص التدفق. وقد أُشير إلى أن انخفاض اللزوجة يُحسن من قدرة المادة على التكيف مع جدران التحضير الدقيقة، وبالتالي يزيد من فعالية الإصاق. هذه الخصائص تجعل الراتنج المركب المُسخّن خياراً مناسباً لتطبيقات الإصاق، حيث يمكن أن يوفر ترطيب أفضل للأسطح (Hendi et al., 2019).

من حيث آلية التماثر، فإن رفع درجة حرارة المادة قبل التصلب يؤدي إلى زيادة سرعة التفاعل، حيث تزداد حركة الجذور الحرة والمونومرات، مما يزيد من معدل التصادم بينها. بالإضافة إلى أن التسخين يخلق حجماً فراغياً إضافياً يعزز من فعالية التفاعل، ويؤدي إلى زيادة في درجة التحول Degree of Conversion، وهي مؤشر مهم على كفاءة التماثر بالإضافة إلى ذلك فإن التسخين يسمح بانتشار أكثر انتظاماً للسلاسل البوليمرية، ويمكن أن يؤدي إلى تشكيل شبكة بوليمرية أكثر تجانساً. وغالباً ما ينتج عن ذلك قساوة مجهرية أعلى ومادة أكثر استقراراً (Kampanas, 2018).

مع ذلك، فإن هذا الارتفاع في درجة التحول يكون مصحوباً عادة بزيادة في إجهاد التقلص التماثري. إذ أن البنية الشبكية المتكونة بعد التصلب تصبح أكثر كثافة، ما يؤدي إلى تطور قوى شد داخلية في المادة. وقد نُوقش أن البوليمر يصبح أكثر تقارباً بعد البلمرة، مما يؤدي إلى زيادة إضافية في إجهاد التقلص. وعلى الرغم من أن هذا قد يؤثر سلباً على الترميم، إلا أن بعض الدراسات أشارت إلى أن التسخين قد يساعد في تقليل هذه التأثيرات من خلال تحسين تكيّف المادة مع سطح السن (Kampanas, 2018).

خلاصة القول، فإن تسخين الراتنج المركب يؤدي إلى انخفاض اللزوجة، وتحسين القابلية للجريان، وزيادة درجة التحول نتيجة لتعزيز الحركة الجزيئية. ومع ذلك، فإنه قد يساهم أيضاً في زيادة في إجهاد التقلص الناتج عن التصليب، مما يتطلب توازناً دقيقاً في الاستخدام السريري.

2.12 الدراسات السابقة

بدأ موضوع تسخين الراتنج المركب قبل تطبيقه في مجال الترميمات المباشرة، في محاولة للتغلب على مشاكل الراتنج المركب وهي اللزوجة والالتصاق وتحقيق انطباقٍ حفايٍ جيدٍ للترميم على جدران الحفرة المحضرة وتقليل الفجوات المتشكلة بين السن والترميم. وتم اختبار العديد من المواد ذات الأساس الراتنجي مخبرياً لتقييم تأثير التسخين على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والتحفيز الضوئي. وفقاً لمراجعة منهجية قام بها Lopes وزملاؤه عام 2020 للمقالات المنشورة عن تأثير التسخين على خصائص المواد ذات الأساس الراتنجي، استنتج أن التسخين يحسن الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمواد (Lopes, Terada, Tsuzuki, Giannini, & Hirata, 2020) فتسخين الراتنج المركب ينقص لزوجته مسهلاً انطباقه على جدران الحفرة المحضرة، كما أن هناك تحسن في العديد من الخصائص الفيزيائية كارتفاع درجة التحول وانخفاض التقلص التماثري.

إن متوسط درجة الحرارة في الأدبيات الذي عُدّ آمناً تراوح بين 54-69 °C وفقاً لبعض المؤلفين (El-Deeb, Abd El-Aziz, & Mobarak, 2015) (Karacan & Ozyurt, 2019) إذ اعتُبر أنه لا يسبب أذية للنسج اللببية. كما أن بعض الإجراءات السريرية كالتحضير والتفعيل الضوئي للمواد الراتنجية يسبب ارتفاعاً مشابهاً أو أكبر مما يسببه تسخين الراتنج المركب. كما أن هناك انخفاضاً سريعاً في درجة حرارة الراتنج المركب بعد إزالته من جهاز التسخين بما يقارب 50% خلال دقيقتين. (Daronch, Rueggeberg, Moss, & De Goes, 2006)

إن أهم فائدة لتسخين الراتنج المركب هو تقليل اللزوجة الذي سمح باستخدامه في إلصاق الترميمات غير المباشرة. (Goulart et al., 2018) كما أن تسخين الراتنج المركب ذو القوام العادي يقلل من سماكته الفلمية بنسبة 24% (Dionysopoulos et al., 2014)، على الرغم من ذلك فإن السماكة الفلمية للراتنج المركب المحمي حرارياً أثنى بـ 4.5 مرة من الأسمنتات الراتنجية ثنائية التصلب وفقاً لما أظهرته إحدى الدراسات إلا أن هذا لا يمنع استخدامه في إلصاق الترميمات غير المباشرة لعدم وجود إجماع بين الباحثين حول الثخانة الفلمية المقبولة في إلصاق الترميمات غير المباشرة (Marcondes et al., 2020) بالإضافة لما اقترحه بعض المؤلفين أن الثخانة الفلمية للترميمات غير المباشرة يجب ألا تتجاوز 120 µm (Colpani, Borba, & Della Bona, 2013; Goujat et al., 2019).

إنَّ إحدى أهم صفات مادة الإلصاق الرابطة هي قوة الارتباط بنوعيتها شد أو قص، وقد دُرست هذه الخاصية للزانتج المركَّب المسخَّن المستخدم في إلصاق الترميمات غير المباشرة في العديد من الدراسات:

فقد قام Goulart وزملاؤه عام 2018 بدراسة قوة ارتباط الشد المجهريّة (μTBS) لثلاثة أنواع من الزانتج المركَّب المسخَّن ومقارنتها مع تلك لأسمنتٍ راتنجيٍّ ضوئيٍّ التصلب. حيث تضمّنت عيّنة البحث 50 رحي ثلاثة مقلوعة تم تحضير سطحها الإطباق لكشف العاج والحصول على سطح مستوٍ من أجل إجراء الاختبار، ثم تم تصنيع 50 قرص من الزانتج المركب Tetric N-Ceram من شركة Ivoclar بسمكتين 2 و4مم وقطر 10م. تم تقسيم الأسنان أولاً لمجموعتين حسب ثخانة الترميم الذي سيتم إلصاقه، مجموعة أولى بترميمات ذو ثخانة 2 مم ومجموعة ثانية بترميمات ذو ثخانة 4 مم، ثم تم تقسيم المجموعتين الرئيسيتين إلى ثلاث مجموعات فرعية حسب نوع المادة المستخدمة في إلصاق الترميمات وهي: (1) Venus راتنج مركَّب ضوئيٍّ التصلب بمواد مألثة مجهرية هجينة من شركة Heraeus Kulzer، (2) Z250 XT راتنج مركَّب ضوئيٍّ التصلب بمواد مألثة بحجم النانو هجينة من شركة 3M ESPE، (3) RelyX ARC أسمنت راتنجي ثنائي التصلب من شركة 3M ESPE. تم تقسيم كل من المجموعتين الفرعيتين ل Venus و Z250 XT مرة أخرى إلى مجموعتين حسب درجة حرارة الزانتج المركَّب عند الإلصاق: (أ) إلصاق بدرجة حرارة الغرفة، (ب) إلصاق بعد التسخين لدرجة حرارة 64°C. ثم تم إلصاق الأقراص إلى الأسنان وتقطيعها وإجراء اختبار قوة ارتباط الشد. في مجموعة الأقراص بثخانة 2مم، سجلت أعلى قوة ارتباط شد ل Z250 XT بدرجة حرارة الغرفة وعند التسخين. ولم يكن هناك فرق جوهري بين Venus والأسمنت الراتنجي RelyX ARC. أما في مجموعة الأقراص بثخانة 4مم أعطى Venus المسخن قيمة لقوى ارتباط الشد أعلى من الأسمنت الراتنجي RelyX ARC بينما لم يكن هناك فروق جوهريّة بين Venus بدرجة حرارة الغرفة و Z250 XT المسخن وبدرجة حرارة الغرفة و RelyX ARC. وكان الاستنتاج بأن تسخين الزانتج المركب من أجل الإلصاق قد لا يحسّن من قوة ارتباط الشد المجهريّة، إلّا أنه يمكن أن يقلل من لزوجة المادة ويحسن تصلبها. (Goulart et al., 2018)

وفي دراسة أخرى قام بها Alvarado وزملاؤه عام 2020 لمقارنة قوة ارتباط الشد المجهريّة بين الزانتج المركَّب المسخَّن والأسمنت الراتنجي ذاتي الإلصاق. حيث تم تحضير حفر معيارية من الصنف الثاني لكل من 30 ضاحك، ثم تم تصنيع حشوات غير مباشرة من الزانتج المركب، وزّعت الأسنان عشوائياً إلى مجموعتين: المجموعة الأولى أُلصقت بالزانتج المركَّب المسخَّن (ENA HRI, SYNCA)، والمجموعة الثانية أُلصقت بالأسمنت الراتنجي ذاتي الإلصاق (Relyx U200, 3M ESPE)، ثم تم تقطيع العيّنة ودراسة قوة ارتباط الشد المجهريّة. أظهرت النتائج أنّ قوة ارتباط الشد كانت أعلى للأسمنت الراتنجي ذاتي الإلصاق ولكن ختم وانطباق الترميمات غير المباشرة الملصقة بالزانتج المركَّب كان أفضل. واستنتجت الدراسة بأنّ الزانتج المركَّب المسخَّن هو خيارٌ لإلصاق الترميمات غير المباشرة في حفر الثاني على الصّواحك. (Alvarado et al., 2020)

ثم قام Aboushahba وزملاؤه عام 2020 بدراسة قوة ارتباط القص المجهريّة للترميمات الخزفية المقوّاة باللّوسيت IPS Empress CAD مع الأسمنت الراتنجي ومقارنتها مع الراتنج المركّب المسخّن. فتم تصنيع 60 قرصاً خزفياً وتقسيمها إلى ثلاث مجموعات حسب المادة التي ألصق إليها القرص، فالمجموعة الأولى كانت المادة أسمنت راتنجي ضوئيّ التّصلب Variolink Esthetic LC، والمجموعة الثانية كانت المادة راتنج مركّب مسخّن ذو جزيئات مألئة بحجم النّانو Tetric EvoCeram Composite، والمجموعة الثالثة استعمل فيه الراتنج المركّب السابق نفسه ولكن بعد تعريضه لدورتين حراريتين. ثم تم إجراء اختبار قوة ارتباط الشّد وجمع البيانات وتحليلها، فكانت النتيجة بأن أعطى الراتنج المركّب المعرّض لدورتين حراريتين أعلى قوة ارتباط قص مجهريّة تلاه الراتنج المركّب المسخّن لمرة واحدة وأخيراً الأسمنت الراتنجي، لكن الفرق بين الأخيرين لم يكن جوهرياً. واستنتجت الدراسة بأنّ الراتنج المركّب ذو الجزيئات المألئة بحجم النّانو يمكن أن يكون بديلاً محتملاً للأسمنت الراتنجي للإصاق التّرميمات الخزفيّة. (Aboushahba et al., 2021)

وفي دراسة أخرى عن قوة ارتباط القص قام بها Multu وزملاؤه عام 2020، تم جمع 108 رحي ثلاثة وتحضير سطحها الإطباقيّ حتى كشف العاج، ثم قسّمت إلى 9 مجموعات بشكل عشوائي. ثم صُنعت أقراص خزفية IPS e. max CAD بثخانة 3مم، وتم إلصاق كل مجموعة بمادة إلصاق مختلفة وكانت المواد المستعملة هي: (1) Variolink Esthetic DC من شركة Ivoclar Vivadent وهو أسمنت راتنجي ثنائي التصلب، (2) G-CEM LinkForce من شركة GC وهو أسمنت راتنجي ثنائي التصلب، (3) Panavia V5 من شركة Kuraray وهو أسمنت راتنجي ثنائي التصلب، (4) Maxcem Elite Chroma من شركة Kerr وهو أسمنت راتنجي ذاتي الإلصاق ثنائي التصلب، (5) G-ænial Universal Flo من شركة GC وهو راتنج مركب سيال، (6) Herculite XRV Ultra Flow من شركة Kerr وهو راتنج مركب سيال، (7) Vertise Flow من شركة Kerr وهو راتنج مركب سيال، (8) Enamel Plus HRI من شركة Micerium وهو راتنج مركب استعمل بطريقة التخريش الكامل وطريق التخريش الذاتي وطريقة الإلصاق الذاتي. وكتلخيص اختبر 4 أنواع من الأسمنت الراتنجي و3 أنواع من الراتنج المركب السيال ونوع من الراتنج المركب العادي. وألصقت عينات كل مجموعة بالمادة المحددة لها، ثم تم تعريض الأسنان لدورات حرارية، ثم تم إجراء الاختبار. وكانت هناك فروق جوهريّة بين المواد من حيث قوة ارتباط القص، وسُجّلت أعلى قيم قوة ارتباط القص للراتنج المركّب السيال G-ænial Universal Flo، بينما سُجّلت أدنى قيم للراتنج المركب السيال Vertise Flow المُلصق بنظام الإلصاق الذاتي. واستنتجت الدراسة بأنّ الراتنج المركب السيال يمكن أن يكون بديلاً للأسمنت الراتنجي في إلصاق الخزف الزجاجي المقوى ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم عند اتباع نظام التخريش الكامل. أما بالنسبة للراتنج المركب المسخّن Enamel Plus HRI فقد أعطى نتائج مشابهة لكل المواد المختبرة عدا G-ænial Universal Flo، لذلك فقد استنتجت الدراسة بأنه

يمكن استخدامه لإصاق الترميمات المصنوعة من الخزف الزجاجي المقوى ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم. (Mutlu et al., 2021)

وأخر دراسة سنذكرها عن قوة الارتباط هي دراسة قام بها Rodrigues وزملاؤه عام 2021 قارن فيها بين الراتنج المركب ذو أساس الميتاكريلات ومواد مألئة بحجم النانو المسخن مع الراتنج المركب ذو أساس السيلوران ومواد مألئة مجهرية هجينة المسخن ومع أسمنت راتنجي من حيث قوة ارتباط الشد، عند استخدامهم كمادة لإصاق للترميمات الضمنية المصنوعة من الخزف الفلدسباري. حيث تم تحضير 30 ضاحك لاستقبال ترميم ضمني، ثم تم بعد ذلك قُسمت إلى 3 مجموعات حسب نوع مادة الإصاق، فكانت المجموعات كالتالي: (1) Filtek Z350 راتنج مركب ذو أساس ميتاكريلات ومواد مألئة بحجم النانو، (2) Filtek P90 راتنج مركب ذو أساس سيلوران ومواد مألئة مجهرية هجينة، (3) Relyx ARC أسمنت راتنجي ثنائي التصلب، وجميع المنتجات من شركة 3M ESPE. ثم تم إصاق الترميمات إلى الأسنان بواسطة مواد إصاق، ثم جُهزت العينات لإجراء اختبار قوة ارتباط الشد، وتم جمع البيانات. فكانت النتيجة بأن أعطى الراتنج المركب ذو أساس الميتاكريلات ومواد مألئة بحجم النانو المسخن Filtek Z350 قوة ارتباط مشابهة للأسمنت الراتنجي Relyx ARC، بينما أعطى الراتنج المركب ذو الأساس السيلوران المسخن Filtek P90 القيم الأدنى. لذلك استنتجت الدراسة بأن الراتنج المركب ذو أساس الميتاكريلات والمواد المألئة بحجم النانو المسخن حسن من قوة ارتباط الشد بشكل مشابه لما هو عليه في الأسمنت الراتنجي التقليدي، لذا فيمكن استخدامه في إصاق الترميمات الضمنية المصنوعة من الخزف الفلدسباري، بينما يجب استخدام الراتنج المركب ذو أساس السيلوران المسخن بحذر (Rodrigues et al., 2021).

أحد المتغيرات التي تمت دراستها أيضاً هي درجة التحول، فقد قام Acquaviva وزملاؤه عام 2009 بدراسة درجة التحول لثلاثة مواد، أسمنتان راتنجيان وراتنج مركب. وقد تضمنت العينة 180 ترميم مغطى مُصنَّع من الراتنج المركب Signum من شركة Heraeus بعدة ثخانات (2 مم، 3 مم، 4 مم)، تم إصاق هذه الترميمات إلى: (1) Variolink II من شركة Ivoclar وهو أسمنت راتنجي ثنائي التصلب، (2) Calibra من شركة Dentsply وهو أسمنت راتنجي ثنائي التصلب، (3) Venus من شركة Heraeus وهو راتنج مركب بمواد مألئة مجهرية هجينة، استُعمل بدرجة حرارة الغرفة، (4) Venus الراتنج المركب السابق نفسه ولكن استُعمل بدرجة حرارة 54 °C. أثناء التصلب تم توحيد طاقة وزمن الجهاز لكل إجراءات التصلب. ثم تم إجراء تحليل رامان المجهرية. وكانت النتائج بأن سماكة الترميم يؤثر بقوة على درجة التحول في كل العينات إلا أن هذا التأثير لم يكن جوهرياً. كما أظهر الأسمنت الراتنجي نسبة درجة تحول وسطية 64%، أما بالنسبة للراتنج المركب فقد أظهر نتائج درجة تحول مرضية فقط مع الثخانات المنخفضة للترميمات، إلا أن التسخين قد حسن بشكل واضح من أداء الراتنج المركب تحت الثخانات الأكبر من الترميمات. واستنتجت الدراسة أن تسخين الراتنج المركب يسمح للمادة بأن تصل لدرجات تحول مثالية > (Acquaviva et al., 2009)

وفي دراسة قام Coelho وزملاؤه عام 2019 كان أحد المتغيرات المدروسة درجة التحول، فتمت المقارنة بين أسمنت راتنجي ضوئي التصلب RelyX Veneer من شركة 3M ESPE، وراتنج مركب مسخن بمواد مألثة مجهرية هجينة Filtek Z100 من شركة 3M ESPE، وراتنج مركب بمواد مألثة بحجم النانو هجينة IPS Empress Direct من شركة Ivoclar، وراتنج مركب بمواد مألثة بحجم فوق النانو Estelite Omega من شركة Tokuyama. وتم ربط كمية معيارية من كل مادة إلى وجه من الخزف الفلدسباري بسماكة 0.8 مم، وكانت النتائج متشابهة بين جميع المواد الراتنجية المستعملة من حيث درجة التحول ولم يكن هناك فروق جوهرية.

أما بالنسبة لمتغير الثخانة الفلمية، ففي دراسة قام بها Fahmi وزملاؤه عام 2020 لدراسة تأثير التسخين على الثخانة الفلمية لعدة أنواع من الراتنج المركب ومقارنتها مع الراتنج المركب. تم استخدام 6 مواد راتنجية في هذه الدراسة، أسمنتان راتنجيان Calibra veneer cement من شركة Dentsply و Relyx™ U200 من شركة 3M ESPE كمادة شاهدة، وأربعة أنواع من الراتنج المركب Filtek™ Bulk Fill من شركة 3M ESPE، و Filtek™ Z350 XT من شركة 3M ESPE، و PALFIQUE LX5 من شركة Tokuyama، و ENA من شركة Hri Micerium. وتم قياس الثخانة الفلمية وفقاً للطريقة المعيارية، وكانت النتائج كما هي في الجدول المرفق، واستنتجت الدراسة بأن تسخين الراتنج المركب يقلل من ثخانته الفلمية، إلا أنها لم تصل للثخانة الفلمية للأسمنت الراتنجي، على الرغم من ذلك فإن الراتنج المركب المسخن يُعدّ خياراً جيداً للإلصاق الرابط. (FAHMI & NAJIM, 2020)

وفي دراسة أخرى تتحرى تأثير التسخين والطاقة فوق الصوتية على الثخانة الفلمية للراتنج المركب قام بها Falacho وزملاؤه عام 2021، تم تصنيع 126 زوج من أقراص مصنعة من الراتنج المركب، وتم تقسيمها على 6 مجموعات وفقاً لمادة الإلصاق المستخدمة والتقنية المستخدمة (تسخين أو اهتزاز فوق صوتي أو كلاهما معاً)، وكانت المواد المختبرة أسمنت راتنجي ضوئي التصلب Variolink Esthetic LC من شركة Ivoclar، وراتنج مركب ذو جزيئات ملء بحجم النانو هجين IPS Empress Direct من شركة Ivoclar، وراتنج مركب ذو جزيئات فوق النانو Estelite Omega من شركة Tokuyama. وكانت أقل ثخانة فلمية مشاهدة هي ل Variolink Esthetic LC عند المقارنة بين كل المجموعات ما عدا مجموعة IPS Empress Direct المسخنة والمفعلة بالاهتزاز فوق الصوتي. والنتيجة بأن الاهتزاز فوق الصوتي بالإضافة إلى التسخين يقلل السماكة الفلمية للراتنج المركب بشكل مشابه لما هو عليه في الأسمنت الراتنجي. (Falacho et al., 2021)

كانت إحدى الانتقادات الموجهة لتقنية التسخين هي أن استخدام الراتنج المركب المسخن في إلصاق الترميمات غير المباشرة سيؤثر على دقة الانطباق بالاتجاه العمودي للترميمات. فقام الباحث Magne وزملاؤه عام 2018 بدراسة تجيب عن هذا التساؤل، فتم تحضير حفرة أنسية طاحنة وحشية على 60 رحي بلاستيكية متماثلة، ثم تم تصنيع الترميمات من Lava Ultimate بسماكة 3 مم، وتقسيم الأسنان إلى مجموعتين، حيث تم

في المجموعة الأولى إلصاق الأسنان بواسطة الراتنج المركب المسخن Filtek Z100، بينما تم إلصاق المجموعة الثانية بواسطة أسمنت راتنجي ثنائي التصلب RelyX Ultimate. وتم أولاً تقييم انطباق الترميمات عند التجربة، ثم تم تقييمها ثانيةً بعد ترميل الأسنان، ثم تم تقييمها بعد وضعها مع عامل الإلصاق، وأخيراً بعد التصليب الضوئي. وبعد جمع البيانات وتحليلها كانت النتائج بأن الترميل يؤدي إلى توضع أخفض للترميمات الضمنية، وأن وجود الراتنج المركب المسخن يعوّض عن هذا الفرق. وبعد التصليب كان توضع الترميمات الملصقة بالراتنج المركب المسخن أقرب لما هي عليه عند التجربة من الأسمنت الراتنجي، إذ أن ثخانة الراتنج المركب عوّضت عن النقص الحاصل بعد الترميل. (Magne et al., 2018)

أما بالنسبة لمتغير الثبات اللوني، قام Gugelmin وزملاؤه بتقييم الثبات اللوني للوجوه الخزفية الملصقة بالراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي لمدة 12 شهر. حيث استخدم أسمنتان راتجيان AllCem Veneer وضوئي التصلب و AllCem ثنائي التصلب، كما استخدم ثلاثة أنواع من الراتنج المركب Z100 و Herculite و Durafil. وكانت الترميمات بثخانة 0.8 مم مصنوعة من الخزف الزجاجي المقوى ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم. وتضمنت العينة 40 قاطعة بقرية. وبعد إلصاق الوجوه على الأسنان تم حساب ΔE واعتبرت القيمة المرجعية، ثم تم إعادة حسابها بعد 7 و 30 و 90 و 180 يوم ثم بعد 12 شهر. وكانت النتيجة بأن مواد الإلصاق المختلفة المستخدمة في إلصاق الوجوه الخزفية أثّرت على اللون النهائي للترميمات، وأعطى كلاً من الأسمنت الراتنجي الضوئي والثنائي التصلب نتائج متشابهة من حيث الثبات اللوني. وإن الراتنج المركب ذو الملء المجهري Durafill أعطى تغير لوني مهم سريراً بعد سنة. وكما أن التسخين لم يؤثر على الثبات اللوني للراتنج المركب بالمقارنة مع المواد المستخدمة بدرجة حرارة الغرفة. (B. P. Gugelmin et al., 2020)

2.12.1 خلاصة الدراسات السابقة

من خلال مراجعة معظم الأبحاث والدراسات التي تتعلق بمجال إلصاق الترميمات غير المباشرة بواسطة الراتنج المركب المسخن وجد أنها:

- 1- معظم الدراسات كانت مخبرية ما عدا دراسة سريرية تراجعية طويلة الأمد لمدة 7 سنوات قارنت بين الراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي من حيث الديمومة. (Staněk et al., 2022)
- 2- معظم الدراسات المقارنة بين الراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي في إلصاق الترميمات غير المباشرة أعطى فيها الراتنج المركب المسخن نتائج مشابهة أو أفضل من الأسمنت الراتنجي، إلا أنه وفقاً لمراجعة منهجية قام بها Barbon وزملاؤه مع تحليل تلوي لمختلف المتغيرات، أعطى الراتنج المركب المسخن نتائج مشابهة أو أقل من الأسمنت الراتنجي. (Barbon et al., 2022)

3- من الملاحظ أن معظم الدراسات المخبرية لم تطبق التعمية أثناء إجراء الاختبارات ولم تحدد كيفية توزيع العينات بشكل عشوائي بين المجموعات ولم تذكر طريقة حساب حجم العينة وهو ما قد يسبب تحيزاً في النتائج.

2.12.2 نقاط الاتفاق والاختلاف بين الدراسات

تتفق معظم الدراسات على أن تسخين الراتنج المركب يغير من لزوجته ويسهل تدفقه، مما قد يساعد على تقليل الفجوات وتحسن التكتيف الحفافي، إلا أن هذه الفوائد لا تُترجم دائماً إلى تحسن فعلي في قوة الارتباط. كما تختلف الدراسات في تقييم أداء الراتنج المُسخن من حيث قوة الارتباط بحسب نوع المادة المستخدمة، نوع سطح الركيزة (الميناء أو الخزف)، ودرجة حرارة التسخين.

في حين أظهرت بعض الدراسات مثل (2021 Aboushahba.) تفوق الراتنج المُسخن على الأسمنتات الراتنجية، أظهرت دراسات أخرى مثل (Goulart., 2018) أداءً أدنى أو مشابهاً. ويبدو أن نوع الراتنج، درجة الحرارة، وطبيعة السطح المرتبط تلعب دوراً حاسماً في هذه التباينات.

2.12.3 الثغرات في الأدبيات العلمية

رغم تعدد الدراسات حول مقارنة قوة الارتباط بين الراتنجات المركبة المُسخنة والأسمنتات الراتنجية، إلا أن هناك نقصاً واضحاً في الدراسات التي تركز بشكل خاص على الراتنج المركب كتلي الملء (Bulk-Fill Composite) كمادة تثبيت، حيث لم يُدرس بشكل موسّع من حيث خصائصه اللاصقة بعد التسخين، لا سيما عند تطبيقه على ترميمات خزفية بارتفاعات وسماكات مختلفة، وبعد إخضاع العينات إلى ظروف محاكاة سريرية كالدورات الحرارية Thermocycling. كما تقتصر الأدبيات إلى دراسات تقارن بشكل مباشر بين الأنواع المختلفة من bulk-fill وبين أنواع الأسمنتات الراتنجية ذات المعايير السريرية المشابهة، باستخدام تصميم تجريبي موحد، وهو ما تسعى إليه الدراسة الحالية لسد هذه الثغرة وتوفير دليل تجريبي أوضح حول فعالية هذه المادة في تثبيت الترميمات.

جدول 1 ملخص الدراسات السابقة

المؤلفون (السنة)	هدف الدراسة	نوع المادة	المتغير المدروس	أهم النتائج
Lopes وآخرون (2020)	مراجعة تأثير التسخين على خصائص المواد الراتنجية	مواد راتنجية متعددة	الخصائص الفيزيائية والميكانيكية	التسخين يحسن الخصائص، يقلل اللزوجة ويزيد درجة التحول
El-Deeb وآخرون (2015)	دراسة درجة حرارة التسخين الآمنة	راتنج مركب	السلامة الحيوية	54-68 °C آمن ولا يسبب أذية لللب
Daronch وآخرون (2006)	دراسة انخفاض حرارة الراتنج بعد التسخين	راتنج مركب	الحرارة	انخفاض بنسبة 50% خلال دقيقتين
Goulart وآخرون (2018)	مقارنة قوة الشد المجهرية بين مواد مختلفة	راتنجات مركبة وأسمنت راتنجي	μTBS	لا فرق جوهري بالتسخين، لكن يقلل اللزوجة
Alvarado وآخرون (2020)	مقارنة μTBS بين الراتنج المسخن والأسمنت ذاتي الإلصاق	ENA HRI و Relyx U200	μTBS	الأسمنت أقوى، لكن الراتنج يعزز الانطباق
Aboushahba وآخرون (2021)	مقارنة قوة القص للتثبيت الخزفي	Tetric EvoCeram و Variolink	قوة القص	الراتنج المسخن يعادل أو يتفوق على الأسمنت
Mutlu وآخرون (2021)	مقارنة قوة القص لتسعة مواد مختلفة	راتنجات وأسمنتات متنوعة	قوة القص	G-aenial الأفضل، Vertise Flow الأضعف
Rodrigues وآخرون (2021)	مقارنة شد الراتنجات المختلفة كأساس إلصاق	P90، Z350، RelyX ARC	قوة الشد	P90، Z350 = RelyX، الأضعف لا فرق جوهري بالتسخين
Acquaviva وآخرون (2009)	دراسة درجة التحول	Venus، Calibra، II Variolink	درجة التحول	التسخين يحسن التحول للترميمات السميكة
Coelho وآخرون (2019)	مقارنة درجة التحول	IPS Empress، Z100، Estelite، Direct	درجة التحول	لا فروق جوهريّة بين المواد

المؤلفون (السنة)	هدف الدراسة	نوع المادة	المتغير المدروس	أهم النتائج
Fahmi وآخرون (2020)	دراسة تأثير التسخين على الشخانة الفلمية	6 مواد راتنجية مختلفة	السماكة الفلمية	التسخين يقلل السماكة لكنها أعلى من الأسمنت
Falacho وآخرون (2021)	تأثير التسخين والاهتزاز على السماكة	3 مواد إصاق	السماكة الفلمية	التسخين + الاهتزاز = أقل سماكة مشابهة للأسمنت
Magne وآخرون (2018)	تأثير التسخين على دقة الانطباق	RelyX، Filtek Z100 Ultimate	الانطباق العمودي	التسخين يحسن الانطباق بعد الترميل
Gugelmin وآخرون (2020)	تقييم الثبات اللوني للترميمات	Z100، AllCem، Durafil، Herculite	الثبات اللوني	Durafile يتغير لونه بعد سنة، التسخين لا يؤثر

2.13 قوة ارتباط الشد Tensile Bond Strength

2.13.1 تعريف المفهوم

قوة ارتباط الشد هي مقياس يستخدم لتحديد قوة الالتصاق بين مادة لاصقة و سطح السن أو الترميم. وتعدّ من أهم العوامل التي تحدد نجاح الإلصاق الرابط في الترميمات السنية، إذ تؤثر بشكل مباشر على ديمومة الترميمات وعمرها الافتراضي. من الناحية السريرية، تساهم قوة ارتباط الشد العالية في تقليل أخطار الفشل المبكر للترميمات السنية وزيادة استقرارها، مما يُحسن من نتائج العلاج طويل الأمد (Armstrong et al., 2017).

طرق الاختبار

يمكن إجراء هذا الاختبار إما على مقياس كبير: اختبار الشد الكبير *macrotensile bond strength* أو على مقياس مجهري: اختبار الشد المجهري *microtensile bond strength*، يتميز اختبار الشد المجهري بإمكانية تقييم مناطق صغيرة من سطح الارتباط، غالباً بمساحة حوالي 1 مم²، مما يتيح توزيعاً متجانساً للإجهاد وتقليل تأثير العيوب البنيوية على نتائج الاختبار. بالمقابل، يغطي اختبار الشد الكبير مساحات أكبر، عادةً أكبر من 3 مم²، مما يزيد من احتمال وجود عيوب داخلية أو تفاوتات في السطح الارتباط، وهو ما قد يؤدي إلى انخفاض في قيم قوة الارتباط المقاسة مقارنةً بالاختبار المجهري. وعلى الرغم من أن اختبار الشد الكبير أقرب إلى ظروف التطبيق السريري من حيث مساحة السطح، إلا أن الاختبار المجهري يُعد أكثر حساسية في الكشف عن الفروقات الدقيقة بين أنظمة الإلصاق المختلفة، لذا يُستخدم على نطاق واسع في الدراسات المخبرية المقارنة (Armstrong et al., 2017).

الباب الثالث: المواد
والطرائق
Materials
and Methods

3.1 تصميم الدراسة

دراسة مخبرية تجريبية مقارنة مضبوطة لتقييم قوة ارتباط الشد لثلاث مواد لربط ترميمات IPS Emax Press إلى العاج:

1. الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب
2. الراتنج المركب التقليدي المسخن إلى 69م
3. الراتنج المركب كتلي الملء المسخن إلى 69م

3.2 عينة البحث

3.2.1 حساب حجم عينة البحث:

لتحديد حجم العينة المناسب لهذه الدراسة، تم إجراء تحليل القوة power analysis باستخدام برنامج G*Power 3.1. واستند التحليل إلى معلمات اختبار تحليل التباين أحادي الاتجاه الإحصائي one-way ANOVA test لمقارنة قوة ارتباط الشد بين ثلاث مجموعات مختلفة (أسمنت راتنجي، وراتنج مركب مسخن إلى 69 درجة مئوية، وراتنج مركب كتلي الملء مسخن إلى 69 درجة مئوية). تم إدخال المعلمات التالية في برنامج G*Power:

- نوع الاختبار: F-tests, ANOVA fixed effects, omnibus, one-way
 - احتمالية خطأ ألفا: 0.05
 - القوة $(1 - \beta)$: 0.80
 - عدد المجموعات: 3
 - حجم التأثير: 0.591 تم حسابه من قيم أُخذت من دراسة مشابهة (Rodrigues et al., 2022).
- باستخدام هذه المعلمات، قدر GPower حجم العينة المطلوب 10 عينات لكل مجموعة. يضمن حجم العينة هذا قوة كافية (80%) للكشف عن فرق ذي دلالة إحصائية بين المجموعات عند مستوى الدلالة 5%.

3.2.2 عينة البحث

- الأسنان: تألفت عينة البحث من 30 رحي ثالثة بشرية سليمة خالية من النخور والترميمات وخالية من التصدعات والكسور ولم يمض على قلعها أكثر من 6 أشهر. جُمعت من قسم القلع في كلية طب الأسنان في جامعة دمشق ومن بعض العيادات الخاصة.

- الخزف: 30 متوازي مستطيلات خزفي بأبعاد 4*4 ملم وارتفاع 6 ملم، مصنع من الخزف الزجاجي المقوى ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم (IPS Emax Press) بطريقة الحقن.

3.2.3 توزيع العينة

توزعت عينة الأسنان عشوائياً إلى ثلاث مجموعات وفقاً لمادة الإلصاق المستخدمة في إلصاق المكعبات الخزفية إلى الأسنان:

- المجموعة الأولى (n=10): هي المجموعة الشاهدة، استخدم فيها الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب Variolink N في إلصاق المكعبات الخزفية إلى سطوح الأسنان.
- المجموعة الثانية (n=10): استخدم فيها الراتنج المركب التقليدي Tetric N Ceram المسخن لدرجة حرارة 69م° في إلصاق المكعبات الخزفية إلى سطوح الأسنان.
- المجموعة الثالثة (n=10): استخدم فيها الراتنج المركب كتلي المليء Tetric N Ceram Bulk-fill المسخن لدرجة حرارة 69م° في إلصاق المكعبات الخزفية إلى سطوح الأسنان.

3.3 المواد المستخدمة في البحث

○ مواد الراتنج المركب Tetric N Ceram Bulk-fill :

هو راتنج مركب نانو هجين nanohybrid composite من إنتاج شركة Ivoclar Vivadent يمكن أن يطبق كتلة واحدة تصل سماكتها إلى 4 مم ويتوفر بثلاث درجات لونية IVA – IVB – IVW. يتألف القالب الراتنجي من مونوميرات ثنائية الميثاكريلات (dimethacrylates Bis-GMA, Bis EMA, UDMA) بنسبة 19-21% وزناً، أما المحتوى الكامل من المواد المائلة غير العضوية فيشكل 75-77% وزناً. تتألف المواد المائلة من زجاج الباريوم وجزيئات متماترة prepolymer ويوتيريبيوم ثلاثي الفلور وأكاسيد مختلطة. يتراوح حجم الجزيئات المائلة بين 0.04-3 µm بمتوسط حجم ذرات 0.6 µm*.



شكل 12 راتنج مركب نانومتري هجين nanohybrid composite

Tetric N Ceram

هو راتنج مركب هجين hybrid composite من إنتاج شركة Ivoclar Vivadent. يتألف القالب الراتنجي من مونوميرات ثنائية الميثاكريلات dimethacrylates Bis-EMA, Bis-GMA, UDMA، أما المحتوى الكامل من المواد المائلة غير العضوية فيشكل 80-83% وزناً. تتألف المواد المائلة من زجاج الباريوم ومتماثر مشترك copolymer ويوتيربيوم ثلاثي الفلور وأكسيد السيليكون والزركونيوم المختلط ويتراوح حجم الجزيئات المائلة بين 40-3000 نانومتر*



شكل 13 راتنج مركب هجين hybrid composite من إنتاج شركة Ivoclar Vivadent.

الأسمنت الراتنجي: Variolink N

هو نظام إصاق ذو أساس راتنجي ثنائي التصلب، يستخدم في الإصاق الرابط للترميمات المصنعة من الخزف الزجاجي والخزف الزجاجي المملوء ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم والراتنج المركب. يتوفر الأساس بأربعة ألوان BL1, T, A1, A3 أما المسرع فيتوفر بلونين: T, A3 ومستويين من اللزوجة: عالي ومنخفض اللزوجة. استخدم في هذا البحث الأساس ذو اللون الأبيض A1 والمسرع منخفض اللزوجة ذي اللون الشفاف T. يتألف القالب الراتنجي من Bis-GMA ومونوميرات ثنائية الميثاكريلات urethane dimethacrylate، triethylene glycol dimethacrylate. تتألف المواد المائلة من زجاج الباريوم ويوتيربيوم ثلاثي الفلور وزجاج فلور سيليكات الباريوم والألمنيوم وأكسيد مختلط كروي. ويتراوح حجم الجزيئات بين 0.04-3 μm بمتوسط 0.7 μm .*

* حسب النشرة الفنية للمنتج

* حسب النشرة الفنية للمنتج



شكل 14 أسمنت الراتنجي Variolink N

○ المادة الرابطة: Tetric N-Bond Universal

هو مادة رابطة للمينا والعاج بمكون واحد، ضوئي التصلب، يتلائم مع كل تقنيات التخریش (ذاتي التخریش، تخریش المينا الانتقائي، التخریش والغسل). يمكن أن يصلب ضوئياً لمدة 10 ثوانٍ بشدة ضوئية 500-1400 mW/cm² أو لمدة 5 ثوانٍ بشدة ضوئية 1800-2200 mW/cm². التركيب:

- HEMA, Bis-GMA, D3MA, MDP
- إيثانول وماء
- Methacrylate-modified polyacrylic acid
- Silicon dioxide
- Camphor quinone
- Ethyl p-dimethyl aminobenzoate
- * dimethyl aminoethyl methacrylate-2



شكل 15 المادة الرابطة: Tetric N-Bond Universal

○ مهيب الخبز: Monobond N

هو مهيب عالمي يتوسط الارتباط اللاصق بين مواد الإلصاق ذو الأساس الراتنجي والمواد المستخدمة في الترميمات غير المباشرة. ويتركب من محلول كحولي من ميثاكريلات السيلان وميثاكريلات حمض الفوسفور وميثاكريلات الكبريتيد. ويستخدم لتشكيل رابطة كيميائية بين مواد الإلصاق ذو الأساس الراتنجي والخزف الزجاجي أو المعادن أو الراتنج المركب أو الراتنج المركب المقوى بالألياف.*

* حسب النشرة الفنية للمنتج



شكل 16 مهيئ الخزف: Monobond N

○ المواد المخرشة

Condac Porcelana مخرش حمضي للخزف مؤلف من جل منخفض اللزوجة يحتوي على حمض فلور

الماء بتركيز 10% ويمتزج جيداً مع الماء مما يسمح بإزالته بسهولة بعد تخريش السطح الخزفي.

FineEtch 37 مخرش حمض الفوسفور بتركيز 37%



شكل 17 مخرش حمض الفوسفور بتركيز 37%

جدول 2 قائمة المواد المستخدمة في البحث

اسم المادة	النوع / الوظيفة	الشركة المصنعة	بلد المنشأ	ملاحظات الاستخدام في الدراسة
Tetric N-Ceram	راتنج مركب تقليدي (خاضع للتسخين)	Ivoclar Vivadent	ليختنشتاين	سُخِّن إلى 69°م واستخدم كمادة إصاق
Tetric N-Ceram Bulk Fill	راتنج مركب كتلي الملء (خاضع للتسخين)	Ivoclar Vivadent	ليختنشتاين	سُخِّن إلى 69°م استخدم كمادة إصاق
Variolink N	أسمنت راتنجي ثنائي التصلب	Ivoclar Vivadent	ليختنشتاين	استخدم وفق بروتوكول الشركة في الإصاق
Monobond N	مادة مهيئة للخزف (سيلان)	Ivoclar Vivadent	ليختنشتاين	استُخدم لتحضير سطح الخزف قبل الإصاق
Tetric N-Bond Universal	مادة رابطة (Universal Adhesive)	Ivoclar Vivadent	ليختنشتاين	استُخدم بعد تخريش العاج بحمض الفوسفور
Hydrofluoric acid 10%	حمض تخريش للخزف			استخدم لتخريش سطح الخزف
Phosphoric acid 37%	حمض تخريش للعاج			استخدم لتخريش العاج لمدة 15 ثانية
Feldspathic ceramic blocks	خزف فليسياري	Ivoclar Vivadent	ليختنشتاين	استخدمت مكعبات بأبعاد 6×4×4 مم

3.4 الأدوات والأجهزة المستخدمة في البحث

جدول 3 قائمة الأدوات والأجهزة المستخدمة في البحث

الأداة/الجهاز	الشركة / المنشأ	النوع / الطراز	الاستخدام
قرص ماسي للتحضير	KOMET, Germany	Diamond Disc 940.104	تحضير السطح الطاحن للأسنان
أداة تقليح	Dentaluck	CK-6	تنظيف سطح الجذر
قبضة مستقيمة منخفضة السرعة	NSK, Japan	NSK EX-203C	للتحضير
ملزمة معدنية لتثبيت القبضة	Yost Tools, USA	Yost Tools 445 Bank Vise, 4.5 Inch	تثبيت القبضة بشكل مستو تماماً أثناء التحضير
ورق سحل	Hermes Abrasives, Germany	Silicon carbide abrasive paper, grit size P600	تحضير طبقة اللطخة
سيرنغ ماء للتبريد	-	-	يستخدم لتوجيه الماء مباشرة إلى منطقة التحضير
فراشي دقيقة	-	-	تطبيق المادة الرابطة
أداة ولوح مزج	-	-	مزج الأسمنت الراتنجي
محقنة كومبوزت	-	-	يوضع فيها الراتنج المركب ليسخن في الجهاز ثم ليطبق على السن
جهاز التسخين	China	AR Heater (Dental Composite Resin Heater)	تسخين الراتنج المركب
جهاز اختبار قوة ارتباط الشدة	Instron Corporation, USA	Instron 1011	اختبار قوة ارتباط الشدة
ميكروموتور	UMS Dental, South Korea	STRONG 204 + 102	التحضير
مقياس حرارة رقمي بالأشعة تحت الحمراء	AMPROBE	IR608A	ضبط درجة حرارة الماء أثناء الدورات الحرارية
عدسة مكبرة جراحية	MiCare, China	2.5×-3.5× Surgical Loupes with Headlight	مزودة بإضاءة أمامية للفحص الدقيق

الأداة/الجهاز	الشركة / المنشأ	النوع / الطراز	الاستخدام
مكبرة ضوئية stereomicroscope	MEIJI TECHNO	SKT 41322	فحص نمط الفشل
بياكوليس رقمي	China	Digital Caliper 0-150mm	قياس أبعاد المكعب الخرافي
جهاز تصليب ضوئي	China	Dental Wireless LED Curing Light Lamp, 5 W, 2000 mW/cm ²	تصليب ضوئي للمواد



شكل 18 الأدوات المستخدمة بالبحث



شكل 20 جهاز التسخين



شكل 19 بياكوليس رقمي



شكل 22 جهاز اختبار الشد Instron 1011



شكل 22 المكورة الضوئية Stereomicroscope المستخدمة في تحديد نمط الفشل

SKT 41322



شكل 23 مقياس حرارة بالأشعة تحت الحمراء Amprobe

3.5 الطرائق Methods

3.5.1 تحضير عينات البحث

تم العمل وفق المواصفة ISO/TS 4640

Dentistry Test methods for tensile bond strength to tooth structure

جمع عينة الأسنان وتخزينها: جمع الأسنان: جُمع ثلاثون سنًا من الأرحاء الثالثة البشرية بعد قلعها لأسباب علاجية، على ألا يزيد زمن القلع عن ستة أشهر. تم اختيار الأسنان الخالية من النخور، أو الترميمات، أو التصدعات، أو الكسور الظاهرة، وتأكد خلوها من أي تغيّرات بنيوية واضحة. تم الحصول على الأسنان من عيادات الجراحة في كلية طب الأسنان، بعد الحصول على الموافقة الخطية المسبقة من المرضى، ووفقًا لقواعد أخلاقيات البحث العلمي.



شكل 24 نموذج من عينة الأسنان

تنظيف الأسنان وتخزينها: غُسلت الأسنان جيدًا بالماء الجاري مباشرة بعد القلع، وتمت إزالة الأنسجة الرخوة أو البقايا دموية باستخدام أداة يدوية حادة CK6، دون استخدام مواد كيميائية أو مطهرات، تجنبًا لتأثيرها على النسيج السنية. وتم تخزين الأسنان في ماء مقطر من الدرجة الثالثة (Grade 3) وفقًا للمواصفة، عند درجة حرارة 4°م، داخل حاويات غير شفافة للحماية من الضوء. وقد تم استبدال سائل التخزين دوريًا مرة واحدة شهريًا على الأقل. تم الحفاظ على رطوبة الأسنان في جميع المراحل لتقليل التغيرات البنيوية المحتملة.

1- تركيب الأسنان في القوالب الراتنجية:

تُثبتت الأسنان داخل قوالب راتنجية صلبة باستخدام راتنج أكريلي منخفض النشر للحرارة من نوع Technovit 4004 (Kulzer, Germany)، بلونه الأحمر، لضمان استقرار الأسنان وتثبيتها في وضعية معيارية. حيث تم صب الأسنان بطريقة يكون فيها السطح الإطباق للسن متعامدًا تمامًا مع المحور الطولي للقالب الراتنجي (بشكل متوازي مستطيلات)، وتم التأكد من صحة هذا التوازي باستخدام سطح مستوٍ لتوجيه الزاوية، بهدف ضمان توحيد زاوية التحضير في جميع العينات. نُقلت الأسنان إلى وسط تخزين بدرجة حرارة الغرفة (22±4°م) بعد مرور 15 دقيقة من بدء تصلب الراتنج، مع مراعاة تجنب تعرض السن للجفاف خلال كل مراحل العمل.



شكل 25 سطح السن بعد التحضير



شكل 26 سن مصبوب ضمن قاعدة راتنجية

وبعد صب الأسنان في القوالب الراتنجية نُقلت إلى سائل تخزين بدرجة حرارة الغرفة $24 \pm 2^\circ$ للبدا في عملية التحضير.

تحضير الأسنان: تم تحضير سطح قياسي للأسنان عن طريق تسوية السطح الطاحن باستخدام قرص ماسي (Diamond Disc 940.104 – KOMET) مُركب على قبضة مستقيمة منخفضة السرعة من نوع 204 STRONG UMS، موصولة بميكروموتور (NSK EX-203C, E-type, EX Series)، مُثبتة القبضة بإحكام باستخدام ملزمة معدنية

(Yost Tools 445 Bank Vise, Blue) لضمان استقرارها في وضع أفقي تماماً أثناء عملية التحضير. سبق أن تُثبتت الأسنان داخل قوالب راتنجية صلبة ذات شكل متوازي مستطيلات، بحيث وُضع السطح الإطباق لكل سن بشكل متعامد تماماً مع المحور الطولي للقالب. وقد استُخدمت هذه القوالب لضبط زاوية التحضير بدقة، مما ساعد في الحفاظ على توجيه موحد ومتعامد مع المحور الطولي للسن خلال جميع الإجراءات. تم تنفيذ التحضير باستخدام ضغط يدوي ثابت، وبشكل متعامد تماماً، مع تطبيق تبريد مستمر عبر سيرنغ ماء موجه مباشرة إلى منطقة التحضير، وذلك لتقليل ارتفاع الحرارة الناتج عن الاحتكاك وحماية النسيج السنية. تم فحص الأسنان بصرياً بعد كل عملية تحضير باستخدام عدسة مكبرة جراحية بتكبير $2.5 \times - 3.5 \times$ MiCare, China مزودة بإضاءة أمامية، وتم اعتماد المعايير التالية لاختيار العينات المقبولة:

- أ- التأكد من أن السطح المحضر يقتصر على العاج فقط.
- ب- التأكد من أن السطح النهائي مستوٍ وناعم، أي خالٍ من التعرجات أو الخدوش العميقة أو علامات النحت، كما تم التأكد بصرياً باستخدام العدسة المكبرة.
- ج- استبعاد الأسنان التي تحتوي على ثقب نافذة إلى حجرة اللب.
- د- استبعاد الأسنان التي تظهر عليها شقوق أو خطوط متعرجة.
- تم الاستمرار بالتحضير حتى زوال آخر جزيرة مينائية مرئية، لضمان أن تكون جميع الأسطح النهائية مؤلفة بالكامل من عاج مكشوف.
- ولتقليل التباين الناتج عن الاختلافات الفردية في الأداء اليدوي operator variability، تم تنفيذ جميع عمليات التحضير بواسطة نفس الباحثة. كما نُفذت كافة الإجراءات ضمن درجة حرارة محيطية مضبوطة (23 ± 2) °م.
- وعند نهاية كل تحضير، غُسلت الأسنان بالماء الجاري لمدة 10 ثوانٍ، ثم أُزيل الماء الظاهر على السطح باستخدام كريات قطنية، دون تعريض العاج لتجفيف مفرط، تماشيًا مع متطلبات المواد اللاصقة المستخدمة لاحقًا.
- تحضير طبقة اللطاخة: تم تحضير طبقة اللطاخة على الأسطح المحضرة للأسنان باستخدام ورق سحل من نوع (WS Flex Silicon Carbide Abrasive Paper (Hermes Abrasives, Germany بحجم حبيبات P600. أُجري السحل لمدة 15 ثانية بحركة دورانية عكس عقارب الساعة، باستخدام ضغط يدوي معتدل، وذلك بهدف تشكيل طبقة لطاخة موحدة على سطح العاج المكشوف، تمهيدًا لخطوات الإلصاق اللاحقة.



شكل 27 تحضير طبقة اللطاحة

تخريش سطح السن: خُرش السطح العاجي المحضّر باستخدام حمض الفوسفور Phosphoric Acid Gel بتركيز 37 % لمدة 15 ثانية، وفقاً لتعليمات الشركة المصنعة لمادة Tetric N Bond Universal (Ivoclar Vivadent).

بعد ذلك، شُطف السطح جيداً بتيار قوي من الماء لمدة لا تقل عن 5 ثوانٍ، ثم أزيلت الرطوبة الزائدة باستخدام كريات قطنية حتى الوصول إلى سطح عاجي رطب ولا مع قليلاً، دون تجفيف مفرط.

تطبيق المادة الرابطة: وُضعت كمية مناسبة من المادة الرابطة

Ivoclar Vivadent, Liechtenstein Tetric N-Bond Universal في بئر خلط معتم، وتم تطبيقها على السطح العاجي المحضّر باستخدام فرشاة دقيقة Microbrush.

غُطيت المنطقة المعالجة بالكامل بالمادة الرابطة، وتم فركها بنشاط على السطح لمدة لا تقل عن 20 ثانية لضمان التغلغل الفعال ضمن الأنابيب العاجية. بعد ذلك، جُففت المادة بلطف باستخدام تيار هواء مضغوط خالٍ من الزيت والرطوبة، حتى تكوّن طبقة رقيقة، لامعة، وغير متحركة، مع تجنّب تعريض المادة للضوء القوي خلال هذه الخطوة.

أُجري التصليب الضوئي للمادة الرابطة لمدة 10 ثوانٍ باستخدام جهاز تصليب ضوئي لاسلكي (Dental Wireless LED Curing Light Lamp, 5 W, 2000 mW/cm², China) بشدة إشعاعية تتراوح ما بين 500–1400 mW/cm²، حيث وُضع رأس الجهاز أقرب ما يمكن من سطح السن مع تجنب التماس معه.



شكل 28 تطبيق المادة الرابطة

تخريش المكعبات الخزفية: تم تخريش سطح المكعبات الخزفية باستخدام حمض فلور الماء بتركيز 10% (Condac Porcelana, FGM, Brazil) لمدة 60 ثانية، وذلك بهدف تهيئة السطح الخزفي لتحقيق ارتباط ميكانيكي أفضل مع المواد اللاصقة. بعد انتهاء زمن التخريش، تم شطف السطح بتيار مائي غزير لمدة لا تقل عن 30 ثانية لإزالة بقايا الحمض والسيليكا الذائبة، تلا ذلك تجفيف السطح تمامًا باستخدام تيار هوائي نظيف وخالٍ من الزيت والرطوبة. تُترك السطح غير ملوث بعد التخريش لضمان فعالية تطبيق البرايمر لاحقًا.



شكل 29 تخريش مكعب خزفي

تهيئة المكعبات الخزفية: بعد تجفيف سطح المكعبات الخزفية، تم تطبيق مادة البرايمر Monobond N Ivoclar Vivadent باستخدام فرشاة دقيقة Microbrush، بحيث غُطّي السطح المعالج بالكامل بطبقة متجانسة من المادة. تُركت المادة على السطح لمدة 60 ثانية لضمان التفاعل الكامل مع الخزف، ثم تم تجفيفها بتيار هوائي قوي ونظيف لإزالة الفائض وتكوين طبقة رقيقة وفعالة للربط الكيميائي لاحقاً مع الأسمنت الراتنجي.



شكل 30 تطبيق مهية الخزف

الإلصاق:

(a) المجموعة الأولى: ستخدم الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب (Variolink N (Ivoclar Vivadent) بدرجة حرارة الغرفة. استُخدم الأساس Base بلون A1 والمسرّع (Catalyst) (الشفاف منخفض اللزوجة (Transparent, Low Viscosity))، بنسبة مزج 1:1، وزمن عمل يبلغ 3.5 دقيقة عند درجة حرارة 37°م.

وُضعت كميتان متساويتان من الأساس والمسرّع على لوح مزج، وتم المزج باستخدام سباتول حتى الحصول على مزيج متجانس بلون موحد دون خطوط لونية.

طبقت طبقة رقيقة من الأسمنت الراتنجي على سطح السن المحضّر، ثم وُضع المكعب الخزفي فوقها بتماس مباشر، باستخدام ضغط يدوي ثابت لضمان التوضع الصحيح وتوزع المادة بشكل متساوٍ.

تمت إزالة الفائض الأولي من الأسمنت، ثم أُجري تصليب أولي موضعي tack-curing لمدة 2-3 ثوانٍ لتثبيت موضع القطعة الخزفية، مما سمح بإزالة الفائض المتبقي بسهولة.

أُجري التصلب النهائي من أربع جهات (أمامية، خلفية، جانبية يمين، جانبية يسار) لمدة لا تقل عن 20 ثانية لكل جهة، باستخدام جهاز التصليب الضوئي اللاسلكي.

Dental Wireless LED Curing Light Lamp, 5 W, 2000 mW/cm², China، بشدة إشعاعية تتراوح ما بين 500–1400 mW/cm²، لضمان التصليب الكامل. نُفذت جميع الخطوات في بيئة جافة وخالية من التلوث، مع الالتزام بتوصيات الشركة المصنعة لضمان الأداء الأمثل للارتباط.



شكل 31 مزج الأسمنت الراتنجي

استُعمل جهاز AR Heater لتسخين الراتنج المركب التقليدي وكتلي الملء المدروسين إلى درجة حرارة 69 درجة مئوية لمدة 15 دقيقة. تم استخدام جهاز تسخين الراتنجات المركبة (55W, LED AR Heater (Display, China)، وهو جهاز مصمم خصيصًا لتسخين المواد الترميمية ضمن محقنات بلاستيكية أو معدنية بدرجة حرارة يمكن ضبطها بدقة، مع عرض رقمي عبر شاشة LED لضمان استقرار درجة التسخين. استُخدم الجهاز لتسخين كل من Tetric N-Ceram Bulk-fill و Tetric N-Ceram إلى درجة حرارة ثابتة مقدارها 69°م، لمدة 15 دقيقة قبل تطبيق المواد على الأسنان. يهدف التسخين إلى تحسين لزوجة الراتنج المركب وزيادة سيولته، مما يُسهّل تطبيقه ويُعزز من جودة الإصاق.

الشكل 18. جهاز تسخين الراتنج المركب (AR Heater 55W, Digital Composite Warmer, China) المستخدم في تسخين المواد قبل تطبيقها.

(b) المجموعة الثانية: وضعت دفعة من الراتنج المركب Tetric N Ceram في محقنة خاصة بحيث تكون كافية لإلصاق عينة واحدة. حيث تم تسخين كل دفعة لمرة واحدة على حدى. ثم سُخِّن لمدة 15 دقيقة إلى درجة 69° مئوية وحقنت المادة فور إزالتها من الجهاز التسخين وتم التصليب والإلصاق فوراً. وُضعت دفعة منفصلة من الراتنج المركب (Tetric N-Ceram Ivoclar Vivadent) في محقنة بلاستيكية مخصصة، بحيث تكفي لإلصاق عينة واحدة فقط. تم تسخين كل دفعة بشكل منفرد في جهاز التسخين (AR Heater 55W Digital Composite Warmer, China) إلى درجة حرارة 69°م لمدة 15 دقيقة. تُعرض درجة الحرارة على شاشة الجهاز، ويُعدّ استقرار القراءة (توقف الوميض) إشارة إلى بلوغ درجة الحرارة المطلوبة، ما يضمن جاهزية المادة للتطبيق. وفور إخراج المحقنة من الجهاز، تم حقن المادة مباشرة على سطح السن المحضّر خلال مدة لا تتجاوز 30 ثانية، وأُجري الإلصاق والتصليب الضوئي دون تأخير، وذلك بدرجة حرارة غرفة تقريبية (23 ± 2°م). تم التصليب باستخدام جهاز التصليب الضوئي اللاسلكي (Dental Wireless LED Curing Light Lamp, 5 W, 2000 mW/cm² China) لمدة 30 ثانية لكل سطح من السطوح الأربعة للمكعب الخزفي، مع تقريب رأس الجهاز من السطح دون تماس مباشر.



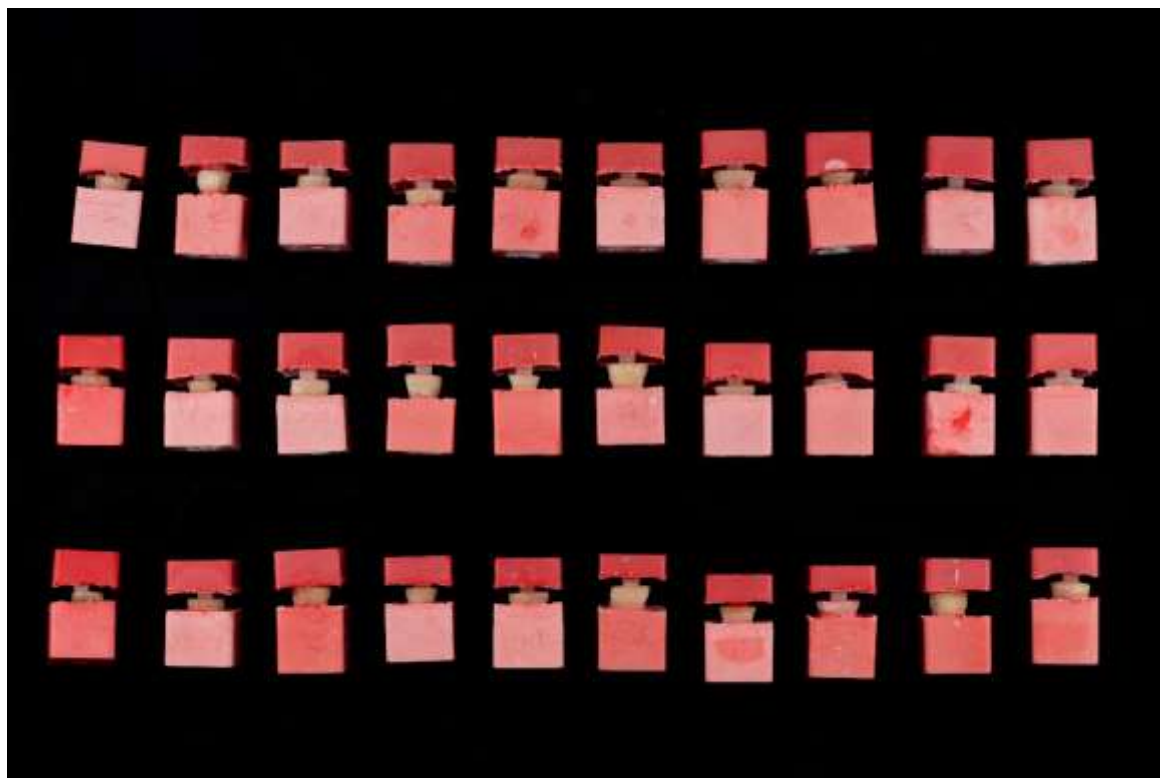
شكل 32 تسخين الراتنج المركب التقليدي

(c) المجموعة الثالثة:

اتُبع البروتوكول ذاته المستخدم في المجموعة الثانية. حيث وُضعت دفعة منفصلة من الراتنج المركب (Tetric N-Ceram Bulk-fill Ivoclar Vivadent, Liechtenstein) في محقنة بلاستيكية مخصصة، وسُخنت إلى درجة حرارة 69°م لمدة 15 دقيقة باستخدام جهاز التسخين. عند استقرار القراءة على شاشة الجهاز، تم إخراج المحقنة وحقن المادة مباشرة على سطح السن المحضّر خلال 30 ثانية، ثم أُجري التصليب الضوئي على الفور في درجة حرارة الغرفة ($23 \pm 2^\circ\text{C}$)، لمدة 30 ثانية لكل سطح من السطوح الأربعة للمكعب الخزفي، مع الحفاظ على قرب رأس الجهاز دون ملامسة السطح. صب المكعبات الخزفية: بعد الانتهاء من إلصاق جميع العينات، صُبت المكعبات الخزفية في قوالب من الراتنج ثم نُقلت إلى سائل تخزين بدرجة حرارة الغرفة $24 \pm 2^\circ\text{C}$. الدورات الحرارية: تُعاد العينات إلى الماء المقطر فور الانتهاء من الإلصاق وتحفظ فيه لمدة 24 ساعة بدرجة حرارة الغرفة. ثم تعرض العينات لـ 1000 دورة حرارية وضع العينات ضمن وعاء ماء بدرجة حرارة 5°C لمدة 60 ثانية ثم تنقل من الماء بفواصل زمني قدره 5 ثوان إلى درجة حرارية 56°C لمدة 60 ثانية.



شكل 3.3. تسخين الأسمنت الراتنجي المركب كتلي الماء



شكل 34 عيّنات البحث

3.5.2 اختبار قوة ارتباط الشد:

اختُبرت قوة ارتباط الشد للعينات بواسطة جهاز اختبار شد Instron 1011 الموجود في هيئة الطاقة الذرية باستخدام الحامل المخصص وبسرعة رأس 1 مم/دقيقة وبحيث تكون جهة تطبيق القوة متعامدة مع سطح الارتباط، واستمر تطبيق القوة حتى حدوث الفشل.



شكل 35 قياس مساحة سطح المكعب الخزفي

○ حساب قوة ارتباط الشد: حُسبت قوة ارتباط الشد باستخدام المعادلة: $\sigma = \frac{F}{A}$ حيث:

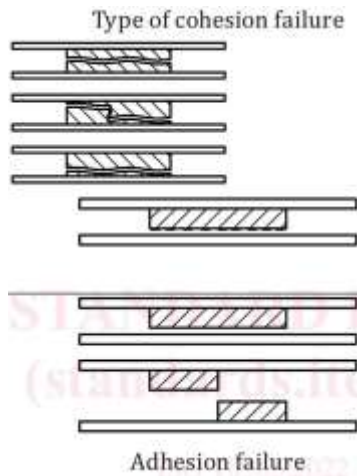
σ : قوة ارتباط الشد معبراً عنها بوحدة ميغا باسكال Mpa

F: لقوة، معبراً عنها بوحدة نيوتن (N)

Ab: مساحة سطح الارتباط، معبراً عنها بوحدة مم² (mm²)

3.5.3 تحديد نمط الفشل

أُجري تقييم نمط الفشل بعد اختبار قوة ارتباط الشد على 7 عينات فقط من كل مجموعة، وذلك نتيجة فقدان بعض العينات (3 عينات من كل مجموعة) قبل الفحص المجهرى، مما حال دون تصنيف نمط الفشل. جرى فحص الأسطح المفصولة لـ 7 عينات من كل مجموعة من قبل مقيّم مدرب لم يكن على علم بتوزيع العينات إلى المجموعات باستخدام مجهر تشريحي من نوع SKT 41322 MEIJI TECHNO. استند تصنيف أنماط الفشل إلى المواصفة القياسية ISO 10365:2022(E). صُنّف الفشل على أنه فشل التصاقى إذا حدث الانفصال عند الواجهة بين الترميم والمادة اللاصقة أو بين المادة اللاصقة ووسط السن، وعلى أنه فشل تماسكي إذا حدث الانفصال ضمن كتلة المادة اللاصقة نفسها. أما الفشل المختلط، فهو يشير إلى حدوث الانفصال جزئياً عند واجهة الإصاق وجزئياً ضمن كتلة المادة اللاصقة مما يعكس تداخلاً بين الفشلين التصاقى والتماسكي في آن واحد.



شكل 36 تحديد أنماط الفشل وفقاً للمواصفة 10365

3.5.4 الدراسة الإحصائية

جُمعت البيانات وسُجّلت على برنامج Excel ومن ثم أُجريت الاختبارات الإحصائية باستخدام برنامج IBM SPSS version 27 استخدمت الاختبارات الإحصائية التالية:

-اختبار كولموغوروف سميروف Kolmogorov-Smirnov: لمعرفة فيما إذا كان توزيع البيانات طبيعياً لتحديد نوع الاختبار الإحصائي الواجب استخدامه. فإذا كانت البيانات تتبع التوزيع الطبيعي يمكن استخدام

الاختبارات المعلمية التي تستلزم توافر هذا الشرط، وإذا كانت البيانات لا تتبع التوزيع الطبيعي فيجب استخدام الاختبارات اللامعلمية.

- اختبار ليفين **Levene's**: لاختبار تجانس التباينات **Tests of Homogeneity of Variances** وتقييم فيما إذا كانت تباينات قوة الارتباط متساوية عبر المجموعات الثلاث.

- اختبار **One way ANOVA**: تحليل التباين: لاختبار فيما إذا كانت هناك فروق ذات دلالة إحصائية بين متوسطات المجموعات الثلاث.

- اختبار فيشر **Fisher's Exact Test**: لتحليل العلاقات بين المتغيرات الفئوية (مادة اللاصاق ونمط الفشل) في العينات.

الباب الرابع: النتائج

Results

4.1 وصف العينة

تألّفت عينة البحث من 30 رحيّ ثلاثة بشرية سليمة، وُزّعت عشوائياً إلى ثلاث مجموعات متساوية وفقاً لمادة الإلصاق المستخدمة في إلصاق المكعبات الخزفية المصنّعة من الخزف الزجاجي المقوى ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم (IPS Emax Press) إلى العاج:

- المجموعة الأولى (n=10): هي المجموعة الشاهدة، استُخدم فيها الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب Variolink N في إلصاق المكعبات الخزفية إلى سطوح الأسنان.
- المجموعة الثانية (n=10): استُخدم فيها الراتنج المركب التقليدي Tetric N Ceram المسخن لدرجة حرارة 69م قبل إلصاق المكعبات الخزفية إلى سطوح الأسنان.
- المجموعة الثالثة (n=10): استُخدم فيها الراتنج المركب كتلي المليء Tetric N Ceram Bulk-fill المسخن لدرجة حرارة 69م في إلصاق المكعبات الخزفية إلى سطوح الأسنان.

جدول 4 مجموعات الدراسة

المجموعة	عدد العينات n	مادة الإلصاق المستخدمة	درجة حرارة مادة الإلصاق
الأولى	10	Variolink N أسمنت راتنجي ثنائي التصلب	درجة حرارة الغرفة 20 درجة مئوية
الثانية	10	Tetric N-Ceram راتنج مركب تقليدي	69 درجة مئوية
الثالثة	10	Tetric N-Ceram Bulk Fill راتنج كتلي الملىء	69 درجة مئوية

4.2 الإحصاء الوصفي Descriptive Statistics

4.2.1 قوة ارتباط الشد

يوضح الجدول الإحصائي التالي القيم الوصفية لثلاث مواد ترميمية مختلفة، وهي: الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب، والراتنج المركب كتلي الملء، والراتنج المركب التقليدي. تم استخدام عشر عينات لكل مجموعة ($N = 10$)، وتم حساب المتوسط الحسابي، والانحراف المعياري، والخطأ المعياري، بالإضافة إلى مجال الثقة 95% للمتوسط، والقيم الدنيا والعليا لكل مجموعة.

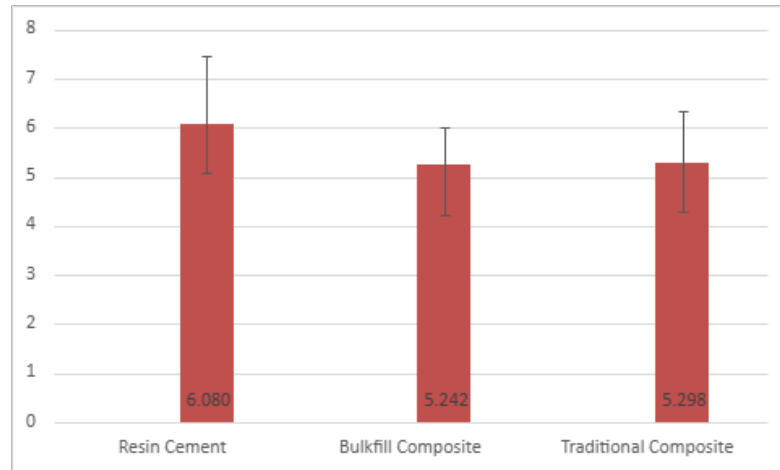
أظهرت النتائج أن الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب سجل أعلى متوسط (6.08 ميغا باسكال) مقارنة بالمادتين الأخريين، إلا أنه كان أيضاً ذو أعلى انحراف معياري (4.33)، مما يدل على تباين كبير في القيم ضمن هذه المجموعة. أما الراتنج المركب كتلي الملء فقد أظهر أقل متوسط (5.24) وأقل انحراف معياري (2.44)، ما يشير إلى تجانس نسبي في القياسات. في حين أن الراتنج المركب التقليدي سجل متوسطاً قريباً (5.29) مع انحراف معياري متوسط (3.3).

من خلال الخطأ المعياري ومجالات الثقة، يمكن ملاحظة أن تقديرات المتوسط كانت أكثر دقة في حالة الراتنج كتلي الملء، بينما كانت أقل دقة في مجموعة الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب. كما أن القيم الدنيا والعليا توضح التوزع العام للبيانات، حيث تراوحت القيم من 0.152 إلى 12.90 في مجموعة الأسمنت، ومن 0.87 إلى 7.81 في مجموعة الراتنج كتلي الملء، ومن 1.51 إلى 10.36 في مجموعة الراتنج التقليدي. يبين الجدول الآتي متوسط قوة ارتباط الشد لمجموعات الدراسة، والانحراف المعياري، والقيم الدنيا والعليا لكل مجموعة:

1

جدول 5 البيانات الوصفية لقوة ارتباط الشد في لمجموعات المدروسة

القيمة العليا max	القيمة الدنيا min	مجال الثقة 95% لمتوسط Confidence interval for the mean		الخطأ المعياري SE	الانحراف المعياري SD	المتوسط mean	عد د N	
		الحد الأعلى Upper bound	الحد الأدنى Lower bound					
12.90	0.152	9.182	2.97	1.37	4.33	6.08	10	الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب
7.81	0.87	6.99	3.49	0.77	2.44	5.24	10	الراتنج المركب كتلي الملء
10.36	1.51	7.66	2.93	1.04	3.3	5.29	10	الراتنج المركب التقليدي



شكل 37 مخطط المتوسط والخط المعياري لقوة ارتباط الشد في مجموعات الدراسة

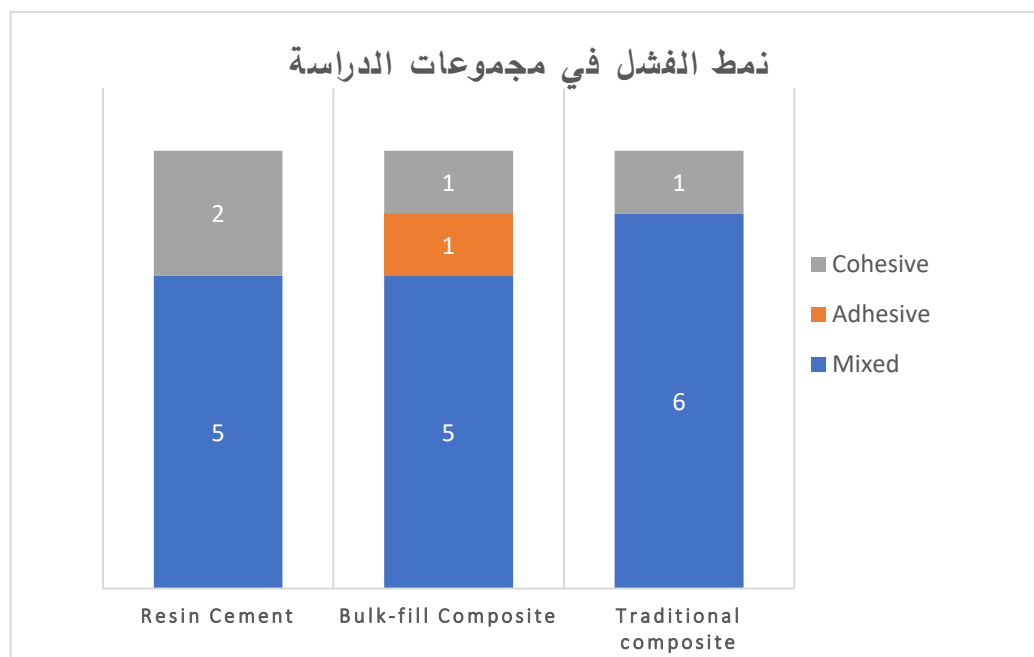
4.2.2 دراسة أنماط الفشل

عند تحليل أنماط الفشل بعد اختبار قوة ارتباط الشد، صُنِفَ الفشل على أنه فشل التصاقي إذا حدث الانفصال عند الواجهة بين الترميم والمادة اللاصقة أو بين المادة اللاصقة وسطح السن، وعلى أنه فشل تماسكي إذا حدث الانفصال ضمن كتلة المادة اللاصقة نفسها. أما الفشل المختلط، فهو يشير إلى حدوث الانفصال جزئياً عند واجهة الإلصاق وجزئياً ضمن كتلة المادة اللاصقة مما يعكس تداخلاً بين الفشلين التصاقي والتماسكي في آن واحد. أظهرت نتائج تحليل أنماط الفشل بعد اختبار قوة الارتباط أن النمط المختلط كان النمط السائد في المجموعات الثلاث.

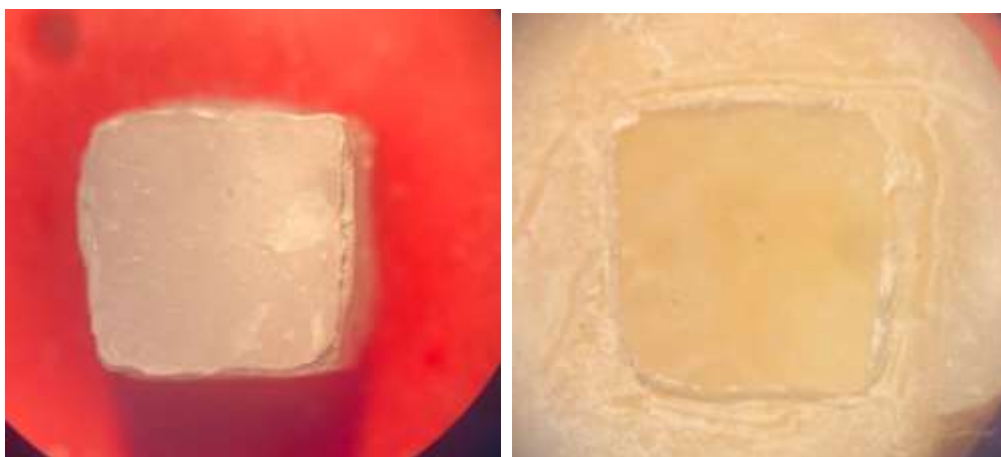
كان الفشل المختلط هو النمط الأكثر شيوعاً في جميع المجموعات، حيث شكّل 71.4% من الفشل في مجموعتي الأسمنت الراتنجي والراتنج الكتلي، وارتفع إلى 85.7% في مجموعة الراتنج التقليدي. سُجِّلَ فشل التصاقي مرة واحدة فقط في مجموعة الراتنج كتلي الملء، بينما لم يُلاحظ في المجموعات الأخرى. كما لوحظ فشل تماسكي بنسب متقاربة في جميع المجموعات، دون نمط واضح للتركيز في نوع مادة معينة.

جدول 6 نمط الفشل في مجموعات الدراسة الثلاث

نمط الفشل	الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب	الراتنج المركب كتلي الملء	الراتنج المركب التقليدي
فشل التصاقي	0 (0%)	1 (14.2%)	0 (0%)
فشل تماسكي	2 (28.6%)	1 (14.2%)	1 (14.2%)
فشل مختلط	5 (71.4%)	5 (71.4%)	6 (85.7%)
المجموع	7 (100%)	7 (100%)	7 (100%)

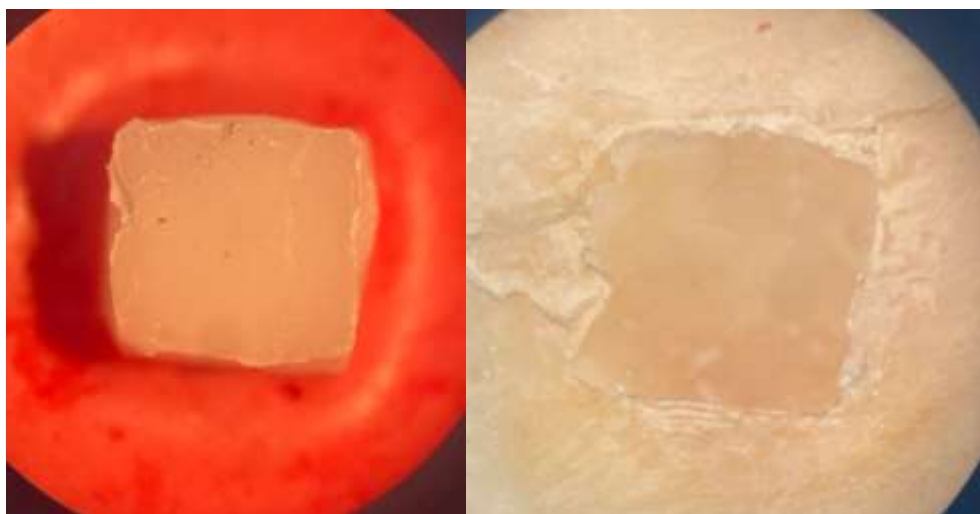


شكل 38 نمط الفشل في مجموعات الدراسة



شكل 39 فشل التصاقي لإحدى عينات مجموعة Bulk-fill

يُلاحظ في هذه العينة نمط فشل التصاقي عند الواجهة بين مادة الإلصاق و سطح العاج، حيث تظهر طبقة المادة اللاصقة كاملة على سطح الخزف، في حين يبدو سطح السن خاليًا تمامًا من أي بقايا لاصقة، مما يشير إلى انفصال كامل عند واجهة العاج.



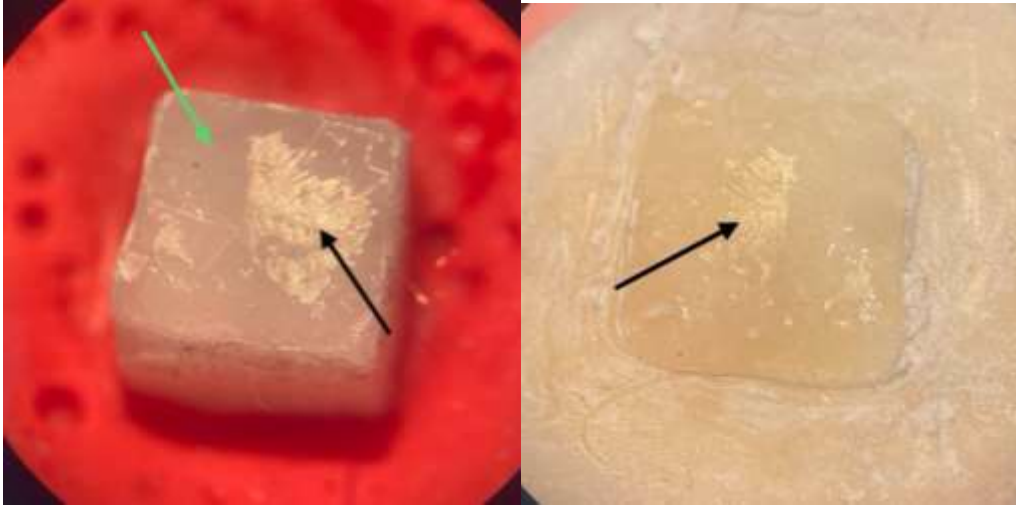
شكل 40 فشل تماسكي لإحدى عينات مجموعة Bulk-fill

يُلاحظ في هذه العينة نمط فشل تماسكي، حيث توجد بقايا من مادة الإلصاق على كل من سطح الخزف و سطح السن، ما يدل على أن الانفصال قد حدث داخل كتلة المادة اللاصقة نفسها، وليس عند حدود الالتصاق مع أي من السطحين.



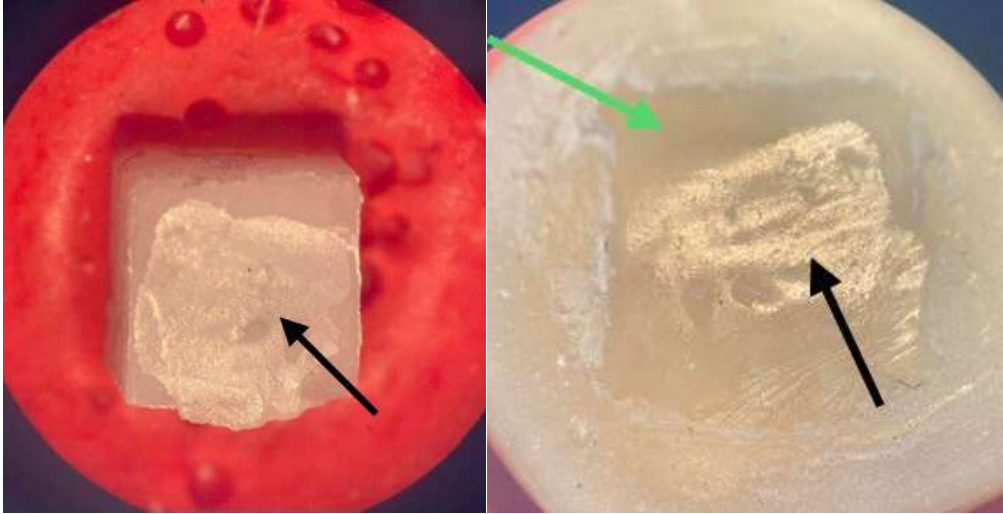
شكل 41 فشل مختلط لإحدى عينات Resin Cement

تظهر هذه العينة فشلا من النوع المختلط إذ يلاحظ حدوث انفصال ضمن طبقة مادة الإلصاق في منطقة من سطح الارتباط فنتج عنها فشل تماسكي، مع وجود فشل التصاقي للجزء للمتبقي من سطح الارتباط إذ حدث فيه فشل التصاق بين الخزف والمادة اللاصقة ويلاحظ وجود المادة اللاصقة على سطح السن. يشير السهم الأسود إلى منطقة الفشل التماسكي داخل طبقة مادة الإلصاق، في حين يدل السهم الأخضر على بقاء طبقة المادة اللاصقة ملتصقة بسطح السن، مما يعكس حدوث فشل التصاق عند واجهتها مع الخزف.



شكل 42 فشل تماسكي لإحدى عينات مجموعة Traditional

تُظهر هذه العينة نمط فشل مختلط، يتمثل في فشل تماسكي ضمن مادة الإلصاق (السهم الأسود)، وفشل التصاق عند الواجهة مع السن، كما يتضح من بقاء المادة اللاصقة على سطح الخزف (السهم الأخضر).



شكل 43 شكل فشل مختلط لإحدى عينات مجموعة Bulk-fill

تُظهر هذه العينة نمط فشل مختلط، حيث يُلاحظ فشل تماسكي ضمن طبقة مادة الإلصاق في جزء من سطح الارتباط (السهم الأسود)، وفشل التصاق في الجزء المتبقي عند الواجهة مع الخزف، كما يتضح من بقاء المادة اللاصقة على سطح السن (السهم الأخضر).

4.3 الإحصاء التحليلي Analytical Statistics

4.3.1 دراسة التوزيع الطبيعي لبيانات عينة البحث

استعمل اختباري (كولموغوروف-سميرنوف وشابيرو-ويلك)؛ لدراسة التوزيع الطبيعي لعينات مجموعات الدراسة. بناءً على اختبارات التوزيع الطبيعي، يُمكننا افتراض أن بيانات المواد الثلاث (الأسمنت الراتنجي، الراتنج المركب كتلي الملء، الراتنج المركب التقليدي) تتبع التوزيع الطبيعي ($p > 0.05$) وبذلك يتحقق شرط التوزيع الطبيعي كأحد الشروط اللازم تحقيقها لاستخدام الاختبارات المعلمية.

جدول 7 اختبار التوزيع الطبيعي للبيانات Test of normality

اختبار التوزيع الطبيعي Test of normality						
شابيرو-ويلك Shapiro-Wilk			كولموغوروف-سميرنوف Kolmogorov-Smirnov			
p -value	DF	Test statistics	p -value	DF	Test statistics	
	درجة الحرية	قيمة الاختبار		درجة الحرية	قيمة الاختبار	
0.711	10	0.954	0.2	10	0.128	الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب
0.065	10	0.854	0.066	10	0.254	الراتنج المركب كتلي الملء
0.155	10	0.887	0.2	10	0.211	الراتنج المركب التقليدي

4.3.2 اختبارات تجانس التباينات:

يُستخدم اختبار ليفين's Levene's لتقييم ما إذا كانت تباينات قوة الارتباط متساوية عبر المجموعات الثلاث. وبما أن القيمة الاحتمالية (0.198) أكبر من قيمة ألفا المرجعية 0.05، فإننا لا نرفض فرضية العدم القائلة بتساوي التباينات. هذا يشير إلى تحقق افتراض تجانس التباينات. بمعنى آخر، لا يختلف تباين قوى الارتباط داخل كل مجموعة بشكل كبير. وبهذا يتحقق الشرط الثاني لاستخدام الاختبارات الإحصائية المعلمية.

جدول 8 اختبار تجانس التباينات Tests of Homogeneity of Variances

Sig p-value	Df2 درجة الحرية 2	df1 درجة الحرية 1	Levine's Statistics اختبار ليفين	
0.198	27	2	1.72	Based on Means بناء على المتوسط
0.267	27	2	1.388	Based on Median بناء على الوسيط
0.268	25.159	2	1.388	Based on Median with adjusted df بناء على الوسيط المعدل
0.197	27	2	1.729	Based on trimmed mean بناء على المتوسط المعدل

4.3.3 تحليل التباين ANOVA:

يختبر تحليل أنوفا وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين متوسطات المجموعات الثلاث. تفترض الفرضية العدمية في اختبار أنوفا أنه لا يوجد فرق ذو دلالة إحصائية بين مجموعات الدراسة. بينما تنص الفرضية البديلة أن هناك فرق ذو دلالة إحصائية بين متوسط مجموعات الثلاثة. وبما أن قيمة الاحتمال $p=0.833$ أكبر من القيمة المرجعية ألفا 0.05، فإنه نقبل فرضية العدم القائلة بتساوي متوسطات المجموعات الثلاث وهذا يعني عدم وجود فرق ذو دلالة إحصائية في قوة الارتباط بين الأسمنت الراتنجي، الراتنج المركب كتلي الملء، الراتنج المركب التقليدي.

جدول 9 اختبار تحليل التباين ANOVA

Sig p-value	F	Mean square متوسط المربعات	Df درجة الحرية	Sum of squares مجموع المربعات	
0.833	0.184	2.197	2	4.393	Between groups بين المجموعات
		11.907	27	321.496	Within groups ضمن المجموعات

4.3.4 التحليل الإحصائي لنمط الفشل حسب نوع الأسمنت

أُجري اختبار فيشر Fisher's Exact Test لدراسة العلاقة بين نوع مادة الإلصاق ونمط الفشل (فشل التصاق أو فشل تماسكي أو فشل مختلط) على عينة مكونة من 21 سنًا، قُسمت بالتساوي على مجموعات الدراسة (7 أسنان لكل نوع). تم استخدام اختبار فيشر Fisher's Exact Test لكون العينة صغيرة (21 سنًا) ووجود تكرارات صغيرة (أقل من 5 عينات) في بعض الحالات، مما يجعل اختبار كاي-مربع Chi-square test غير مناسب. يتميز اختبار فيشر بدقته في تحليل العلاقات بين المتغيرات الفئوية في العينات الصغيرة. ولم يُظهر التحليل فرقًا جوهريًا من الناحية الإحصائية ($p > 0.05$)، مما يشير إلى تشابه أنماط الفشل بين المجموعات المختلفة.

جدول 10 اختبار فيشر Fisher Exact Test

p-value	Value قيمة اختبار فيشر	
0.054	8.321	Fisher-Freeman-Halton Exact Test اختبار فيشر

4.4 الملخص والاستنتاج:

تشير نتائج تحليل التباين أحادي الاتجاه ANOVA إلى عدم وجود فرق ذي دلالة إحصائية في قوة الارتباط بين المواد الإلصاق الثلاث (الأسمنت الراتنجي، الراتنج المركب كتلي الملى، الراتنج المركب التقليدي). تبلغ القيمة الاحتمالية $p=0.833$ ، وهي أكبر من مستوى ألفا المرجعي 0.05، وبناءً على هذه النتائج، لا يمكن رفض فرضية عدم القائل بأن متوسطات العينات لقوة الارتباط متساوية بين أنواع مواد الإلصاق الثلاث. كما تشير نتائج تحليل أنماط الفشل إلى أن مادة الإلصاق قد تؤثر على نوع الفشل، مع ميل للفشل المختلط في جميع المواد، خاصةً في الراتنج التقليدي، ما قد يعكس خصائصه التركيبية أو طريقة تطبيقه؛ إذ أن الفرق الإحصائي لم يكن دالًا بشكل قاطع، والقيمة القريبة من الدلالة ($p = 0.054$) تدعو إلى مزيد من البحث بدراسات ذات حجم عينة أكبر لتأكيد هذه الملاحظات.

الباب الخامس: المناقشة

Discussion

5.1 مناقشة فكرة البحث وهدفه

شهدت المواد الخزفية تطوراً ملحوظاً في العقود الأخيرة، سواء من حيث الخصائص الجمالية أو الخصائص الميكانيكية، مما جعلها خياراً شائعاً وفعالاً في ترميم النسيج السنية المفقودة من خلال الترميمات غير المباشرة. إلا أن نجاح هذه الترميمات على المدى البعيد يعتمد بشكل أساسي على فعالية نظام الإلصاق المستخدم، ولا سيما من حيث قدرته على تأمين ارتباط متين ومستقر بين الترميم الخزفي والبنية السنية. ويتطلب هذا النظام أن يتمتع بمقاومة عالية للتدهور داخل البيئة الفموية، وأن يكون قادراً على مقاومة التلون والتسرب المجهري، لما لذلك من تأثير مباشر في الوقاية من النخور الثانوية وفشل الترميمات مع مرور الزمن.

(Arrais et al., 2008; Peumans et al., 2005)

رغم أن الأسمنتات الراتنجية ثنائية التصلب قد طُوِّرت خصيصاً لهذا الاستخدام، إلا أنها لا تخلو من بعض المحدوديات، خصوصاً ما يتعلق بلزوجتها المنخفضة الناجمة عن قلة نسبة المواد المائلة فيها، الأمر الذي يزيد من ميلها للتقلص التصليبي وبالتالي يرفع من خطر حدوث التسرب الحفافي والنخور الثانوية. كما أن احتواءها على مونوميرات محبة للماء مثل HEMA يجعلها أكثر عرضة للانحلال داخل الفم مع مرور الوقت.

(Pallesen & Qvist, 2003)

في ظل هذه التحديات، برزت الحاجة إلى استكشاف بدائل جديدة ذات أداء ميكانيكي أعلى وثبات كيميائي أفضل. ومن بين المقترحات المثيرة للاهتمام في هذا المجال استخدام الراتنجات المركبة، والتي تتميز بخصائص ميكانيكية محسّنة، ونسبة تقلص تصليبي أقل، ومقاومة أعلى للانحلال. وقد أظهرت الأبحاث أن تسخين الراتنج المركب يخفض لزوجه بشكل كبير ويزيد انسيابيته، مما يسهل استخدامه كمادة إلصاق دون التأثير على خصائصه بعد التصلب، مما شجّع على دراسة إمكانية استخدامه في تثبيت الترميمات غير المباشرة.

(Poubel et al., 2024)

غير أن استخدام الراتنج المركب التقليدي يواجه قيداً رئيسياً يتمثل في كونه ضوئي التصلب، وهو ما يحد من فاعليته عند استخدامه تحت ترميمات واسعة السطح أو ذات سماكة مرتفعة أو بنية كثيفة تعيق مرور الضوء، مما قد يؤدي إلى تصلب غير كافٍ وخصائص ميكانيكية متدنية للطبقة اللاصقة. ولتجاوز هذه المعضلة، تم التفكير في استخدام أنواع من الراتنج المركب مصممة بتركيبية خاصة تسمح بتصلب ضوئي فعال في أعماق أكبر، وهي الراتنجات المركبة كتلية الملء bulk-fill composites. فبفضل محتواها المنخفض من المواد المائلة، تسمح هذه المواد بمرور الضوء إلى أعماق أكبر، ما يتيح لها تحقيق تصلب أفضل تحت الترميمات العامة (A. F. Reis et al., 2017).

وعند مراجعة الأدبيات، لوحظ غياب دراسات تجريبية اختبرت فعالية الراتنج المركب كتلي الملء بعد التسخين في إلصاق الترميمات الخزفية غير المباشرة، إذ انحصرت معظم الأبحاث في استخدامه كمادة ترميم مباشر. ومن هنا، نشأت الحاجة لإجراء هذه الدراسة لتقييم أداء هذا النوع من الراتنج كمادة إلصاق مقارنة بالراتنج المركب التقليدي والأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب، بعد إخضاع جميع المواد للتسخين، بهدف الوقوف على مدى إمكانية استخدامه كبديل فعال في هذا السياق.

وقد تم اختيار قوة ارتباط الشد كمؤشر رئيسي في هذه الدراسة، كونها تمثل أحد أبرز المعايير المستخدمة لتقييم كفاءة المواد اللاصقة، وتعكس قدرتها على تأمين ارتباط ميكانيكي وكيميائي فعال بين سطح السن والترميم. (Armstrong et al., 2017)

5.2 مناقشة مواد البحث وطرائقه

5.2.1 مناقشة المواد المستخدمة

تم اختيار المواد المستخدمة في هذه الدراسة بعناية لتقييم فعالية بدائل جديدة في مجال إلصاق الترميمات الخزفية غير المباشرة، وذلك في ظل التحديات السريرية المرتبطة باستخدام الأسمنتات الراتنجية ثنائية التصلب. فقد اختير الأسمنت الراتنجي Variolink N باعتباره من المواد المعتمدة سريرياً والتي تُعد معياراً ذهبياً في إلصاق الترميمات الخزفية بفضل خواصه الميكانيكية العالية وقوة ارتباطه العالية. ومع ذلك، فهو لا يخلو من قيود تتعلق بتعقيد خطوات التطبيق وحساسيته للرطوبة، واحتمالية تدهوره بمرور الزمن (Heboyan et al., 2023). وفي المقابل، سعت الدراسة إلى استكشاف الراتنجات المركبة المُسخنة كمادة بديلة للإلصاق، نظراً لما أظهرته من مزايا سريرية واعدة، مثل زيادة سيولتها عند التسخين، وتحسن تغلغلها في الأسطح المُحصّرة، مما قد يساهم في تعزيز قوة ارتباط الشد وتقليل تعقيدات العمل السريري. لذلك، تم استخدام كل من Tetric N-Ceram وTetric N-Ceram Bulk-fill لتمثيل فئتين من المواد الراتنجية: التقليدية وكتلية الملء، على التوالي، وذلك لدراسة تأثير بنية المادة على نتائج الإلصاق.

ويُعد استخدام مواد الBulk Fill، مثلTetric N-Ceram Bulk Fill، خياراً استراتيجياً في حالات الترميمات واسعة السطح أو عندما تكون نفوذية الترميمات الخزفية للضوء منخفضة، إذ تتيح هذه المواد التصلب الفعّال حتى عمق 4 مم، مما يجعلها ملائمة للترميمات السريرية المعقدة (Van Ende et al., 2017). كما استخدمت مواد مساعدة من نفس الشركة المصنعة لضمان التوافق الكيميائي ضمن النظام اللاصق، بما في ذلكTetric N-Bond Universal كمادة رابطة شاملة، وMonobond N كمادة مخصصة لتهيئة سطح الترميم الخزفي، مما يعزز من موثوقية بروتوكول الإلصاق الموحد المطبق في كل المجموعات.

تُستخدم المواد المختارة في هذه الدراسة على نطاق واسع في الأدبيات العلمية المتعلقة بالإصاق الترميمات غير المباشرة. فقد استُخدم Variolink N بشكل متكرر في الدراسات التي تقارن بين أنواع مختلفة من الأسمنتات الراتنجية نظر لخصائصه اللاصقة الموثوقة . وبالمثل، فإن Tetric N-Ceram ظهر في عدة أبحاث تناولت تقييم أداء الراتنجات المركبة المُسخنة، حيث تم الإشارة إلى تأثير التسخين على تحسين خواص التطبيق وقوة الارتباط (Uribe-Hernández et al., 2024). كما أن اختيار المواد الرابطة والمهيئة، مثل Tetric N و Bond Universal و Monobond N، يعكس التوجّه نحو استخدام أنظمة متكاملة ومطابقة من حيث المنشأ لضمان التوافق الكيميائي، وهو نهج شائع في الدراسات الحديثة لتحسين موثوقية النتائج.

5.2.2 مناقشة تصميم التجربة

صُممت هذه الدراسة كدراسة مخبرية بهدف مقارنة قوة ارتباط الشد بين ثلاثة أنواع من مواد الإصاق المستخدمة لتثبيت الترميمات الخزفية غير المباشرة: الأسمنت الراتنجي التقليدي Variolink N والراتنج المركب المُسخن Tetric N-Ceram Bulk Fill و Tetric N-Ceram. وقد تم اعتماد تصميم تجريبي مقارن قائم على تقسيم العينات إلى ثلاث مجموعات رئيسية.

يُعتبر هذا التصميم مناسباً تماماً للإجابة على سؤال البحث، لأنه يوفر ظروفاً محكمة لمقارنة المواد تحت شروط موحدة، ما يعزز من الضبط التجريبي ويقلل من تداخل المتغيرات الخارجية. ومن نقاط القوة في هذا التصميم أيضاً أنه يتيح التقييم الكمي الموضوعي لقوة الارتباط باستخدام جهاز اختبار الشد، مما يمنح الدراسة نتائج قابلة للمقارنة والتكرار.

ورغم ما يتمتع به التصميم من قوة ووضوح، إلا أن كونه دراسة مخبرية قد يحد من تعميم النتائج مباشرة على الممارسة السريرية، نظراً لاختلاف الظروف الواقعية داخل الفم من حيث الرطوبة، ودرجة الحرارة، وقوى المضغ المتكررة. كما أن اختيار مواد من شركة واحدة Ivoclar Vivadent رغم كونه مفيداً لضمان التوافق الكيميائي، إلا أنه قد يشكل نوعاً من الانحياز في اختيار المواد. ومع ذلك، فإن هذا القرار يخدم غرض الدراسة الأساسي في اختبار تأثير نوع المادة وليس مصدرها، مما جعل القيود مقبولة ضمن الإطار العلمي للدراسة.

حُسب حجم العينة باستخدام برنامج G*Power 3.1 لحساب حجم العينة المناسب لهذه الدراسة، مما يُعد خطوة مهمة لضمان قوة إحصائية كافية للكشف عن الفروق بين المجموعات.

أما بالنسبة لعينة الأسنان فقد اختيرت 30 سناً بشرية (رحى ثالثة) للمشاركة في الدراسة، وتُعتبر هذه الأسنان مناسبة لدراسة قوة الارتباط نظراً لكونها أسناناً سليمة، خالية من النخور والترميمات، ومعزولة عن أي ضرر

مثل الكسور أو التصدعات. كما قمنا بالتأكد من أن الأسنان لم تُقلع منذ أكثر من 6 أشهر، مما يضمن أن الأسنان قد حافظت على خصائصها الميكانيكية والبيولوجية دون تأثر كبير. إن استخدام أسنان بشرية يعكس وضعاً قريباً من الواقع السريري، ولكن ينبغي أخذ الحيطة عند تعميم النتائج على حالات أخرى أو أنواع مختلفة من الأسنان. في ممارسات طب الأسنان السريرية، تختلف الظروف المحيطية مثل الرطوبة ودرجات الحرارة بشكل كبير عن الظروف المخبرية، وهو ما قد يحد من قدرة الدراسة على محاكاة الواقع السريري بشكل دقيق.

وُزعت الأسنان عشوائياً إلى ثلاث مجموعات مختلفة، تمثل كل منها مادة إلصاق مختلفة. يُعدّ هذا التوزيع العشوائي خطوة مهمة لضمان العدالة في مقارنة المواد المختلفة. لكن، في المستقبل، يمكن النظر في توزيع أكبر أو عينات متنوعة أكثر تمثل فئات مختلفة من الأسنان لتحديد تأثير العوامل البيئية أو البيولوجية الأخرى على نتائج الدراسة.

5.2.3 مناقشة طريقة العمل

نُفذت منهجية البحث وفقاً لمعايير المواصفة القياسية الدولية ISO/TS 4640:2023 المعنونة بـ *Dentistry — Test methods for tensile bond strength to tooth structure*، حيث جرى الالتزام الدقيق بكافة التعليمات والإجراءات المحددة فيها لضمان موثوقية وقياسية نتائج اختبار قوة ارتباط الشد إلى النسيج السنية.

I. تحضير العينات:

تم اختيار ثلاثين سناً من الأرحاء الثالثة البشرية، ضمن معايير اختيار صارمة لضمان تجانس العينات، وهو ما يُوصى به في الدراسات المخبرية لضمان الاتساق الإحصائي. تم تخزين الأسنان في ماء مقطر بدرجة 4°م بما يتوافق مع المواصفة، مع تغيير الوسط دورياً شهرياً للحفاظ على الخصائص الميكانيكية والبيولوجية للأنسجة السنية، وهي ممارسة موثقة لضمان الحد الأدنى من التغيرات في سلوك المواد الحيوية أثناء التخزين.

II. تثبيت وتحضير الأسنان

استخدم قالب راتنجي منخفض الثقلص للتحكم الدقيق بموضع التحضير وزاويته. وقد تم الالتزام بعدم تجاوز حرارة التصلب 40°م، إذ تشير الدراسات إلى أن تجاوز هذه العتبة الحرارية قد يؤدي إلى تلف في بنية العاج أو تغيرات في خصائصه. كما تم تجنب جفاف الأسنان، نظراً لتأثيره المباشر على خصائص الربط، حيث أن التجفيف الزائد قد يؤدي إلى انكماش الكولاجين العاجي وفقدان البنية المثالية للارتباط (Pashley, 1990)

رغم الالتزام بتطبيق ضغط يدوي ثابت قدر الإمكان أثناء تثبيت المكعبات الخزفية على سطح العاج، إلا أن هذه الطريقة تبقى عرضة لقدر من التفاوت بين العينات، نظراً لصعوبة ضبط قوة الضغط وتكرارها بدقة دون استخدام أدوات قياسية. ومع ذلك، فإن استخدام الضغط اليدوي يُعد مقبولاً في العديد من الدراسات المخبرية المشابهة، خاصة إذا ما تم بقدر عالٍ من الاتساق والسرعة في التطبيق، وهو ما تم تحقيقه في هذه الدراسة، حيث تولّى نفس الباحث جميع إجراءات الإلصاق، ما يقلل من احتمالية التباين بين العينات. كما أن هذه الطريقة تعكس إلى حدٍّ ما محاكاة للوضع السريري، إذ غالباً ما يُطبّق الضغط يدوياً في الممارسة العملية. ومع ذلك، يُعد ذلك أحد القيود المنهجية للدراسة، ويُنصح في الأبحاث المستقبلية باعتماد طرق أكثر ضبطاً، كاستخدام أوزان معيارية موحّدة أو أجهزة خاصة لضبط مقدار القوة وزمن تطبيقها، بما يضمن تقييماً أعلى ويحد من أثر هذا العامل على النتائج.

III. تهيئة سطح العاج

تم تحضير طبقة لطاخة باستخدام ورق سحل P600 التزاماً بما ورد في المواصفة القياسية. تكمن أهمية هذا الإجراء في ضمان توحيد ظروف السطح بين العينات، ما يتيح تقييماً دقيقاً لقوة ارتباط الشد. تلا ذلك تخريش حمضي باستخدام حمض الفوسفور 37%، وفق بروتوكول التخريش الكلي، وذلك بهدف إزالة طبقة اللطاخة وفتح القنّيات العاجية، مما يسهّل اختراق المواد الرابطة وتكوين ارتباط ميكانيكي مجهري فعال. يؤدي هذا التخريش إلى إزالة طبقة الكالسيوم السطحية وكشف شبكة الكولاجين، مما يسمح بتغلغل المونومرات الرابطة وتشكيل طبقة هجينة وأوتاد راتنجية وهذ المرحلة ضرورية لتحقيق قوة ارتباط مستقرة وطويلة الأمد إلى النسيج السنية (Van Meerbeek et al., 2005). جرى تطبيق التخريش لمدة 10-15 ثانية حسب ما توصي به الشركات المصنعة ووفقاً لأبحاث تؤكد أن هذه المدة الزمنية كافية لتشكيل شبكة كولاجينية مستقرة دون التسبب بتلف سطحي (Van Landuyt et al., 2010).

IV. تطبيق المادة الرابطة

استُخدم Tetric N-Bond Universal بطريقة الفك لمدة 20 ثانية، وهي خطوة أظهرت الدراسات فعاليتها في تعزيز التداخل الميكانيكي وعمق الاختراق داخل العاج المحضر (Perdigão et al., 2007). تم التصليب الضوئي باستخدام جهاز ضوئي بقدرة بين 500-1400 mW/cm²، وهي قيمة ضمن النطاق الموصى به لضمان تماثر فعال (Arrais et al., 2008).

V. تهيئة المكعبات الخزفية

خُرشت المكعبات الخزفية بحمض فلور الماء 10% لمدة دقيقة واحدة، وهو ما تدعمه دراسات متعددة كطريقة فعالة لإنشاء خشونة مجهرية على سطح الخزف تعزز الالتصاق (Özcan et al., 2017). تلا ذلك تطبيق Monobond، وهو برايمر سيلاني يعمل على تحسين الترابط الكيميائي بين الخزف والمادة اللاصقة، وترك لمدة 60 ثانية حسب توصيات الشركة المصنعة ودراسات داعمة لفعالية السيلان (Özcan et al., 2017).

VI. إجراءات الإلصاق وتقسيم المجموعات

تم تقسيم العينات إلى ثلاث مجموعات لاختبار متغير التسخين كمؤثر رئيسي على قوة الارتباط. وقد ثبت في دراسات سابقة أن التسخين المسبق للراتنج المركب إلى حوالي 60-70°م يقلل لزوجه ويحسن التدفق والانسيابية دون التأثير السلبي على خواصه البنيوية (Daronch et al., 2005). استخدم جهاز AR Heater لتحقيق تسخين منظم، وهي أداة موثوقة لضبط حرارة المواد الراتنجية في الإعدادات السريرية والمخبرية.

VII. الدورات الحرارية

أُخضعت العينات إلى 1000 دورة حرارية بين 5°م و56°م، وهي بروتوكولات شائعة الاستخدام لمحاكاة التغيرات الحرارية الفموية اليومية، بناءً على توصيات ISO TS 11405. يُعتبر التعرض للدورات الحرارية مؤشراً هاماً على استقرار المادة اللاصقة في بيئة سريرية متغيرة (Gale & Darvell, 1999).

VIII. اختبار قوة ارتباط الشد

على الرغم من أن العديد من الدراسات الحديثة تفضل استخدام اختبار الشد المجهرى نظراً لدقته العالية وقدرته على تقليل تباين النتائج، فقد تم في هذه الدراسة اعتماد اختبار الشد الكبير، وذلك لعدة أسباب منهجية وسريرية. أولاً، إن هذا النوع من الاختبارات يُحاكي بشكل أقرب الواقع السريري، من حيث مساحة سطح الإلصاق، حيث تكون المناطق المرتبطة أكبر، كما هو الحال في الترميمات غير المباشرة. ثانياً، لا يتطلب اختبار الشد الكبير تقطيع العينات إلى شرائح صغيرة، مما يقلل من احتمالية حدوث تشققات أو فشل سابق لأوانه نتيجة تحضير العينة، وهي مشكلة شائعة في اختبار الشد المجهرى. كما أن هذا النوع من الاختبارات يُمكن من تقييم أداء مادة الإلصاق ضمن ظروف إجهاد أشبه بتلك التي تتعرض لها الترميمات السنّية خلال الوظيفة الفموية. ورغم أن القيم الناتجة عن اختبار الشد الكبير قد تكون أقلّ عموماً من القيم المقاسة باستخدام اختبار الشد المجهرى، لأن احتمالية وجود عيوب داخلية في مناطق الإلصاق يكون أكبر، فإن هذه النتائج تظل أكثر تمثيلاً للتحديات السريرية الحقيقية المرتبطة بارتباط الترميمات بالنسج السنّية.

تم القياس باستخدام جهاز Instron 1011 بسرعة 1 مم/دقيقة وزاوية تطبيق متعامدة، بما يتوافق مع الإجراء القياسي لقياس قوة الالتصاق في الأبحاث السنية. استخدام المعادلة $\sigma = F/A$ لحساب الشد موثق في الأدبيات العلمية كطريقة دقيقة لمقارنة أداء المواد اللاصقة (ISO, 2023).

سهولة إعادة تطبيق الطريقة Reproducibility

تتميز المنهجية المتبعة في هذه الدراسة بدرجة عالية من التوثيق والتفصيل، مما يسهم في تعزيز قابلية إعادة التطبيق في الدراسات المستقبلية. فقد تم وصف كل خطوة من خطوات العمل بدقة، بدءاً من طريقة اختيار العينة وتوزيعها العشوائي، مروراً بتحضير الأسنان والمكعبات الخزفية وتحديد أبعادها وطريقة تثبيتها، وصولاً إلى بروتوكولات الإلصاق وتفاصيل التسخين ودرجة الحرارة، وعدد الدورات الحرارية، وأخيراً الاختبار الميكانيكي لقوة الشد. هذا التوثيق المفصل يُعد أمراً أساسياً في الأبحاث المخبرية ويزيد من موثوقية النتائج، حيث يُمكن للباحثين الآخرين إعادة تطبيق الدراسة ضمن شروط مماثلة ومقارنة نتائجهم بنتائج الدراسة الحالية.

ومع ذلك، لا تخلو الطريقة من بعض التحديات التي قد تؤثر على سهولة التكرار، أبرزها تطبيق المادة اللاصقة، وهي خطوات قد تختلف قليلاً باختلاف مهارة الباحث وظروف التطبيق، مما قد يُدخل بعض التباين في النتائج. يُعد الحفاظ على سرعة العمل أحد التحديات الأساسية عند استخدام الراتنج المركب المسخن في إجراءات الإلصاق، وذلك لضمان تطبيقه وتصلبه الضوئي قبل أن يفقد حرارته وتخفض لزوجته. فارتفاع درجة حرارة المادة يسرع من تدفقها ويحسن قابليتها للتكيف مع سطح السن، إلا أن هذا التأثير مؤقت ويعتمد على المحافظة على حرارة المادة ضمن النطاق الفعال. وعليه، يتطلب هذا البروتوكول تنسيقاً دقيقاً بين تسخين المادة وتطبيقها وتصلبها، لتجنب أي تأثير سلبي محتمل على كفاءة الإلصاق أو خصائص التصلب النهائية.

كما أن استخدام المواد الراتنجية المسخنة إلى درجة حرارة دقيقة (69°م) يتطلب معدات خاصة مثل جهاز AR Heater ما قد لا يتوفر في كل المختبرات بسهولة. ومع ذلك، فإن اعتماد مواد متوفرة تجارياً من مصدر واحد (Ivoclar Vivadent)، واستخدام أنظمة لاصقة متكاملة، والاعتماد على أجهزة قياس معيارية، كلها عوامل تدعم إمكانية تكرار التجربة. وعليه، يمكن القول إن قابلية إعادة تطبيق الطريقة عالية عموماً، خاصة في البيئات البحثية التي تمتلك التجهيزات والخبرة المخبرية اللازمة، رغم الحاجة إلى الانتباه لبعض الخطوات الدقيقة التي تتطلب مستوى من المهارة والتوحيد التجريبي لضمان نتائج مماثلة.

5.3 مناقشة نتائج البحث

بلغ متوسط قوة ارتباط الشد للأسمنت الراتنجي Variolink N قيمة 6.08 ميغاباسكال، في حين كانت لقيم الراتنج المركب المسخن من نوع Tetric N-Ceram Bulkfill و Tetric N-Ceram على التوالي 5.29

و5.24 ميغاباسكال. ولم تُسجل فروق ذات دلالة إحصائية بين المواد الثلاث، مما يؤدي إلى قبول فرضية العدم القائلة بعدم وجود فروق جوهرية في قوة ارتباط الشد بين هذه المواد عند إلصاق الخزف الزجاجي المملوء ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم إلى العاج. وبالرغم من أن الراتنج المركب المسخن - بنوعيه التقليدي وكتلي الملء - لم يتفوق في قوة الارتباط على الأسمنت الراتنجي، إلا أنه أظهر أداءً مقبولاً وقوياً مماثلاً لقيم قوة ارتباط الأسمنت الراتنجي في إطار هذه الدراسة المخبرية.

عند محاولة تفسير نتائج الدراسة، من المهم تحليل واجهة الإلصاق المعقدة التي تتشكل بين بنية السن الطبيعية والترميم غير المباشر. إذ يتطلب ذلك فهماً دقيقاً لسلوك الراتنج المركب المسخن بنوعيه التقليدي وكتلي الملء والأسمنت الراتنجي، مع كلا السطحين المكونين لهذه الواجهة: السطح العاجي الذي تم تحضيره وتغطيته بطبقة من المادة الرابطة، والسطح الداخلي للترميم الخزفي المعالج بمادة السيلان. وانطلاقاً من ذلك، يُستعرض أولاً التفاعل الحاصل بين مادة الإلصاق وسطح المادة الرابطة المطبقة على العاج والمصلبة ضوئياً. تعطي المادة الرابطة المطبقة على العاج سطحاً أملساً بعد التصليب (Nakabayashi et al., 1982)، ويجعل ذلك الخواص الفيزيائية والكيميائية لمادة الإلصاق، مثل اللزوجة، والانسيابية، وقدرة ترطيب السطح، أهمية حاسمة في تحديد جودة الارتباط الميكانيكي والكيميائي في هذه المنطقة من واجهة الإلصاق.

تشير الأدبيات إلى أن قدرة ترطيب السطح surface wettability تُعد العامل الأكثر أهمية مقارنة باللزوجة وحدها، حيث أنها تعكس قدرة المادة على الانتشار والتلامس مع الركيزة، وهو أمر حاسم لتحقيق ارتباط متين (Van Meerbeek et al., 2011). وأظهرت الدراسات أن المواد المصلبة ضوئياً تمتاز بترطيب أعلى وزوايا تماس أقل مقارنة بالمواد ثنائية التصلب (Arrais et al., 2008). ويُعزى ذلك إلى التحكم الأفضل في عملية التصلب الضوئي، التي تتيح تكوين شبكة بوليمرية سطحية أكثر انتظاماً وانسيابية، مما يقلل من التوتر السطحي ويعزز الترطيب. بالمقابل، قد يعاني التصلب الكيميائي الذاتي في المواد ثنائية التصلب من عدم انتظام في الطبقة السطحية، مما يؤدي إلى سطح أكثر خشونة وزاوية تماس أكبر. كما أن تركيبة هذه المواد غالباً ما تشمل إضافات تزيد اللزوجة لتسهيل التصلب الكيميائي، وهو ما يؤثر بدوره على السطح النهائي. قد تساهم هذه النتيجة بتفسير تساوي قوة الارتباط بين الراتنج المركب المسخن ضوئياً والتصلب والأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب.

مع ذلك، لا يمكن تعميم هذه النتائج على مواد الدراسة بشكل مباشر، إذ يختلف الراتنج المركب المسخن التقليدي وكتلي الملء عن الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب من حيث التركيب الكيميائي واللزوجة. ورغم أن اللزوجة تؤثر على سلوك تدفق المادة، إلا أنها ليست معياراً كافياً لتقييم قدرة الترطيب السطحي. فالترطيب يعتمد على

عوامل متعددة منها التوتر السطحي للمادة والطاقة السطحية للركيزة والتوافق الكيميائي بينهما، مما قد يجعل مادة منخفضة اللزوجة ذات قدرة ضعيفة على الترتيب إذا كانت غير متوافقة كيميائياً، والعكس صحيح. لذلك، يُفضل الاعتماد على قياسات زاوية التماس المباشرة لتقييم الترتيب بدلاً من اللزوجة فقط.

بعد استعراض آلية التفاعل بين مواد الإلصاق وسطح العاج، يجدر الانتقال إلى تحليل التفاعل الحاصل مع سطح الترميم الخزفي المهيأ بواسطة حمض فلور الماء وعامل السيلان. عند تفسير سلوك المواد المستخدمة في هذه الدراسة مع سطح الترميم الخزفي المصنَّع من الخزف الزجاجي المملوء بثنائي سيليكات الليثيوم (IPS e.max Press)، لا بدّ من التطرق إلى طبيعة هذا السطح بعد تهيئته بحمض فلور الماء (تركيز 10% لمدة 60 ثانية) ومن ثم تطبيق عامل السيلان. يُنتج التخریش الحمضي شبكة من المسامات المجهرية الدقيقة على سطح الخزف، تسمح بحدوث ارتباط ميكانيكي مجهري micromechanical interlocking، في حين يُتيح تطبيق السيلان تشكّل روابط كيميائية تساهم في تعزيز الالتصاق. ويحدث هذا الارتباط الكيميائي من خلال التفاعل الثنائي لجزيء السيلان، حيث يتفاعل الطرف غير العضوي لجزيء السيلان، وهو الطرف السيلياني $(-\text{Si}-\text{OEt})$ ، مع مجموعات الهيدروكسيل $(-\text{OH})$ الموجودة على سطح الخزف، والتي تُعدّ جزءاً من تركيبة السيليكا في الخزف الزجاجي، مكوناً روابط سيليكوسانية قوية $(-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-)$. أما الطرف العضوي للسيلان، الذي يحمل مجموعة الميثاكريلات $(-\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COO}-)$ ، فيتفاعل مع سلاسل الراتنج العضوي الموجودة في مادة الإلصاق الراتنجية مثل Bis-GMA أو UDMA، مما يُتيح تكوين شبكة بوليميرية متماسكة بين السيلان ومادة الإلصاق عند التصليب الضوئي. مما يؤدي إلى تكوين شبكة متماسكة تدمج بين السطح غير العضوي للخزف والمادة العضوية الراتنجية. وتعتمد فاعلية الارتباط في هذا السياق على قدرة مادة الإلصاق على التغلغل ضمن هذه المسامات وملء التعرجات السطحية، مما يتطلب مستوى عالٍ من الانسيابية والترطيب. وبالرغم من أن الراتنج المركب، سواء التقليدي أو كتلي الملاء، يتميز بلزوجة أعلى نسبياً مقارنةً بالأسمنتات الراتنجية ثنائية التصلب، فإن تسخينه إلى درجات حرارة تتراوح بين 65-70°م يؤدي إلى تحسين خواصه الريولوجية وزيادة سيولته، مما يُمكنه من التغلغل - ولو جزئياً - ضمن المسامات المجهرية التي يخلّفها التخریش الحمضي في الخزف الزجاجي. ورغم أن هذا التغلغل يظل محدوداً مقارنةً بالأسمنتات الراتنجية، إلا أن نوع وحجم المواد المألثة في الراتنجات المركبة المستخدمة في هذه الدراسة قد ساهم في تحسين هذه القدرة على التغلغل.

فمن العوامل التي قد تفسر قدرة الراتنج المركب المسخن على تحقيق قوة ارتباط مشابهة للأسمنت الراتنجي هو التركيب البنوي الدقيق للمادة، ولا سيما نوع وحجم الجزيئات المائلة. يحتوي Tetric N-Ceram على مزيج من جزيئات زجاج الباريوم والسيليكا والزركونيا، إلى جانب جزيئات نانوية وأخرى متماثرة مسبقاً prepolymerized fillers، بمتوسط حجم يقارب 550 نانومتر، وبنسبة مواد مائلة تبلغ نحو 82% وزنياً. أما Tetric N-Ceram Bulk Fill، فيحتوي على مكونات مشابهة، مع جزيئات مائلة أكبر نسبياً بمعدل يتراوح بين 0.04-3 ميكرومتر ونسبة مائات أقل نحو 76% وزنياً، ما يمنحه لزوجة منخفضة نسبياً وقدرة انسيابية أكبر، خاصة بعد التسخين.

ويُعدّ حجم الجزيئات المائلة عنصراً حاسماً في هذا السياق؛ فكلما كانت هذه الجزيئات أصغر، زادت قدرة الراتنج على التغلغل في المسامات المجهرية الدقيقة. صحيح أن المونوميرات داخل القالب الراتنجي هي التي تتغلغل فعلياً ضمن هذه المسامات، إلا أن حجم الجزيئات المائلة يؤثر بشكل غير مباشر على قدرة المادة على الانسياب والتغلغل، وذلك من خلال تأثيره على لزوجة الراتنج وانسيابيته، خصوصاً بعد التسخين. فالراتنجات التي تحتوي على جزيئات مائلة نانوية أو دقيقة الحجم تتميز بتوزيع أكثر تجانساً للجزيئات داخل القالب الراتنجي (Vouvoudi, 2022)، مما يقلل من لزوجتها ويزيد من سيولتها، وبالتالي يحسن من تغلغلها ضمن المسامات المجهرية للخزف المهيأ. وبذلك، رغم أن التغلغل الحاصل بواسطة الراتنج المركب المسخن يظل جزئياً ومحدوداً مقارنةً بالأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب، فإن اختيار مواد تحتوي على جزيئات نانوية أو دقيقة الحجم - كما هو الحال في المواد المستخدمة في هذه الدراسة - قد ساهم في تعزيز هذا التغلغل مقارنة بأنواع أخرى من الراتنجات ذات حجم مائات أكبر أو لزوجة أعلى. وهذا ما قد يُفسّر جزئياً تساوي الأداء الارتباطي بين الراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي في هذه الدراسة، رغم غياب العوامل الكيميائية المتخصصة في تركيبة الراتنج المركب.

بعد استعراض التفسيرات المحتملة لسلوك مواد الإلصاق المستخدمة في هذه الدراسة مع سطحي العاج والخزف، من المهم الانتقال إلى مناقشة الدراسات السابقة التي أظهرت نتائج مختلفة أو متباينة، وذلك لفهم الأسباب المحتملة لهذه الاختلافات ومدى تأثيرها على تفسير نتائج البحث الحالي.

اختلفت نتائج هذه الدراسة مع ما توصلت إليه دراسة (Aboushahba et al., 2021)، التي أظهرت تفوقاً واضحاً لقوة ارتباط القص المجهري للراتنج المركب النانو هجين المسخن Tetric EvoCeram مقارنةً بالأسمنت الراتنجي Variolink Esthetic LC عند إلصاق الخزف المملوء ببلورات اللوسيت IPS Empress CAD، حيث حققت مجموعة الراتنج المركب المسخن بدورتي تسخين أعلى القيم. أما في دراستنا، فلم تظهر فروق ذات دلالة إحصائية في قوة ارتباط الشد بين الراتنج المركب المسخن التقليدي Tetric N-Ceram أو كتلي الملء وبين الأسمنت الراتنجي Variolink N عند إلصاق الترميمات المصنّعة من الخزف المملوء ببلورات ثنائي سيليكات الليثيوم IPS e.max Press ويُعزى هذا التباين المحتمل في النتائج إلى عدد من الفروقات بين الدراستين، منها: نوع الخزف المستخدم، إذ تختلف البنية البلورية والخصائص الفيزيائية بين الخزف المملوء بالليوسيت والخزف المملوء بثنائي سيليكات الليثيوم، مما قد يؤثر على استجابة سطح الترميم لبروتوكول الإلصاق؛ بالإضافة إلى اختلاف نوع الاختبار المستخدم، حيث اعتمدت دراسة Aboushahba على اختبار القص المجهري، في حين استخدمت دراستنا اختبار الشد، وهو اختبار أكثر حساسية للخلل عند سطح الارتباط البيني. ومن المعروف أن اختبار القص غالباً ما يعطي قيماً عددية أعلى مقارنةً باختبار الشد لنفس نظام الإلصاق والظروف، وذلك لأن القوة تُطبّق بشكلٍ موازٍ لسطح الإلصاق، مما يوزّع الإجهاد على مساحة أوسع ويقلل احتمال الفشل المبكر. بالمقابل، فإن اختبار الشد يُعدّ أكثر دقة وحساسية لعيوب السطح مثل الفقاعات الهوائية أو التباين في السماكة، وتكون فيه القوة عمودية على سطح الإلصاق، مما يجعله أكثر تمثيلاً لجودة الارتباط البيني ولكنه يُسجل عادةً بقيم أقل (Reicheneder et al., 2009). لذلك، فإن اختلاف نوع الاختبار قد يفسّر ارتفاع القيم في دراسة Aboushahba، وظهور فروقٍ أكبر بين المواد المستخدمة، مقارنةً بما تم تسجيله في هذه الدراسة. بالإضافة إلى ما سبق، تجدر الإشارة إلى أن الراتنج المركب المستخدم في تلك الدراسة كان Tetric EvoCeram، والذي يختلف عن الراتنج المستخدم في دراستنا وهو Tetric N-Ceram. يتميز Tetric EvoCeram بوجود جزيئات مألئة أصغر حجماً وأكثر تنوعاً (تجمع بين الجزيئات النانوية والنانوهجينة)، بالإضافة إلى لزوجة أقل مقارنةً بـ Tetric N-Ceram التقليدي الذي يحتوي على جزيئات مألئة أكبر نسبياً ولزوجة أعلى. ومن الممكن أن يفسر حجم الجزيئات المألئة الأصغر والزوجة المنخفضة لـ Tetric EvoCeram القيم الأعلى لقوة الارتباط التي سجلتها تلك الدراسة مقارنةً بنتائج دراستنا. كما أُجريت في الدراسة السابقة دورتا تسخين للراتنج المركب، ربما حسّنت سيولته وتغلّغله، بينما استخدمت دراستنا تسخيناً لمرة واحدة فقط. ويُضاف إلى ذلك اختلاف نوع الأسمنت الراتنجي المستخدم، حيث يُعدّ Variolink Esthetic LC أسمناً

راتنجياً ضوئياً التصلب، بينما يُعتبر Variolink N أَسْمَنْتاً راتنجياً ثنائي التصلب، مما يؤدي إلى اختلافات في التركيبة الكيميائية والخصائص الفيزيائية لكل منهما. وتبعاً لهذه الفروقات يمكن تفسير تباين النتائج بين الدراستين (Aboushahba et al., 2021).

اختلفت نتائج دراستنا مع نتائج دراسة (Shahin et al. (2021) التي قِيمَت قوة ارتباط القص المجهري بين كل من الراتنج المركب المسخن 3M, Filtek Z350 والأسمنت الراتنجي ضوئياً التصلب RelyX Veneer, 3M إلى الخزف الزجاجي المملوء بثنائي سيليكات الليثيوم IPS e.max CAD والراتنج المركب المسخن 3M, Filtek Z350، حيث أظهرت تلك الدراسة تفوقاً واضحاً لقوة الارتباط عند استخدام الراتنج المركب المسخن مقارنة بالأسمنت الراتنجي التقليدي. تنطبق الأسباب التي فسّرت الاختلاف بين نتائج دراستنا ونتائج دراسة (Aboushahba et al. (2021 على المقارنة مع دراسة (Shahin et al. (2021، ولا سيما من حيث نوع اختبار قوة الارتباط المستخدم، إذ اعتمدت كل من الدراستين السابقتين على اختبار القص المجهري، في حين استُخدم في دراستنا اختبار الشد، وهو أكثر حساسية للعيوب السطحية ويُسجّل عادة قيماً أقل. كما يتكرر الاختلاف في نوع المواد المستخدمة، حيث استخدمت دراسة (Shahin et al. (2021 الراتنج المركب Filtek Z350 XT من 3M، والذي يتميز بوجود جزيئات مألئة نانوية منفردة بحجم يتراوح بين 4-20 نانومتر، بالإضافة إلى عناقيد نانوية nanoclusters يتراوح حجمها بين 0.6-10 ميكرومتر. تُسهم هذه التركيبة في تحقيق لزوجة منخفضة نسبياً، مما يُحسّن من انسيابية المادة وقدرتها على التغلغل داخل المسامات المجهرية الدقيقة لسطح الخزف المهيأ. بالمقابل، استخدمت دراستنا الراتنج المركب Tetric N-Ceram، الذي يحتوي على جزيئات مألئة أكبر حجماً (بمتوسط 550 نانومتر) ونسبة مألئات أعلى نحو 82% وزنياً، مما يمنحه لزوجة أعلى وانسيابية أقل. ومن الممكن أن يفسّر حجم الجزيئات المألئة الأصغر واللزوجة المنخفضة لـ Filtek Z350 XT القيم الأعلى لقوة الارتباط التي سجلتها تلك الدراسة مقارنة بنتائج دراستنا (Shahin et al., 2021).

وقد اتفقت نتائج هذه الدراسة مع نتيجة دراسة (Rodrigues et al., 2022) التي قارنت بين نوعين من الراتنج المركب المسخن: ذو أساس ميتاكريلات وذو أساس سيلوران مع الأسمنت الراتنجي من حيث قوة ارتباط الشد المجهري، فكانت نتائج متوسطات قوة ارتباط الشد المجهري كالتالي: الأسمنت الراتنجي 7.37 ميغاباسكال، الراتنج المركب ذو أساس الميتاكريلات 6.98 ميغاباسكال أما الراتنج المركب ذو أساس السيلوران 4.74

ميغاباسكال ولم يكن هناك فرق ذو دلالة إحصائية بين هذه المواد. وتدعم نتائج العديد من الدراسات هذا الاتجاه أيضاً. إذ قارنت هذه الدراسات (Goulart et al., 2018; Mutlu et al., 2021; Tomaselli et al., 2019). قوى الارتباط لعدة مواد من الراتنج المركب المسخن ويُعزى هذا التوافق المحتمل إلى أن تسخين الراتنج المركب -سواء التقليدي أو كتلي الملاء سواءً أكان ذو أساس ميتاكريلات أو سيليلوران- يؤدي إلى تقليل لزوجته وارتفاع سيولته، مما يعزز من تغلغل المادة إلى البنية الميكروية للعاج المحضّر ويُحسّن من قدرة المادة على التّطبيب وهذا يعني أن المادة تلامس السطح بشكل أفضل، وتشكل طبقة رقيقة متجانسة، مما يُعزز الارتباط الميكانيكي. وهذه الخصائص تشبه إلى حد كبير ما يوفره الأسمنت الراتنجي في أدائه الإلصاق (D'Arcangelo et al., 2009). إضافةً إلى ذلك، تلعب أنظمة الربط الشامل universal adhesives التي استخدمت في عدد من الدراسات دوراً محورياً في دعم أداء الإلصاق لكل من الراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي، حيث أنها صُممت لتكون فعالة ضمن تقنيات التخريش المختلفة (التخريش الكلي أو الذاتي). حيث تحتوي هذه الأنظمة، مثل Tetric N-Bond Universal المستخدم في هذه الدراسة، على مكونات حامضية مخففة، تُسهّل تشكيل الطبقة الهجينة مع العاج، إضافةً إلى مونوميرات وظيفية مثل HEMA التي تحسّن قدرة المادة الرابطة على التّطبيب والتغلغل داخل النسيج السنية. بفضل هذه التركيبة المتوازنة، توفر المواد الرابطة الشاملة قاعدة إلصاق فعالة تضمن أداءً مقارباً لمواد الإلصاق المختلفة، وتُساهم في تقليل الفروقات بين الراتنج المركب المسخن والأسمنت الراتنجي من حيث قوة الارتباط إلى النسيج السنية. إلى جانب ذلك، فإن تحضير سطح الترميم الخزفي الزجاجي IPS e.max Press بدقة يُعدّ عاملاً حاسماً في نجاح الإلصاق، بغضّ النظر عن نوع مادة الإلصاق المستخدمة. يتضمن هذا التحضير تخريش سطح الخزف بحمض فلور الماء، مما يُنتج خشونة ميكروية تُعزّز الارتباط الميكانيكي المجهرية وقوة ارتباط الشّد (Oh & Shen, 2003)، يلي ذلك تطبيق مادة السيلان مثل Monobond N، التي تعمل كعامل مزدوج يربط كيميائياً بين سطح الخزف الزجاجي ومادة الإلصاق (سواء أكانت راتنجاً مركباً مسخناً أو أسمنتاً راتنجياً) إذ أنّ معالجة السطح بالسيلان هي العامل الرئيسي المسؤول عن الارتباط الراتنجي بالخزف وتسهم في زيادة قوة ارتباط الشّد بين المواد الخزفية والمواد ذات الأساس الرّاتنجي (Meyer Filho et al., 2004). هذا التحضير المنهجي والمتسق للسطح الخزفي يجعل من الممكن تحقيق ارتباط موثوق باستخدام كل من الأسمنت الراتنجي والراتنج المركب المسخن، مما يفسّر التقارب في أداء قوة الارتباط بين المادتين في هذه الدراسات.

ومن اللافت أن هذه الدراسات، على الرغم من تباينها الكبير في التصميم والمنهجية، أفضت إلى نتائج متقاربة تدعم الاتجاه نفسه. فقد استخدمت كل دراسة نوعاً تجارياً مختلفاً من المواد، وتنوّعت طرق اختبار قوة الارتباط بين الشد والقص والاختبارات المجهريّة، كما اختلف نوع ركيزة السن بين العاج والميناء، وتفاوتت أنواع الخزف وتقنيات التحضير وبروتوكولات الإلصاق. ورغم هذا التباين، فإن التوافق في النتائج يُعزز من رصيد الأدلة المنشورة في الأدب الطبي حول إمكان استخدام الراتنج المركب المسخن في تطبيقات الإلصاق. ومع ذلك، فإن اعتماد هذا الاستخدام سريريّاً يتطلب توفر بيانات أكثر شمولاً تستوفي المعايير الدولية المعتمدة، وعلى وجه الخصوص المواصفة ISO 4049 الخاصة بمواد الترميم التجميلية المعتمدة على الراتنج، والتي تُحدّد الخصائص الواجب تحقيقها قبل قبول أي مادة لتُستخدم في الإلصاق طويل الأمد داخل البيئة الفموية. وتشمل هذه الخصائص تقييم الثبات الحجمي، ومقاومة الذوبان، ودرجة التحول، والسلامة الحيوية، وتحمل التغيرات الحرارية، وغيرها من المعايير المرتبطة بأداء المادة واستقرارها.

بالرغم من أن الراتنج المركب التقليدي مادة مدروسة على نطاق واسع، وقد استوفت معظم الخصائص المطلوبة لاعتمادها سريريّاً في الترميمات المباشرة من حيث السلامة الحيوية، والخواص الميكانيكية، والتوافق النسيجي، إلا أن تغيير استخدامه ليكون مادة إلصاق للترميمات غير المباشرة يقتضي دراسة إضافية لخصائص محددة تفرضها طبيعة هذا التطبيق المختلف. فموقع المادة في الترميم غير المباشر يفرض عليها متطلبات دقيقة تختلف عن وظيفتها كترميم مباشر، وتستلزم اختبار خصائص أساسية وفق المعايير التقنية الخاصة بمواد الإلصاق، لا سيما المواصفة الدولية ISO 4049 التي تُعد مرجعاً معتمداً عالمياً في هذا السياق، وتُعنى بتحديد الحد الأدنى من الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمواد الإلصاق المستخدمة في الترميمات السنية.

من أبرز الخصائص التي ينبغي تقييمها في الراتنج المركب عند اعتباره كمادة إلصاق: قابلية التدفق والانسحاب بعد التسخين (flowability) لضمان ملء الفجوات الدقيقة تحت الترميم، وسماكة الفيلم الناتج (film thickness) التي يجب أن تبقى ضمن حدود لا تتجاوز 50 ميكرون حسب متطلبات ISO 4049، إضافةً إلى درجة التحول (degree of conversion) خاصة في المناطق المعتمدة التي لا يصلها الضوء الكافي للتصليب، وهو تحدّي رئيسي نظراً لاعتماد هذه المادة على التصليب الضوئي فقط. كما ينبغي اختبار ثبات قوة الارتباط بعد الشيخوخة الصناعية (thermal cycling, water storage)، والتحمل الميكانيكي للطبقة الرابطة تحت إجهادات المضغ (mechanical fatigue)، ومدى التوافق مع أنواع مختلفة من الترميمات الخزفية. إلى

جانب ذلك، تُعد إعادة تقييم السلامة الحيوية أمراً ضرورياً نظراً لاختلاف موقع التطبيق ومدة التماس مع النسيج السنية في هذا السياق الجديد.

وعليه، فإن هذه النتائج، وإن كانت تضيف إلى الأدبيات الطبية المنشورة، لا تكفي بحد ذاتها لاستخلاص توصية سريرية باعتماد الراتنج المركب التقليدي المسخن كمادة إلصاق بديلة للأسمنت الراتنجي، إلا بعد استكمال دراسة الخصائص المشار إليها وفق المعايير المعتمدة.

أما بالنسبة لاختيار الراتنج المركب كتلي الملء (Tetric N-Ceram Bulk Fill) ليكون أحد مواد الإلصاق المختبرة في هذه الدراسة فكان انطلاقاً من فرضية مدروسة تتعلق بكفاءة التصليب الضوئي تحت الترميمات غير المباشرة. فقد أفادت عدة دراسات بأن مرور الضوء يتأثر سلباً بالمواد الترميمية المختلفة مثل الراتنج المركب والخزف، مما يؤدي إلى تقليل كمية الضوء التي تصل إلى مادة الإلصاق، وبالتالي انخفاض درجة التحول التماثلي للمادة وتدهور خصائصها الميكانيكية . (Jung et al., 2006; Koch et al., 2007) وقد أظهرت دراسات أخرى أن المواد الخزفية تضعف مرور الضوء بشكل أكبر من الراتنج المركب (Pick et al., 2010) مما يزيد من صعوبة تصليب المواد المعتمدة على التفعيل الضوئي. وبناءً عليه، تم التفكير باستخدام راتنج كتلي الملء. إذ يتمتع هذا النوع من الراتنجات بقدرة محسنة على تصليب سماكات أكبر، بفضل تركيبته الخاصة التي تسمح بنفاذية ضوئية أعلى وفعالية تصليب أفضل مقارنة بالراتنج المركب التقليدي. وقد تحقق ذلك من خلال تقليل محتوى الجزيئات المائلة أو تعديل توزيعها بشكل يخفف من تشتت الضوء، إضافة إلى اختيار جزيئات مائلة ذات معامل انكسار قريب من معامل قالب الراتنج، مما يقلل من انكسار الضوء الداخلي ويعزز اختراقه. كما تسهم البادئات الضوئية الفعالة مثل Ivocerin في زيادة كفاءة التصليب حتى عند انخفاض شدة الضوء، في حين تُسهم التعديلات الكيميائية في القالب الراتنجي في تحسين انتقال الضوء عبر المادة. وبذلك، يستطيع Tetric N-Ceram Bulk Fill أن يتصلب بكفاءة حتى في سماكات تصل إلى 4 مم ضمن طبقة واحدة، وهو ما لا يُنصح به في الراتنجات التقليدية، ما يجعله خياراً منطقياً عند الحاجة إلى تعزيز التصليب تحت ترميمات تحدّ من نفاذ الضوء.

ورغم معرفتنا المسبقة بخصائص هذا النوع من الراتنج والتي قد تُفسر نظرياً ضعف أدائه الارتباطي - كارتفاع محتوى الجزيئات المائلة وتقليل محتوى الراتنج، ما يؤدي إلى لزوجة أكبر - فقد أردنا اختباره عملياً نظراً لاحتمال أن يتجاوز الأداء السريري التوقعات النظرية أحياناً. ومع ذلك، أظهرت النتائج أن مجموعة Tetric N-Ceram Bulk Fill سجلت أدنى قيمة لقوة ارتباط الشد بين المجموعات الثلاث المدروسة. ومن خلال الملاحظة السريرية

أثناء الإجراء، تبين أن هذا النوع من الراتنج أبدى قوامة أكثر لزوجة بعد التسخين المسبق مقارنة بالراتنج المركب التقليدي، مما قد يكون قد أثر سلباً على قدرته على الانسياب داخل الشقوق المجهرية والتغلغل في سطح العاج والخزف. هذه اللزوجة المرتفعة - على الرغم من التسخين - ربما حدثت من تكييف المادة وفعاليتها في تشكيل ارتباط ميكانيكي مجهري فعال، وهو ما يفسر الأداء الضعيف نسبياً مقارنةً بباقي المواد المختبرة في هذه الدراسة. وبالنسبة لأنماط الفشل، بالرغم من عدم وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين مجموعات البحث من حيث أنماط الفشل، إلا أن تحليل هذه الأنماط يقدم مؤشرات مهمة تسهم في تفسير نتائج قوة ارتباط الشد. وقد كان النمط المختلط هو النمط الغالب في جميع المجموعات، ما يعكس وجود توزيع متوازن نسبياً للفشل بين الواجهة اللاصقة ومكونات نظام الإلصاق. ويُعدّ هذا النمط مؤشراً على أن منظومة الإلصاق كانت فعالة جزئياً، إذ يشير إلى أن قوة الالتصاق إلى النسيج السنية كانت كافية لمقاومة الانفصال الكامل عند الواجهة اللاصقة، مع احتمال تجاوزها لمتانة بعض مكونات المادة في بعض المواضع. ومع ذلك، قد يدل النمط المختلط أيضاً على وجود مناطق ضعيفة في التحضير أو في التصليب، أو على توزيع غير متجانس للإجهادات، أو تفاوت في جودة الربط عبر سطح العينة.

كان نمط الفشل المختلط هو النمط السائد في هذه الدراسة، وتتفق هذه النتيجة مع ما توصلت إليه دراسات سابقة مثل (Lührs et al., 2010; Mutlu et al., 2021)، حيث سجل النمط المختلط بوصفه النمط الغالب أيضاً. ويعزز ذلك ما أشارت إليه دراسة (Mutlu et al., 2021) التي بينت أن استخدام أنظمة ربط فعالة كالأنظمة الشاملة وغير ذاتية الإلصاق يؤدي إلى تفاعل أفضل مع سطح العاج وتشكيل طبقة هجينة أكثر وضوحاً، مما يرفع من قوة الارتباط ويقلل من الفشل الالتصاقى البحث. وهذا يفسر ميل معظم العينات في دراستنا نحو نمط فشل مختلط، مما يشير إلى فعالية أنظمة الربط والمواد المستخدمة في تعزيز الالتصاق إلى النسيج السنية والخزف على حدّ سواء.

إنّ الأدلة السريرية توفر بُعداً إضافياً لفهم تأثير نوع مادة الإلصاق على الأداء طويل الأمد. ومع ذلك، أظهرت دراسة سريرية تراجمية تابعت ترميمات مصنّعة من الراتنج المركّب غير المباشر ألصقت باستخدام أسمنت راتنجي ثنائي التصلب وراتنج مركب ضوئي التصلب لمدة عشر سنوات، عدم وجود فروق ذات دلالة إحصائية في الأداء السريري بين مادتي الإلصاق (Barabanti et al., 2015). وهذا يتوافق مع نتائج دراستنا في عدم وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين قيم قوة ارتباط الشد للراتنج المركب التقليدي وكتليّ الملء والأسمنت الراتنجي والراتنج المركب كتليّ الملء.

ومع ذلك، يشكّل استخدام الراتنجات المركبة المسخنة تحدياً من الناحية السريرية بسبب قصر زمن العمل. وللاستفادة الكاملة من تأثيرات التسخين، (Lucey et al., 2010) يجب أن تبقى الراتنجات المركبة محتقظة بدرجة حرارتها حتى لحظة التصلب الضوئي. (Munoz et al., 2008). ووفقاً لـ Darnosh وآخرين، يحدث فقدان في درجة حرارة الراتنج المركب تصل إلى حوالي 50% خلال دقيقتين من إخراج المادة من جهاز التسخين. (Daronch et al., 2006) لذلك، يجب تنفيذ خطوات الإلصاق باستخدام الراتنجات المركبة المسخنة بعناية وسرعة، مع الحرص على تفعيل الضوء بسرعة فور إخراج المادة من الجهاز. وفي هذه الدراسة، تم تجنب هذا الفقدان الحراري من خلال استخدام أعلى درجة حرارة ممكنة وتقليل زمن تثبيت الترميم إلى 30 ثانية.

تُعدّ الثخانة الفلمية film thickness لمادة الإلصاق من العوامل المهمة التي قد تؤثر على نجاح الترميمات غير المباشرة، خصوصاً عند استخدام الراتنج المركب المسخن، مما يستدعي مناقشة تأثير التسخين على هذه الخاصية الحيوية. عادةً ما تُظهر الراتنجات المركبة ثخانة فلمية أكبر مقارنةً بالأسمنتات الراتنجية. ومع ذلك، فقد تبين في بعض الدراسات أن التسخين يقلل من لزوجة بعض أنواع الراتنجات المركبة لتصل إلى قيم مماثلة لتلك التي تُسجّل مع أسمنتات الراتنج (Salvador et al., 2020). وفي دراسة سابقة، أظهر راتنج مركب مسخن سماكة بلغت 45 ميكرومتر، أي بانخفاض نسبته 24% مقارنةً بثخانته عند درجة حرارة الغرفة (Goulart et al., 2013). وبالتالي، قد يكون للتسخين دور مهم في تحسين ثخانة طبقة الإلصاق في الترميمات غير المباشرة. على النقيض من ذلك، لم تظهر إحدى الدراسات أن تسخين الراتنج المركب قد قلل بشكل ذو دلالة إحصائية من الثخانة الفلمية وذلك بعد مقارنة ثخانة الراتنج المركب قبل وبعد التسخين، إلا أن انخفاض اللزوجة الناتج عن التسخين جعل قيمة الثخانة ميكرومتر 0.053 مشابهة لما هو عليه في الراتنج المركب السيال (Tomaselli et al., 2019). اختبرت إحدى الدراسات إمكانية تقليل الثخانة الفلمية للراتنج المركب المسخن عبر تطبيق أمواج فوق صوتية على الترميم قبل تطبيق التصلب الضوئي، وغم أن ذلك قد أدى إلى ازدياد في قوة الارتباط وارتفاع في المقاومة الميكانيكية للترميمات الخزفية، إلا أنه لم يؤدي إلى انخفاض ذو دلالة إحصائية في قيم الثخانة الفلمية (Porto et al., 2022).

الباب السادس: الاستنتاجات

Conclusions

ضمن حدود هذه الدراسة المخبرية، أظهرت المواد الثلاث المستخدمة لإصاق الترميمات الخزفية: الأسمنت الراتنجي ثنائي التصلب (Variolink N) ، والراتنج المركب التقليدي المسخن (Tetric N-Ceram) ، والراتنج المركب كتلي الملء المسخن (Tetric N-Ceram Bulk Fill)، أداءً متقارباً من حيث قوة ارتباط الشد، دون وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين المجموعات.

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن الراتنج المركب كتلي الملء حقق أدنى متوسط لقوة ارتباط الشد بين المواد المدروسة، ورغم أن الفروق لم تكن ذات دلالة إحصائية، فإن هذه النتيجة قد تُشير إلى محدودية في أدائه تستدعي المزيد من البحث والمقارنة مع الأنواع الأخرى.

كما كان نمط الفشل المختلط هو النمط السائد في معظم العينات، وهو ما قد يشير إلى توزيع متوازن لنقاط الضعف بين واجهة الإصاق والمادة، دون وجود نمط فشل محدد يهيمن على جميع المجموعات. ورغم أن ذلك قد يعكس أداءً مقبولاً لبروتوكول الإصاق والمواد المستخدمة، إلا أنه لا يكفي بمفرده لتأكيد فعالية الارتباط المجهرى.

تشير هذه النتائج إلى إمكانية اعتماد الراتنج المركب المسخن، سواء التقليدي أو كتلي الملء، كخيار بديل عملي للأسمنتات الراتنجية ثنائية التصلب في إصاق الترميمات غير المباشرة، شريطة الالتزام الصارم ببروتوكول التسخين وسرعة التطبيق والتصلب، نظراً لحساسية هذه المواد لفقدان الحرارة. وعلى الرغم من أن معطيات هذه الدراسة المخبرية تدعم هذا التوجه، إلا أن تعميم النتائج على الممارسة السريرية يتطلب المزيد من الحذر، إذ لا يمكن اعتبار الراتنج المركب المسخن مادة إصاق معتمدة قبل التحقق من توافق خصائصها مع متطلبات المواصفات القياسية الدولية ISO ذات الصلة، ودراسة سلوك الأنواع المختلفة من الراتنجات المركبة تجاه التسخين، وتأثير ذلك على لزوجتها وقدرتها على ترطيب الأسطح السنية والترميمية بفعالية.

**الباب السابع: المقترحات
والتوصيات
Suggestions
and
Recommendations**

7.1 التوصيات

ورغم أن نتائج هذه الدراسة المخبرية لا تسمح بالخروج باستنتاج نهائي يُجيز اعتماد الراتنج المركب المسخن كخيار إلصاق سريري موثوق لترميمات الأسنان غير المباشرة، إلا أنه يمكن تقديم بعض النصائح الأولية للممارسين الراغبين بتجريب هذه التقنية سريرياً:

- إذ يُستحسن اختيار أنواع الراتنج المركب التي دُرست بشكل موسّع في الأدبيات العلمية، والتي أظهرت سلوكاً حرارياً مقبولاً عند التسخين، وثخانة فلمية مشابهة لقيم الأسمنت الراتنجي ودرجة تحول تماثري عالية.
- كما يُفضّل استخدام الأنواع المتوفرة على شكل كبسولات قابلة للتركيب على فرد الحقن لتسهيل التسخين والتطبيق وتقليل فقد الحرارة. فإن ذلك يُتيح تسخين كميات صغيرة مناسبة للتطبيق الفوري، دون الحاجة إلى تسخين كامل عبوة المادة. ويُعد هذا الإجراء أكثر أماناً من الناحية العملية، لأنه يُقلل من تكرار تعرّض المادة لدورات تسخين وتبريد متعددة، والتي قد يكون لها تأثيرات غير معروفة على خواص المادة.
- إضافة إلى اعتماد أجهزة تسخين مخصصة ومعايرة، مزودة بتحكم رقمي بدرجة الحرارة، تضمن التسخين المتجانس والأمن للمادة.
- ومن المهم كذلك الالتزام بسرعة التطبيق مباشرة بعد إخراج المادة من جهاز التسخين، بحيث لا يتجاوز الزمن الفاصل بين التسخين والتطبيق عدة ثوانٍ، لتجنّب الانخفاض السريع في درجة الحرارة.
- كما يُوصى ببدء التصليب الضوئي خلال 30 ثانية أو أقل من لحظة وضع المادة في موضعها، لضمان تصلب فعال في ظل الحفاظ على خصائص المادة المحسنة الناتجة عن التسخين.

7.2 المقترحات

يقترح إجراء دراسات مستقبلية تركز على تقييم أداء الراتنج المركب كتلي الملء من النوع السيل عند استخدامه كمادة إلصاق في الترميمات غير المباشرة، مع مقارنته بنظيره عالي اللزوجة. ويكتسب هذا النوع أهمية خاصة نظراً لما يتمتع به من لزوجة منخفضة وعمق تصليب مناسب، مما يجعله خياراً واعداً يستحق مزيداً من التحري والاختبار.

يقترح تنفيذ دراسات تجريبية موسعة تستهدف فحص تأثير التسخين على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمختلف أنواع الراتنج المركب، بهدف تطوير بروتوكول تسخين معياري يضمن تحسين أداء المادة دون التسبب في آثار سلبية. ويُفضل أن تشمل هذه الدراسات الراتنجات ذات التركيبات المختلفة، مع تحليل التغيرات الناتجة عن التسخين في اللزوجة، وقابلية الترطيب، ودرجة التحويل، لضمان تطبيق آمن وفعال للتسخين في السياقات السريرية.

References المراجع

- Acquaviva, P. A., Cerutti, F., Adami, G., Gagliani, M., Ferrari, M., Gherlone, E., & Cerutti, A. (2009). Degree of conversion of three composite materials employed in the adhesive cementation of indirect restorations: a micro-Raman analysis. **Journal of dentistry**, 37(8), 610–615.
- Aboushahba, M., Korayem, A., Journal, S. Y.–E. D.,. (2021). Effect of preheating cycles on microshear bond strength of nanohybrid resin composite luted to CAD/CAM ceramic. **Egyptian Dental Journal**, 729–738
- A Korayem, SH Younis Egyptian (2021) **Dental Journal**, 2021, 67, 738.
- Almeida, J. R., Schmitt, G. U., Kaizer, M. R., Boscato, N., & Moraes, R. R. (2015). Resin-based luting agents and color stability of bonded ceramic veneers. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, 114(2), 272–277.
- American National Standards Institute/American Dental Association Specification No. 61 for Zinc Polycarboxylate Cement. (1980). **The Journal of the American Dental Association**, 101(4), 669–671.
- Anusavice, K. J., Shen, C., & Rawls, H. R. (2013). *Phillips' Science of Dental Materials* (12th ed.). Elsevier.
- Armstrong, S., Breschi, L., Özcan, M., Pfefferkorn, F., Ferrari, M., & Van Meerbeek, B. (2017). Academy of Dental Materials guidance on in vitro testing of dental composite bonding effectiveness to dentin/enamel using micro-tensile bond strength (μ TBS) approach. **Dental Materials**, 33(2), 133–143.
- Arrais, C. A. G., Rueggeberg, F. A., Waller, J. L., de Goes, M. F., & Giannini, M. (2008). Effect of curing mode on the polymerization characteristics of dual-cured resin cement systems. **Journal of Dentistry**, 36(6), 418–426.

- Ayub, K., Jr, G. S., Rizkalla, A., Assoc, R. B.–J. C. D. (2014). Effect of preheating on microhardness and viscosity of 4 resin composites. **Can Dent Assoc**, 2014•jcda.Ca.
- Barabanti, N., Preti, A., Vano, M., Derchi, G., Mangani, F., & Cerutti, A. (2015). Indirect composite restorations luted with two different procedures: A ten years follow up clinical trial. **Journal of Clinical and Experimental Dentistry**, 7(1), e54.
- Barbon, F. J., Isolan, C. P., Soares, L. D., Bona, A. Della, de Oliveira da Rosa, W. L., & Boscato, N. (2022). A systematic review and meta-analysis on using preheated resin composites as luting agents for indirect restorations. **Clinical Oral Investigations**, 26(4), 3383–3393.
- Bowen, R. L. (1956). Use of Epoxy Resins in Restorative Materials. **Journal of Dental Research**, 35(3), 360–369.
- Braga, R. R., Meira, J. B. C., Boaro, L. C. C., & Xavier, T. A. (2010). Adhesion to tooth structure: A critical review of “macro” test methods. **Dental Materials**, 26(2), e38–e49.
- Breschi, L., Mazzoni, A., De Stefano Dorigo, E., & Ferrari, M. (2009). Adhesion to Intraradicular Dentin: A Review. **Journal of Adhesion Science and Technology**, 23(7–8), 1053–1083.
- Chesterman, J., Jowett, A., Gallacher, A., & Nixon, P. (2017). Bulk-fill resin-based composite restorative materials: A review. **British Dental Journal**, 222(5), 337–344.
- Corral-Núñez, C., Vildósola-Grez, P., Bersezio-Miranda, C., Alves-Dos Campos, E., Fernández Godoy, E., Corral-Núñez, C., Vildósola-Grez, P., Bersezio-Miranda, C., Alves-Dos Campos, E., & Fernández Godoy, E. (2015). STATE OF THE ART OF BULK-FILL RESIN-BASED COMPOSITES: A REVIEW. **Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquia**, 27(1), 177–196.

- D'Arcangelo, C., De Angelis, F., D'Amario, M., Zazzeroni, S., Ciampoli, C., & Caputi, S. (2009). The Influence of Luting Systems on the Microtensile Bond Strength of Dentin to Indirect Resin-based Composite and Ceramic Restorations. **Operative Dentistry**, 34(3), 328–336.
- D'Arcangelo, C., Vanini, L., ... M. C.–C. C. E., (2015). Adhesive cementation of indirect composite inlays and onlays: A literature review. **Academia.EduC**, 2015•academia.Edu.
- Daronch, M., Rueggeberg, F. A., Moss, L., & De Goes, M. F. (2006). Clinically relevant issues related to preheating composites. **Wiley Online Library Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, 2006•Wiley Online Library, 18(6), 340–351.
- Davidson, C. L., de Gee, A. J., & Feilzer, A. (1984). The Competition between the Composite–Dentin Bond Strength and the Polymerization Contraction Stress. **Journal of Dental Research**, 63(12), 1396–1399.
- De Munck, J., Van Meerbeek, B., Yoshida, Y., Inoue, S., Vargas, M., Suzuki, K., Lambrechts, P., & Vanherle, G. (2003). Four-year water degradation of total-etch adhesives bonded to dentin. **Journal of Dental Research**, 82(2), 136–140.
- Deliperi, S., Bardwell, D. N., & Wegley, C. (2007). Restoration Interface Microleakage Using One Total-etch and Three Self-etch Adhesives. **Operative Dentistry**, 32(2), 179–184.
- Demirbuga, S., Ucar, F. I., Cayabatmaz, M., Zorba, Y. O., Cantekin, K., Topçuoğlu, H. S., & Kilinc, H. I. (2016). Microshear bond strength of preheated silorane- and methacrylate-based composite resins to dentin. **Scanning**, 38(1), 63–69.
- Dionysopoulos, D., ... C. P. (2015). Effect of temperature, curing time, and filler composition on surface microhardness of composite resins. **Journal of Conservative Dentistry and Endodontics**, 2015 journals.Lww.Com.

- Edelhoff, D., & Sorensen, J. A. (2002). Tooth structure removal associated with various preparation designs for anterior teeth. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, 87(5), 503–509.
- El Mourad, A. M. (2018). Assessment of Bonding Effectiveness of Adhesive Materials to Tooth Structure using Bond Strength Test Methods: A Review of Literature. **The Open Dentistry Journal**, 12(1), 664.
- Erickson, R. L., Barkmeier, W. W., & Kimmes, N. S. (2009). Bond strength of self-etch adhesives to pre-etched enamel. **Dental Materials**, 25(10), 1187–1194.
- Fan, J., Xu, Y., Si, L., Li, X., Fu, B., & Hannig, M. (2021). Long-term Clinical Performance of Composite Resin or Ceramic Inlays, Onlays, and Overlays: A Systematic Review and Meta-analysis. **Operative Dentistry**, 46(1), 25–44.
- Ferracane, J. L., & Mitchem, J. C. (2003). Relationship between composite contraction stress and leakage in Class V cavities. **American Journal of Dentistry**, 16(4), 239–243.
- Friedman, J. L. (2001a). *Method for preheating dental materials* (Patent US 6,320,162).
- Friedman, J. L. (2001b). *Heating assembly for preheating dental materials* (Patent US 6,236,020).
- Frões-Salgado, N. R., Silva, L. M., Kawano, Y., Francci, C., Reis, A., & Loguercio, A. D. (2010). Composite pre-heating: Effects on marginal adaptation, degree of conversion and mechanical properties. **Dental Materials**, 26(9), 908–914.
- Fron Chabouis, H., Smail Faugeron, V., & Attal, J. P. (2013). Clinical efficacy of composite versus ceramic inlays and onlays: A systematic review. **Dental Materials**, 29(12), 1209–1218.
- Fukegawa, D., Hayakawa, S., Yoshida, Y., Suzuki, K., Osaka, A., & Van Meerbeek, B. (2006). Chemical interaction of phosphoric acid ester with hydroxyapatite. **Journal of Dental Research**, 85(10), 941–944.

- Goulart, M., Damin, D. F., Melara, R., & Conceição, A. D. A. B. (2013). Effect of pre-heating composites on film thickness. **J Res Dent**, 1(4), 274–280.
- Goulart, M., Veleda, B., ... D. D.–... J. of E., & 2018.). Preheated composite resin used as a luting agent for indirect restorations: effects on bond strength and resin–dentin interfaces. **Journal of Esthetic Dentistry**, 2018•search.Ebsco–host.Com.
- Goulart, M., Veleda, B. B., Damin, D., & et al. (2018). Preheated resin composite used as a luting agent for indirect restorations: effects on bond strength and resin–dentin interfaces. **Int J Esthet Dent**, 13(1), 86–97.
- Gracis, S., Thompson, V. P., Ferencz, J. L., Silva, N. R., & Bonfante, E. A. (2015). A new classification system for all–ceramic and ceramic–like restorative materials. **International Journal of prosthodontics**, 28(3).
- Gwinnett, A. J., & Matsui, A. (1967). A study of enamel adhesives: The physical relationship between enamel and adhesive. **Archives of Oral Biology**, 12(12), 1615–1646.
- Hanabusa, M., Mine, A., Kuboki, T., Momoi, Y., Van Ende, A., Van Meerbeek, B., & De Munck, J. (2012). Bonding effectiveness of a new ‘multi–mode’ adhesive to enamel and dentine. **Journal of Dentistry**, 40(6), 475–484.
- Hashimoto, M., Ohno, H., Sano, H., Kaga, M., & Oguchi, H. (2003). In vitro degradation of resin–dentin bonds analyzed by microtensile bond test, scanning and transmission electron microscopy. **Biomaterials**, 24(21), 3795–3803.
- Heboyan, A., Vardanyan, A., Karobari, M. I., Marya, A., Avagyan, T., Tebyaniyan, H., Mustafa, M., Rokaya, D., & Avetisyan, A. (2023). Dental Luting Cements: An Updated Comprehensive Review. **Molecules**, 28(4), 1619.
- Hendi, A., Maleki, D., Falahchai, M., & Maleki, D. (2019). *Composite Preheating: A Review Article*.

- Huth, K. C., Chen, H. Y., Mehl, A., Hickel, R., & Manhart, J. (2011). Clinical study of indirect composite resin inlays in posterior stress-bearing cavities placed by dental students: Results after 4 years. ***Journal of Dentistry***, 39(7), 478–488.
- International Organization for Standardization. (2023). *Dentistry — Test methods for tensile bond strength to tooth structure*.
- Ivoclar Vivadent. (2009). *The Future of All-Ceramic Dentistry lithium disilicate IPS e.max®*.
- Ivoclar Vivadent. (2020). *IPS e.max Press: Instructions for Use*. JÖRGENSEN, K. D., ASMUSSEN, E., & SHIMOKOBE, H. (1975). Enamel damages caused by contracting restorative resins. ***European Journal of Oral Sciences***, 83(2), 120–122.
- Jung, H., Friedl, K. H., Hiller, K. A., Furch, H., Bernhart, S., & Schmalz, G. (2006). Polymerization Efficiency of Different Photocuring Units Through Ceramic Discs. ***Operative Dentistry***, 31(1), 68–77.
- Kampanas, N.–S. (2018). Resin Composite Pre-Heating – A Literature Review of the Laboratory Results. ***International Journal of Oral and Dental Health***, 4(2).
- Kelly, J., journal, P. B.–A. dental, & 2011,. (2011). Ceramic materials in dentistry: historical evolution and current practice. ***Australian Dental Journal***, 56(1), 84–96.
- Kenshima, S., Francci, C., Reis, A., Loguercio, A. D., & Filho, L. E. R. (2006). Conditioning effect on dentin, resin tags and hybrid layer of different acidity self-etch adhesives applied to thick and thin smear layer. ***Journal of Dentistry***, 34(10), 775–783.
- Kim, M. E., & Park, S. H. (2011). Comparison of Premolar Cuspal Deflection in Bulk or in Incremental Composite Restoration Methods. ***Operative Dentistry***, 36(3), 326–334.

- Koch, A., Kroeger, M., Hartung, M., Manetsberger, I., Hiller, K.-A., Schmalz, G., & Friedl, K.-H. (2007). Influence of ceramic translucency on curing efficacy of different light-curing units. **The Journal of Adhesive Dentistry**, 9(5), 449–462.
- Koshiro, K., Sidhu, S. K., Inoue, S., Ikeda, T., & Sano, H. (2006). New concept of resin-dentin interfacial adhesion: The nanointeraction zone. **Journal of Biomedical Materials Research – Part B Applied Biomaterials**, 77(2), 401–408.
- Kwon, Y., Ferracane, J., & Lee, I. B. (2012). Effect of layering methods, composite type, and flowable liner on the polymerization shrinkage stress of light cured composites. **Dental Materials**, 28(7), 801–809.
- Li, J., Li, D., Wang, Q., Wang, F., & Zhang, Z. (2024). Impact of repeated heat-pressing on the microstructure and flexural strength of lithium disilicate glass-ceramics. **BMC Oral Health**, 24(1), 1–9.
- Liu, J., Zhang, H., Sun, H., Liu, Y., Liu, W., Su, B., & Li, S. (2021). The Development of Filler Morphology in Dental Resin Composites: A Review. **Materials**, 14(19), 5612.
- Liu, Y., Xu, Y., Su, B., Arola, D., & Zhang, D. (2018). The effect of adhesive failure and defects on the stress distribution in all-ceramic crowns. **Journal of Dentistry**, 75, 74–83.
- Lousan Do Nascimento Poubel, D., Ghanem Zanon, A. E., Franco Almeida, J. C., Vicente Melo De Lucas Rezende, L., & Pimentel Garcia, F. C. (2022). Composite Resin Preheating Techniques for Cementation of Indirect Restorations. **International Journal of Biomaterials**, 2022.
- Lucey, S., Lynch, C. D., Ray, N. J., Burke, F. M., & Hannigan, A. (2010). Effect of pre-heating on the viscosity and microhardness of a resin composite. **Journal of Oral Rehabilitation**, 37(4), 278–282.

- Lührs, A. K., Guhr, S., Günay, H., & Geurtsen, W. (2010). Shear bond strength of self-adhesive resins compared to resin cements with etch and rinse adhesives to enamel and dentin in vitro. **Clinical Oral Investigations**, 14(2), 193–199.
- M., B. (1976). Response of the dental pulp to of bacteria around three filling materials. **J Dent Child**, 43, 83–89.
- Manso, A. P., & Carvalho, R. M. (2017). Dental Cements for Luting and Bonding Restorations: Self-Adhesive Resin Cements. **Dental Clinics of North America**, 61(4), 821–834.
- Marco Veneziani. (2017). Posterior indirect adhesive restorations: updated indications and the Morphology Driven Preparation Technique. **Int J Esthet Dent**, 12(2), 204–230.
- McLaren, E. A., & Figueira, J. (2015). Updating classifications of ceramic dental materials: a guide to material selection. **Compendium**, 36(6), 400–406.
- Meyer Filho, A., Vieira, L. C. C., Araújo, É., & Monteiro, S. (2004). Effect of different ceramic surface treatments on resin microtensile bond strength. **Journal of Prosthodontics**, 13(1), 28–35.
- Migliau, G. (2017). Classification review of dental adhesive systems: from the IV generation to the universal type. **Annali Di Stomatologia**, 8(1), 1.
- Mohammadi, N., Jafari-Navimipour, E., Kimyai, S., Ajami, A.-A., Bahari, M., Ansarin, M., & Ansarin, M. (2016). Effect of pre-heating on the mechanical properties of silorane-based and methacrylate-based composites. **Journal of Clinical and Experimental Dentistry**, 8(4), 373–381.
- Mörmann, W. H., Stawarczyk, B., Ender, A., Sener, B., Attin, T., & Mehl, A. (2013). Wear characteristics of current aesthetic dental restorative CAD/CAM materials: Two-body wear, gloss retention, roughness and Martens hardness. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, 20, 113–125.

- Munoz, C., Bond, P., Sy-Munoz, J., Tan, D., Dent, J. P.-A. J., (2008),. Effect of pre-heating on depth of cure and surface hardness of light-polymerized resin composites. **Am J Dent**, 2008•researchgate.Net.
- Muñoz, M. A., Sezinando, A., Luque-Martinez, I., Szesz, A. L., Reis, A., Loguercio, A. D., Bombarda, N. H., & Perdigão, J. (2014). Influence of a hydrophobic resin coating on the bonding efficacy of three universal adhesives. **Journal of Dentistry**, 42(5), 595–602.
- Murgueitio, R., & Bernal, G. (2012). Three-Year Clinical Follow-Up of Posterior Teeth Restored with Leucite-Reinforced IPS Empress Onlays and Partial Veneer Crowns. **Journal of Prosthodontics**, 21(5), 340–345.
- Mutlu, A., Atay, A., Research, E. Ç.-J. of A. O., (2021). Bonding Effectiveness of Contemporary Materials in Luting Glass-Ceramic to Dentine: An In Vitro Study. **ÇalJournal of Advanced Oral Research**, 2021•journals.Sagepub.Com, 12(1), 103–111.
- Oh, W. S., & Shen, C. (2003). Effect of surface topography on the bond strength of a composite to three different types of ceramic. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, 90(3), 241–246.
- Opdam, N., Feilzer, A., ... J. R.-A. journal of, (1998). Class I occlusal composite resin restorations: in vivo post-operative sensitivity, wall adaptation, and microleakage. **American Journal of Dentistry**, (1998) •europepmc.Org.
- Özcan, M., Materials, P. V.-D., & 2003. Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics. **Dental Materials**, 2003•Elsevier.
- Özcan, M., & Vallittu, P. K. (2003). Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics. **Dental Materials**, 19(8), 725–731.
- Pallesen, U., & Qvist, V. (2003). Composite resin fillings and inlays. An 11-year evaluation. **Clinical Oral Investigations**, 7(2), 71–79.

- Pashley, D. H. (1990). Clinical considerations of microleakage. **Journal of Endodontics**, 16(2), 70–77.
- Patussi, A. F. C., Ramacciato, J. C., da Silva, J. G. R., Nascimento, V. R. P., Campos, D. e. S., de Araújo Ferreira Munizz, I., de Souza, G. M., & Lima, R. B. W. (2023). Preheating of dental composite resins: A scoping review. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, 35(4), 646–656.
- Perdigão, J. (2007). New Developments in Dental Adhesion. **Dental Clinics of North America**, 51(2), 333–357.
- Perdigão, J., ... A. S.–A. journal of, & 2012. Laboratory bonding ability of a multi-purpose dentin adhesive. **American Journal of Dentistry**, 2012•researchgate.Net.
- Peumans, M., De Munck, J., Van Landuyt, K. L., Poitevin, A., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2010). Eight-year clinical evaluation of a 2-step self-etch adhesive with and without selective enamel etching. **Dental Materials**, 26(12), 1176–1184.
- Peumans, M., Kanumilli, P., De Munck, J., Van Landuyt, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2005a). Clinical effectiveness of contemporary adhesives: A systematic review of current clinical trials. **Dental Materials**, 21(9), 864–881.
- Peumans, M., Kanumilli, P., De Munck, J., Van Landuyt, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2005b). Clinical effectiveness of contemporary adhesives: A systematic review of current clinical trials. **Dental Materials**, 21(9), 864–881.
- Pick, B., Gonzaga, C. C., Junior, W. S., Kawano, Y., Braga, R. R., & Capel Cardoso, P. E. (2010). Influence of Curing Light Attenuation Caused by Aesthetic Indirect Restorative Materials on Resin Cement Polymerization. **European Journal of Dentistry**, 04(03), 314–323.
- Pilecco, R. O., da Rosa, L. S., Pereira, G. K. R., Tribst, J. P. M., May, L. G., & Valandro, L. F. (2023). The loss of resin cement adhesion to ceramic influences

- the fatigue behavior of bonded lithium disilicate restorations. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, 148.
- Pjetursson, B. E., Sailer, I., Makarov, N. A., Zwahlen, M., & Thoma, D. S. (2015). All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part II: Multiple-unit FDPs. **Dental Materials**, 31(6), 624–639.
- Porto, B. L., Barbon, F. J., Isolan, C. P., Borges, A. L., Spazzin, A. O., Moraes, R. R., & Boscato, N. (2022). Effect of ultrasound on preheated resin composites used as ceramic luting agents. **Dental Materials Journal**, 41(3), 451–458.
- Poubel, D. L. D. N., Da Silva, R. C., Ribeiro, A. P. D., & Garcia, F. C. P. (2024). Effect of preheating on the viscosity of composite resins. **Journal of Conservative Dentistry and Endodontics**, 27(4), 360–365.
- Powers, J. M., & Wataha, J. C. (2017). *Dental Materials: Properties and Manipulation* (11th ed.). Elsevier.
- Pratap, B., Gupta, R. K., Bhardwaj, B., & Nag, M. (2019). Resin based restorative dental materials: characteristics and future perspectives. **The Japanese Dental Science Review**, 55(1), 126.
- Price, R. B., Dérand, T., Andreou, P., & Murphy, D. (2003). The effect of two configuration factors, time, and thermal cycling on resin to dentin bond strengths. **Biomaterials**, 24(6), 1013–1021.
- Reicheneder, C. A., Gedrange, T., Lange, A., Baumert, U., & Proff, P. (2009). Shear and tensile bond strength comparison of various contemporary orthodontic adhesive systems: An in-vitro study. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, 135(4), 422–423.

- Reis, A. F., Vestphal, M., do Amaral, R. C., Rodrigues, J. A., Roulet, J. F., & Roscoe, M. G. (2017). Efficiency of polymerization of bulk-fill composite resins: a systematic review. **Brazilian Oral Research**, *31*, e59.
- Reis, A., Grandi, V., Carlotto, L., Bortoli, G., Patzlaff, R., De Lourdes Rodrigues Ac-corinte, M., & Loguercio, A. D. (2005). Effect of smear layer thickness and acidity of self-etching solutions on early and long-term bond strength to dentin. **Journal of Dentistry**, *33*(7), 549–559.
- Rickman, L. J., Padipatvuthikul, P., & Chee, B. (2011). Clinical applications of pre-heated hybrid resin composite. **British Dental Journal**, *211*(2), 63–67.
- Roberson, T. M., Heymann, H. O., & Swift, E. J. (2019). *Sturdevant's Art and Science of Operative Dentistry* (7th ed.). Elsevier.
- Rodrigues, V. A., Luz, J. N., Dantas da Silva, B. C., da Silva, N. R., Bottino, M. A., de Melo Marinho, R. M., Özcan, M., & de Assunção e Souza, R. O. (2022). Can the type of preheated resin composite influence the microtensile bond strength of ceramic restoration to human dentin? **Journal of Adhesion Science and Technology**, *36*(14), 1557–1571.
- Rojpaibool, T., & Leevailoj, C. (2017). Fracture Resistance of Lithium Disilicate Ceramics Bonded to Enamel or Dentin Using Different Resin Cement Types and Film Thicknesses. **Journal of Prosthodontics**, *26*(2), 141–149.
- Rosenstiel, S. F., Land, M. F., & Fujimoto, J. (2016). *Contemporary fixed prosthodontics* (5th ed.). Elsevier.
- Sakaguchi, R. L., & Powers, J. M. (2019). *Craig's Restorative Dental Materials* (14th ed.). Elsevier.
- Salvador, M., Alvarado, U., María, D., García, E., De Jesús, A., Guillén, P., Carlos, J., Arriaga, F., Romo Ramírez, G. F., Magdaleno, M. O., & México, S. L. P. (2020).

- Evaluation of the bond strength and marginal seal of indirect restorations of composites bonded with preheating resin. **European Journal of Dentistry**, 14(4), 644–650.
- Shahin, I., Journal, H. K.–E. D., (2021). Comparison between bond strength of lithium disilicate with preheated composite, flowable composite and resin cement. **Egyptian Dental Journal**, 2021•journals.Ekb.Eg.
- Silva, L. H. D., LIMA, E. D., Miranda, R. B. D. P., Favero, S. S., Lohbauer, U., & Cesar, P. F. (2017). Dental ceramics: a review of new materials and processing methods. **Brazilian oral research**, 31(suppl 1), e58.
- Soares, P. V., Santos–Filho, P. C. F., Martins, L. R. M., & Soares, C. J. (2008). Influence of restorative technique on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary premolars. Part I: fracture resistance and fracture mode. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, 2008•Elsevier, 99(1), 30–37.
- Suliman, A. A., Boyer, D. B., & Lakes, R. S. (1993). Cusp movement in premolars resulting from composite polymerization shrinkage. **Dental Materials**, 9(1), 6–10.
- Sundfeld, R. H., Valentino, T. A., Sversut De Alexandre, R., Briso, A. L. F., & Sundfeld, M. L. M. M. (2005). Hybrid layer thickness and resin tag length of a self-etching adhesive bonded to sound dentin. **Journal of Dentistry**, 33(8), 675–681.
- Susin, A. H., Vasconcellos, W. A., Cury Saad, J. R., & de Oliveira, O. B. (2007). Tensile bond strength of self-etching versus total-etching adhesive systems under different dentinal substrate conditions. **Brazilian Oral Research**, 21(1), 81–86.
- Tauböck, T., Tarle, Z., Marovic, D., dentistry, T. A.–J. of, & (2015). Pre-heating of high-viscosity bulk-fill resin composites: effects on shrinkage force and monomer conversion. **ElsevierTT**

- Tay, F. R., & Pashley, D. H. (2001). Aggressiveness of contemporary self-etching systems: I: Depth of penetration beyond dentin smear layers. **Dental Materials**, 17(4), 296–308.
- Tay, F. R., Pashley, D. H., Suh, B. I., Carvalho, R. M., & Itthagarun, A. (2002). Single-step adhesives are permeable membranes. **Journal of Dentistry**, 30(7–8), 371–382.
- Thompson, J. Y., Stoner, B. R., Piascik, J. R., Smith, R., & Uni, J. (2004). Adhesion/cementation to zirconia and other non-silicate ceramics: where are we now? **Dental Materials**, 2011•Elsevier, 27(1), 71–82.
- Tomaselli, L., Oliveira, D., ... J. F.–B. dental, (2019). Influence of pre-heating regular resin composites and flowable composites on luting ceramic veneers with different thicknesses. **Dental Journal**, 2019•SciELO Brasil.
- Tysowsky G. (2009). The science behind lithium disilicate: Today's surprisingly versatile, esthetic & durable metal free alternative. **Oral Health**, 99(3), 93.
- Uribe-Hernández, L., Latorre-Correa, F., Perea-Lowery, L., & Ardila, C. M. (2024). Effect of preheating and curing lamp distance on the degree of conversion of four nanohybrid resins: An in vitro study. **Journal of Clinical and Experimental Dentistry**, 16(8), e975–e983.
- Vagropoulou, G. I., Klifopoulou, G. L., Vlahou, S. G., Hirayama, H., & Michalakis, K. (2018). Complications and survival rates of inlays and onlays vs complete coverage restorations: A systematic review and analysis of studies. **Journal of Oral Rehabilitation**, 45(11), 903–920.
- Van Ende, A., De Munck, J., Lise, D. P., & Van Meerbeek, B. (2017). Bulk-Fill Composites: A Review of the Current Literature. **The Journal of Adhesive Dentistry**, 19(2), 95–110.

- Van Landuyt, K. L., De Munck, J., Mine, A., Cardoso, M. V., Peumans, M., & Van Meerbeek, B. (2010). Filler debonding & subhybridlayer failures in self-etch adhesives. **Journal of Dental Research**, 89(10), 1045–1050.
- Van Landuyt, K. L., De Munck, J., Snauwaert, J., Coutinho, E., Poitevin, A., Yoshida, Y., Inoue, S., Peumans, M., Suzuki, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2005). Monomer-solvent phase separation in one-step self-etch adhesives. **Journal of Dental Research**, 84(2), 183–188.
- Van Landuyt, K. L., Snauwaert, J., De Munck, J., Peumans, M., Yoshida, Y., Poitevin, A., Coutinho, E., Suzuki, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2007a). Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. **Biomaterials**, 28(26), 3757–3785.
- Van Landuyt, K. L., Snauwaert, J., De Munck, J., Peumans, M., Yoshida, Y., Poitevin, A., Coutinho, E., Suzuki, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2007b). Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. **Biomaterials**, 28(26), 3757–3785.
- Van Landuyt, K. L., Snauwaert, J., Peumans, M., De Munck, J., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2008). The role of HEMA in one-step self-etch adhesives. **Dental Materials**, 24(10), 1412–1419.
- Van Meerbeek, B., Dhem, A., Goret-Nicaise, M., & Braem, M. (1993). Comparative SEM and TEM Examination of the Ultrastructure of the Resin-Dentin Interdiffusion Zone. **Journal of Dental Research**, 72(2), 495–501.
- Van Meerbeek, B., Van Landuyt, K., De Munck, J., Hashimoto, M., Peumans, M., Lambrechts, P., Yoshida, Y., Inoue, S., & Suzuki, K. (2005). Technique-Sensitivity of Contemporary Adhesives. **Dental Materials Journal**, 24(1), 1–13.

- Van Meerbeek, B., Yoshihara, K., Yoshida, Y., Mine, A., De Munck, J., & Van Landuyt, K. L. (2011). State of the art of self-etch adhesives. **Dental Materials**, 27(1), 17–28.
- Willard, A., & Gabriel Chu, T. M. (2018). The science and application of IPS e.Max dental ceramic. **The Kaohsiung Journal of Medical Sciences**, 34(4), 238–242.
- Xu, T., Li, X., Wang, H., Zheng, G., Yu, G., Wang, H., & Zhu, S. (2020). Polymerization shrinkage kinetics and degree of conversion of resin composites. **Journal of Oral Science**, 62(3), 275–280.
- Yang, J., Raj, J., and, H. S.–J. of clinical, (2016). Effects of preheated composite on micro leakage—an in-vitro study. **Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR**, 2016•pmc.Ncbi.Nlm.Nih.Gov.
- Yeniad, B., Albayrak, A. Z., Olcum, N. C., & Avci, D. (2008). Synthesis and photopolymerizations of new phosphonated monomers for dental applications. **Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry**, 46(6), 2290–2299.
- Yoshihara, K., Yoshida, Y., Hayakawa, S., Nagaoka, N., Kamenoue, S., Okihara, T., Ogawa, T., Nakamura, M., Osaka, A., & Van Meerbeek, B. (2014). Novel Fluoro-carbon Functional Monomer for Dental Bonding. **Journal of Dental Research**, 93(2), 189–194.
- ساييس، سهام & البني، صفوح. (2011). *المرجع في المواد السنية*. (1st ed.). جامعة دمشق .

Abstract

Introduction: In the field of indirect restorations, the tensile bond strength of the luting agent to dentin plays a pivotal role in ensuring long-term clinical success. Recent studies have shown increasing interest in using preheated conventional composite resins as potential alternatives to traditional resin cements for luting procedures, primarily due to their improved flowability and adaptability upon heating. However, the limited depth of cure of conventional composites restricts their application in large surface or opaque restorations. To overcome this limitation, preheated bulk-fill composites—with their enhanced depth of cure and simplified application—may offer a more suitable option for luting indirect restorations.

Objective: This in vitro study aimed to compare the tensile bond strength of preheated conventional composite resin (Tetric N-Ceram) and bulk-fill composite resin (Tetric N-Ceram Bulk Fill) with resin cement (Variolink N) when used as luting agents for indirect restorations.

Materials and Methods: Thirty extracted human third molars were collected and divided into three groups ($n = 10$). The occlusal surfaces were flattened perpendicular to the long axis of the tooth. Dentin was etched with 37% phosphoric acid, followed by application of Tetric N-Bond Universal. Feldspathic ceramic blocks ($4 \times 4 \times 6$ mm) were etched with 10% hydrofluoric acid, treated with Monobond, and bonded to dentin using manual pressure. Composite resins were preheated to 69°C using an AR Heater, applied to tooth surfaces then light-cured. In the resin cement group, resin cement was mixed at room temperature and applied. All specimens underwent 1000 thermal cycles, then were tested for tensile bond strength using an Instron 1011 testing machine, and failure mode was determined using stereomicroscopy. Data were analyzed using SPSS.

Results: One-way ANOVA revealed no statistically significant differences in tensile bond strength among the three luting materials (resin cement, bulk-fill composite, and conventional composite). Similarly, no statistically significant differences were observed in failure modes among the three materials.

Conclusion: Within the limitations of this in vitro study, the results indicate that preheated composite resins, such as Tetric N-Ceram and Tetric N-Ceram Bulk Fill, demonstrated comparable tensile bond strength to conventional resin cement when used as luting agents for indirect restorations. However, further studies are necessary to evaluate additional mechanical properties and clinical performance before considering their routine use in clinical settings.

Syrian Arab Republic

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Damascus University

Faculty of Dentistry

Department of Fixed Prosthodontics



Comparison of the Tensile Bond Strength of Preheated Composite Resin and Resin Cement for Luting Indirect Restorations

(In Vitro Study)

A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirement for master's
degree in Fixed Prosthodontics Dentistry

By:

Mariam MHD Saleh Almufti

Supervisor:

Prof. Essam Jamous

2025 AD