قياس دقة الطباعة ثلاثية الأبعاد لشكلين من ملحقات الراصفات الشفافة باستخدام الهندسة العكسية وطابعة LCD.

جابر العمار* فادي خليل**

(الإيداع: 4 شباط 2026، القبول: 7 نيسان 2026)

الملخص:

الخلفية: تعتمد فعالية الراصفات الشفافة إلى حدٍّ كبير على الدقة الشكلية للملحقات التقويمية المسؤولة عن نقل القوى الميكانيكية المخططة. ومع اتساع التصنيع داخل العيادة باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، أصبح من الضروري تقويم قدرة طابعات العرض البلوري السائل (LCD) على إنتاج هذه الملحقات بدقة تقع ضمن الحدود السريرية المقبولة.

الهدف: قياس دقة الطباعة ثلاثية الأبعاد لشكلين من ملحقات الراصفات الشفافة (ملحق مستطيل أفقي وملحق مستطيل مشطوف الحواف) باستخدام طابعة LCD عند سماكة طبقة ثابتة قدرها 50 µm، وهي سماكة شائعة الاستخدام السريري، وذلك بالاعتماد على الهندسة العكسية وبرنامج Geomagic Control X.

الطرائق: أُجريت دراسة مخبرية على نموذج قاطع مركزي علوي، وصُمم عليه ملحقان رقميان. طُبع عشرون نموذجاً إجمالاً باستخدام طابعة LCD (10 لكل شكل) عند سماكة طبقة 50 µm. بعد المعالجة اللاحقة، مُسحت العينات رقمياً، ثم أُجريت المطابقة مع النموذج المرجعي في Geomagic Control X باستخدام محاذاة أولية ثم محاذاة دقيقة best–fit استندت إلى السطح الحنكي للسن المرجعي والأسطح السنية غير المتأثرة بالملحق، مع استبعاد منطقة الملحق من المحاذاة لتجنّب تحيّز القياس. حُدِّدت خمس نقاط مقارنة لكل ملحق، وحُسبت الانحرافات ثلاثية الأبعاد وقيم جذر متوسط المربعات (RMS).

النتائج: بلغ متوسط قيمة RMS للملحق المستطيل الأفقي 0.1051 مم، بينما بلغ 0.0919 مم للملحق المستطيل المشطوف. لم يُظهر اختبار t للعينات المستقلة فرقاً ذا دلالة إحصائية بين الشكلين من حيث متوسط قيم RMS (P = 0.400). في المقابل ظهرت فروق موضعية ذات دلالة إحصائية في بعض النقاط الفردية، من دون أن تنعكس على الدقة الكلية للطباعة.

الاستنتاجات: أظهرت طابعة LCD المستخدمة قدرةً جيدة على إنتاج ملحقات الراصفات الشفافة بدقة تقع ضمن الحدود السريرية المقبولة عند سماكة 50 µm. وضمن حدود هذه الدراسة المخبرية، لم يكن لاختلاف الشكل الهندسي بين الملحقين أثرٌ ذو دلالة على الدقة الكلية. وتدعم النتائج إمكان استخدام هذه الفئة منخفضة التكلفة نسبياً من الطابعات في سير العمل داخل العيادة، مع الحاجة إلى دراسات إضافية تشمل سماكات طبقية وإعدادات تشغيلية مختلفة قبل تعميم الاستنتاجات سريرياً.

الكلمات المفتاحية: الراصفات الشفافة؛ ملحقات تقويم الأسنان؛ الطباعة ثلاثية الأبعاد؛ طابعة LCD؛ الهندسة العكسية

* طالب دراسات عليا (ماجستير)، قسم تقويم الأسنان والفكين، كلية طب الأسنان، جامعة اللاذقية، سوريا

** أستاذ دكتور، قسم تقويم الأسنان والفكين، كلية طب الأسنان، جامعة اللاذقية، سوريا

Measurement of 3D Printing Accuracy for Two Clear Aligner Attachment Designs Using Reverse Engineering and an LCD Printer

Jaber Alammar* ***Fadi Khalil*****

(Received: 4 February 2026, Accepted: 7 April 2026)

Abstract:

Background: The clinical performance of clear aligners depends substantially on the geometric accuracy of auxiliary attachments that deliver the planned forces. As in-office three-dimensional (3D) printing becomes more accessible, it is important to assess whether liquid crystal display (LCD) printers can reproduce these attachments within clinically acceptable limits.

Objective: To evaluate the 3D printing accuracy of two clear aligner attachment designs (horizontal rectangular and beveled rectangular) fabricated with an LCD printer at a fixed 50 µm layer thickness, a commonly used clinical setting, using reverse engineering and Geomagic Control X software.

Methods: In this in-vitro study, two digital attachment designs were positioned on a maxillary central incisor model. Twenty models were printed with an LCD printer at a 50 µm layer thickness (10 horizontal rectangular and 10 beveled rectangular attachments). After post-processing, all specimens were digitally scanned and superimposed onto the reference model in Geomagic Control X. Initial alignment was followed by best-fit alignment based on the palatal surface and unaffected tooth surfaces, while the attachment area was excluded from the registration procedure to avoid measurement bias. Five comparison points were defined for each attachment, and three-dimensional deviations and root mean square (RMS) values were calculated.

Results: The mean RMS value was 0.1051 mm for the horizontal rectangular attachment and 0.0919 mm for the beveled rectangular attachment. An independent-samples t-test showed no statistically significant difference between the two designs regarding mean RMS values (P = 0.400). Nevertheless, some individual points exhibited localized statistically significant differences without affecting overall printing accuracy.

Conclusions: The tested LCD printer produced clear aligner attachments with deviations that remained within clinically acceptable limits at a 50 µm layer thickness. Within the limitations of this in-vitro study, attachment geometry did not significantly influence overall printing accuracy. These findings support the feasibility of cost-conscious in-office LCD printing workflows, while broader validation under different printing settings remains necessary.

Keywords: *Clear aligners; Orthodontic attachments; 3D printing; LCD printer; Reverse engineering; Geomagic Control X*

* *Master degree student, Orthodontics Department, Faculty of Dental Medicine, Lattakia University, Syria*

** *Professor, Orthodontics Department, Faculty of Dental Medicine, Lattakia University, Syria*

المقدمة

شهدت الراصفات الشفافة توسعاً ملحوظاً خلال العقد الأخير، ولاسيما لدى المرضى الذين يفضلون حلولاً أكثر قبولاً من الناحية الجمالية وأقل إزعاجاً من الأجهزة الثابتة التقليدية [1,2]. وقد ترافق هذا التوسع مع تطور البرمجيات العلاجية وازدياد القدرة على تخطيط حركات سنية أكثر تعقيداً، الأمر الذي رفع أهمية الدقة الشكلية للعناصر المساعدة المرتبطة بالراصفة، وفي مقدمتها الملحقات التقويمية.

تُعد الطباعة ثلاثية الأبعاد ركناً أساسياً في سير العمل الرقمي الحديث في تقويم الأسنان، لأنها تسمح بإنتاج نماذج وأشكال هندسية معقدة بكفاءة مادية وزمنية معقولة مقارنة بالتصنيع التقليدي [3–5]. كما أن تزايد توافر الطابعات والمواد المخصصة طبياً داخل السوق السنية شجّع التوجه نحو التصنيع داخل العيادة، وهو ما يمنح مرونة تشغيلية أكبر لكنه يفرض في المقابل ضرورة التحقق من دقة المنتجات النهائية قبل اعتمادها سريرياً.

تؤدي الملحقات دوراً حاسماً في تحسين الاحتباس وتوجيه انتقال القوى والتحكم في حركات الأسنان عند استخدام الراصفات الشفافة، وقد أصبحت تُصمم رقمياً بأشكال متعددة تبعاً لنوع الحركة المطلوبة [6,7]. لذلك فإن أي انحراف في أبعاد هذه الملحقات أو زواياها أو أسطحها قد ينعكس على كفاءة النقل الميكانيكي وعلى ملاءمة الراصفة نفسها.

من العوامل التقنية المؤثرة في جودة المطبوعات الراتنجية سماكة الطبقة (layer thickness)، لأنها تتحكم في الدقة المحورية على محور Z وتؤثر في ظاهرة التدرج الطبقي على الأسطح المائلة والحواف الدقيقة وبوجه عام فإن تقليل السماكة يحسن تمثيل التفاصيل السطحية لكنه يطيل زمن الطباعة [8,9].

إن تقييم دقة المخرجات الرقمية يتأثر بدقة وسيلة المسح نفسها،وتؤكد دراسات مقارنة على أهمية اختيار طريقة المسح الرقمي المناسبة عند تقييم الدقة البُعدية للنماذج السنية، حيث أظهر Jaber وآخرون تحولات منهجية بين المسح داخل الفم والمسح الخارجي تؤثر على الدقة النهائية [10].

أما على مستوى تقنيات الطباعة الشائعة في طب الأسنان، فتُستخدم تقنيات SLA وDLP وLCD على نطاق واسع، ولكل منها خصائص مختلفة فيما يتعلق بآلية التعريض ومصدر الضوء والدقة والسرعة والكلفة [5,11]. وقد أظهرت مقارنات منهجية بين تقنيات الطباعة أن اختلاف التقنية يؤثر على الدقة البُعدية للنماذج، مما يبرر تقييم أداء طابعات LCD في سياقنا [11,12].

انطلاقاً من ذلك، هدفت هذه الدراسة إلى تقييم قدرة طابعة LCD من الفئة المكتبية منخفضة الكلفة نسبياً على إنتاج ملحقات تقويمية دقيقة ومقبولة سريرياً عند سماكة ثابتة قدرها 50 µm. وقد اختيرت هذه السماكة لأنها من الإعدادات الشائعة في التطبيقات السنية وتوفّر توازناً عملياً بين جودة السطح وزمن الطباعة. لذلك اقتصر هذا البحث على مقارنة شكلين من الملحقات تحت هذا الإعداد فقط، من دون اختبار سماكات طبقية أخرى؛ وعليه فإن الاستنتاجات تتعلق بأداء الطابعة عند 50 µm ولا تُعمَّم تلقائياً على باقي السماكات.

تصميم الدراسة وحجم العينة (Study Design and Sample Size)

تعد هذه الدراسة دراسة تجريبية مخبرية (in–vitro study) تهدف إلى تقييم دقة الملحقات التقويمية المطبوعة بتقنية LCD عند سماكة طبقة ثابتة قدرها 50 µm. استند اختيار حجم العينة إلى التصميم المرجعي المستخدم في دراسة Topsakal وآخرين [12] بوصفها دراسة مخبرية استكشافية مماثلة؛ ولذلك ضمّت العينة 20 نموذجاً (10 عينات لكل مجموعة). ولم تكن معطيات الأثر المتوقع والانحراف المعياري المفترض مثبتة في السجل الإجرائي الأولي بما يسمح بعرض تحليل قوة إحصائية تفصيلي لاحقاً، لذا ينبغي تفسير النتائج ضمن هذا القيد المنهجي.

• المجموعة الأولى: ملحق مستطيل أفقي (Horizontal rectangular attachment).

• المجموعة الثانية: ملحق مستطيل مشطوف الحواف (Beveled rectangular attachment).

مراحل العمل

تم الحصول على النموذج الرقمي المرجعي عبر مسح نموذج Typodont باستخدام ماسح ضوئي داخل الفم من نوع coxo DL-300P intraoral scanner (COXO; Foshan COXO Medical Instrument Co., Ltd., Foshan, Guangdong, China) (الشكل 1). وقد أُدرج هذا الخيار استناداً إلى الحاجة إلى مسار رقمي موحد لجميع العينات، مع الأخذ في الحسبان أن أداة المسح نفسها قد تسهم في جزء من الخطأ المنهجي عند تفسير النتائج [10].

2- تصميم الملحقات رقمياً:

تم وضع نوعين من الملحقات على السطح الدهليزي للقاطع المركزي العلوي الأيمن:

1. الملحق المستطيل الأفقي: بأبعاد (الارتفاع 3 مم، العرض 2 مم، العمق 1 مم).

2. الملحق المستطيل المشطوف الحواف: بالأبعاد نفسها.

وتم ذلك باستخدام برنامج Maestro 3D Dental Studio (AGE Solutions S.r.l., Pisa, Italy).

3- عزل السن المرجعي رقمياً

تم فصل السن مع الملحق رقمياً ليكوّن "النموذج المرجعي" (Reference model) الذي ستتم مقارنة المخرجات المطبوعة به.

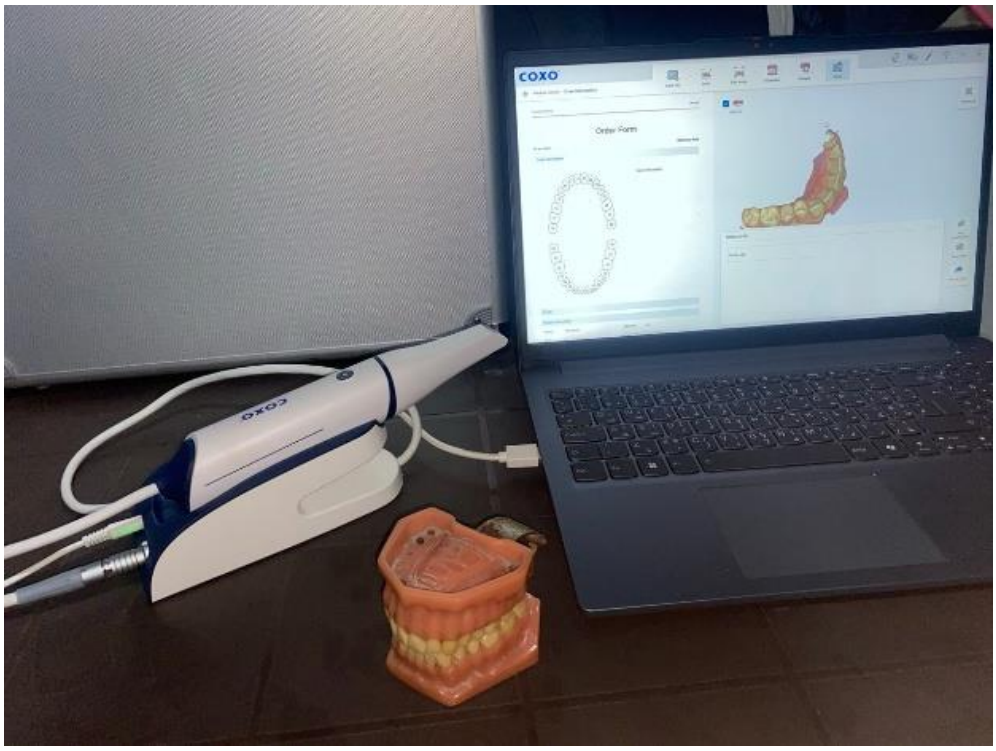
• البرامج:

Meshmixer software (Autodesk Meshmixer, v3.5.35; Autodesk, Inc., San Rafael, CA, USA).

4- عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D printing process)

تمت الطباعة باستخدام طابعة LCD من نوع Elegoo Mars 4 Ultra (الشكل 2). ووفق مواصفات الشركة المصنّعة، تتميز الطابعة بشاشة أحادية اللون 9K قياس 7 إنش، وبدقة اسمية 8520 × 4320 بكسل، ودقة XY اسمية قدرها 18 µm، وحجم بناء يبلغ 153.36 × 77.76 × 165 مم [20]. استُخدم في هذه الدراسة راتنج OM100 eSun Ortho Model Resin المخصص للنماذج التقويمية (الشكل 3). كما استُخدمت إعدادات الطباعة الظاهرة في برنامج CHITUBOX عند سماكة 50 µm (الشكل 4)، وشملت: Layer height = 0.050 mm، و2 = Bottom layer count، و Exposure time = 3.5 s، و Bottom exposure time = 70 s، و5 = Transition layer count، مع وضع Resting mode، ومسافة رفع 2 + 3 mm، وسرعة رفع 115/37.5 mm/min، وسرعة ارتداد 75/230 mm/min.

وُضعت النماذج على منصة الطباعة بوضعية أفقية (horizontal orientation) لتوحيد ظروف الطباعة وتقليل تأثير الدعامات (supports) على أسطح الملحقات المطبوعة (الشكل 5).



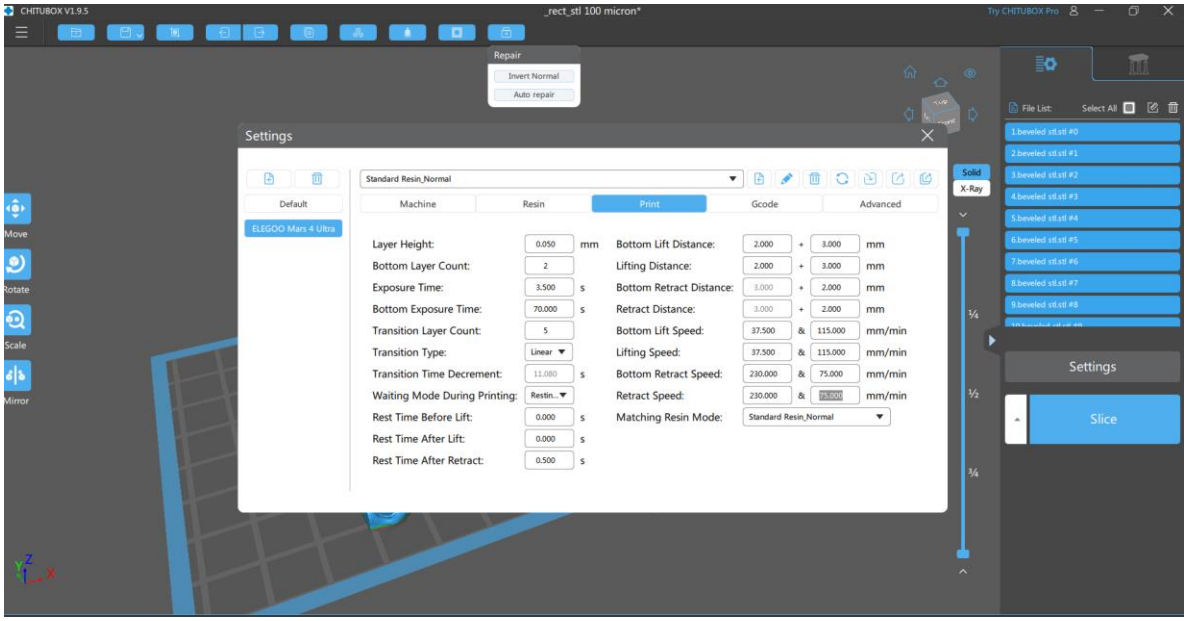
الشكل رقم (1): جهاز المسح داخل الفم المستخدم للحصول على النموذج الرقمي المرجعي



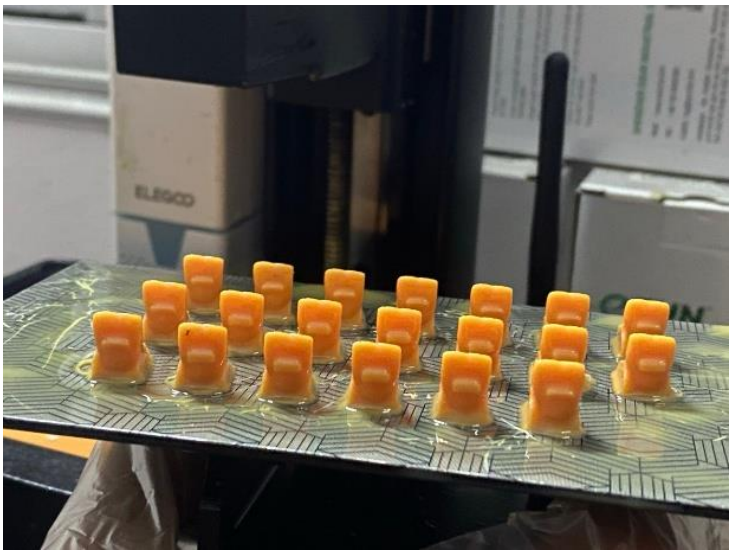
الشكل رقم (2): طابعة Elegoo Mars 4 Ultra المستخدمة في الدراسة



الشكل رقم (3): الراتنج المستخدم في الدراسة: OM100 eSun Ortho Model Resin



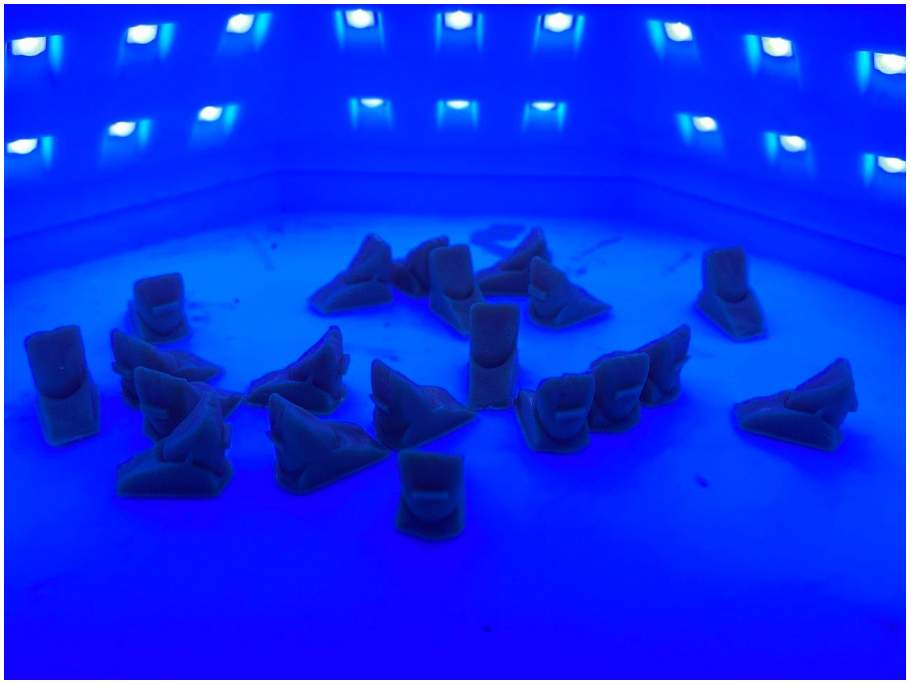
الشكل رقم (4): إعدادات الطباعة المستخدمة في برنامج CHITUBOX عند سماكة 50 µm



الشكل رقم (5): العينات المطبوعة بوضعية أفقية على منصة الطباعة

المعالجة بعد الطباعة (Post-processing)

بعد انتهاء الطباعة خضعت جميع العينات لبروتوكول تنظيف ومعالجة لاحقة موحد لإزالة بقايا الراتنج غير المتصلب، ثم لتجفيف هوائي ومعالجة نهائية بالأشعة فوق البنفسجية.





الشكل رقم (6): غسل العينات في كحول أيزوبروبيل 99.8% بعد الطباعة والمطبوعات ضمن وحدة التصليب الضوئي بالأشعة فوق البنفسجية

1 . الغسل في كحول أيزوبروبيل (Isopropyl alcohol 99.8%) لمدة 10 دقائق.(الشكل 6).

2. بعد الغسل، جُففت العينات بالهواء المضغوط ثم تُركت لتجفف هوائياً حتى التبخر الكامل للمذيب ولمدة 30 دقيقة قبل التصليب النهائي؛ وذلك انسجاماً مع الإرشادات العملية المتبعة في ما بعد معالجة المطبوعات الراتنجية لتجنب بقاء IPA على السطح قبل التعريض الضوئي [21].

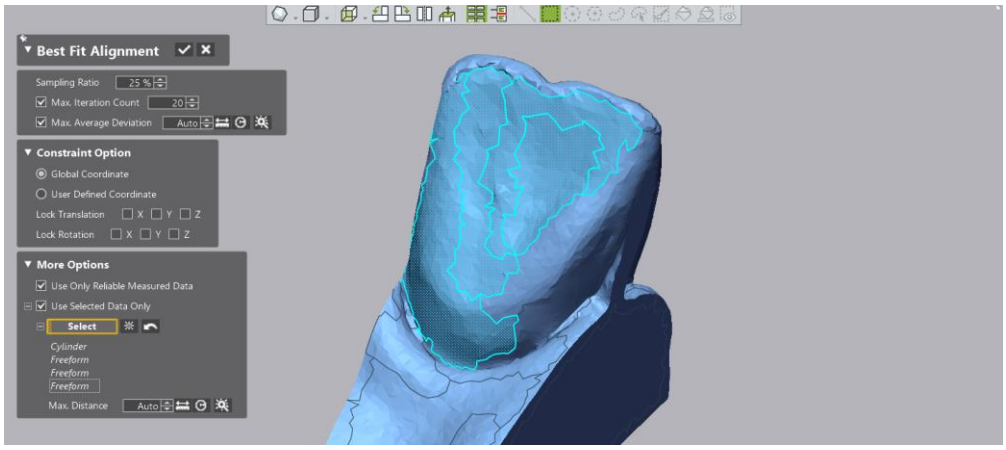
3. وحدة تصليب ضوئي بالأشعة فوق البنفسجية استُخدمت لإجراء التصليب النهائي بعد الطباعة. واعتُمدت في هذه الدراسة مواصفات تشغيلية عملية ملائمة لتصليب الراتنجات السنية المطبوعة، شملت مجالاً موجياً تقريبياً 405 nm واستطاعة تشغيلية 60 واط، مع زمن تصليب نهائي موحد قدره 20 دقيقة لجميع العينات.(الشكل 6).

المسح الرقمي والمطابقة (Digital scanning and superimposition)

تم مسح جميع العينات المطبوعة (n=20) باستخدام الماسح نفسه للحصول على النماذج المختبرة (test models)، ثم استيراد الملفات المرجعية والمطبوعة إلى برنامج Geomagic Control X 2020. أُجريت المطابقة على مرحلتين متتاليتين من أجل الحد من تحيز التسجيل وحصر القياس في منطقة الملحق.

1. المحاذاة الأولية (Initial alignment): لوضع النموذجين ضمن المجال الإحداثي نفسه.

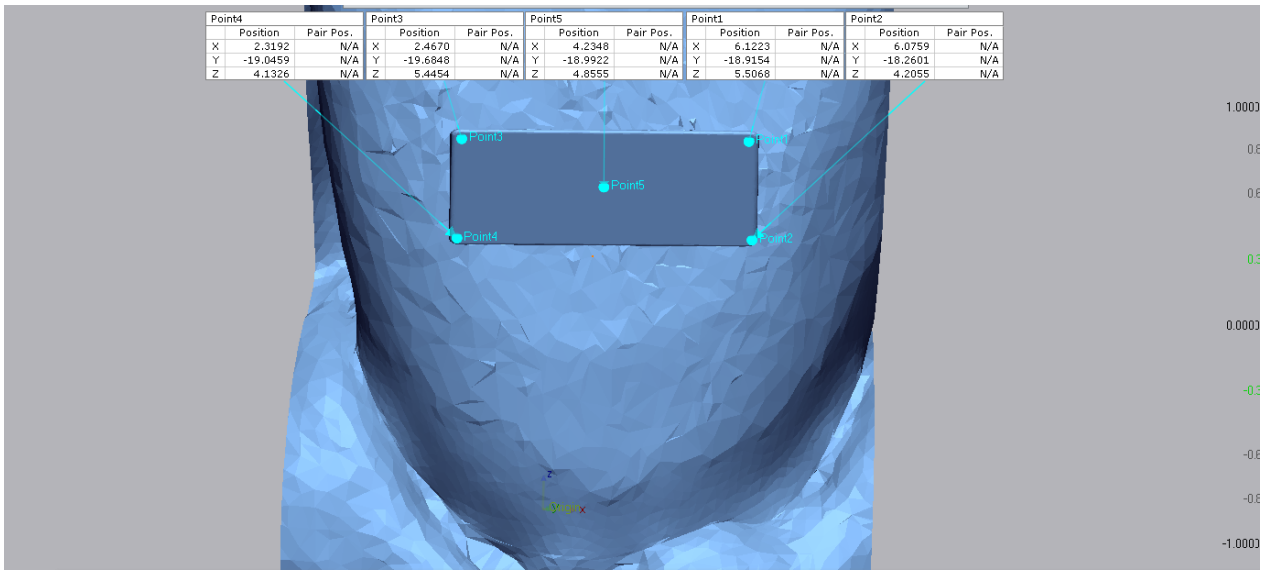
2. المحاذاة الدقيقة (Best-fit alignment): اعتمدت على مطابقة السطح الحنكي للسن المرجعي مع السطح الحنكي المناظر في النموذج الممسوح، مع الاستفادة من الأسطح السنية غير المتأثرة بالملحق، في حين استُبعدت منطقة الملحق من التسجيل لتجنب انحياز القياس في العنصر المراد تقييمه نفسه (الشكل 7).



الشكل رقم (7): السطح الحنكي المعتمد في المطابقة الدقيقة مع استبعاد منطقة الملحق من التسجيل

تحليل البيانات والقياسات (Data analysis and measurements)

لتقييم الدقة، حُددت خمس نقاط مقارنة على كل ملحق كما في الدراسة المرجعية لـ Topsakal وآخرين [12]: الزاوية العلوية اليمنى (UR)، والزاوية العلوية اليسرى (UL)، والزاوية السفلية اليسرى (LL)، والزاوية السفلية اليمنى (LR)، ونقطة المركز (Center). ثم حُسب الانحراف ثلاثي الأبعاد لكل نقطة، واستخرجت قيمة جذر متوسط المربعات (RMS) لكل عينة بوصفها مؤشراً على الانحراف الكلي للملحق المطبوع عن التصميم الأصلي. وقد استُخدم هذا النهج النقطي لتسهيل المقارنة المباشرة مع الدراسة المرجعية، مع الإقرار بأن غياب خرائط انحراف سطحية كاملة لجميع العينات يمثل أحد حدود هذا العمل (الشكل 8).



الشكل رقم (8): تحديد نقاط المقارنة في برنامج Geomagic Control X

الطرائق الإحصائية (Statistical methods)

استُخدم برنامج SPSS الإصدار 26 (IBM Corp., Chicago, IL, USA) لإجراء التحليلات الإحصائية. تم اختبار التوزيع الطبيعي للبيانات باختبار Kolmogorov–Smirnov، كما استُخدم اختبار Levene للتحقق من تجانس التباين. وبعد التأكد من ملاءمة البيانات للاختبارات المعلمية، استُخدم اختبار t للعينات المستقلة (independent-samples t-test) لمقارنة متوسطات انحرافات النقاط المقاسة وقيم RMS بين الملحق المستطيل والملحق المستطيل المشطوف.

اعتُمد مستوى دلالة $\alpha = 0.05$ عند فاصل ثقة 95%، كما أُشير إلى الدلالة الأعلى عند $\alpha = 0.01$ حيثما انطبق ذلك.

النتائج

1 اختبار كولموغوروف سميرنوف لتجانس البيانات

يبين الجدول 1 نتائج اختبار Kolmogorov–Smirnov، ويظهر أن قيم الدلالة لجميع المتغيرات كانت أكبر من 0.05، مما يشير إلى عدم وجود انحراف معنوي عن التوزيع الطبيعي ويبرر استخدام الاختبارات المعلمية اللاحقة.

الجدول رقم (1): اختبار التوزيع الطبيعي

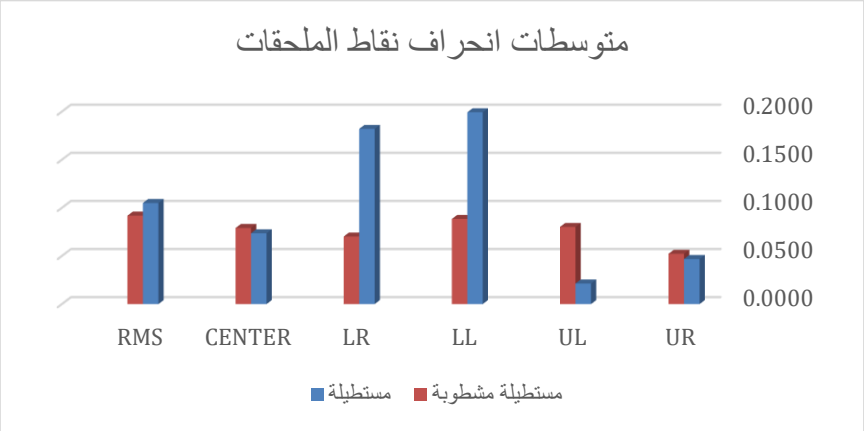
نوع التوزيع	Sig.	قيمة الاختبار	القياس
طبيعي	0.119	0.173	UR
طبيعي	0.154	0.165	UL
طبيعي	0.181	0.162	LL
طبيعي	0.184	0.161	LR
طبيعي	0.200	0.145	CENTER
طبيعي	0.090	0.180	RMS

2- الإحصاءات الوصفية

يبين الجدول 2 الإحصاءات الوصفية المتعلقة بحجم العينة والقيم العليا والدنيا والوسط الحسابي والانحراف المعياري للنقاط المقاسة. وقد سُجل أكبر انحراف عند النقطة LR للملحق المستطيل، في حين سُجل أصغر انحراف عند النقطة UL للملحق المستطيل المشطوف.

الجدول رقم (2): الإحصاءات الوصفية المتعلقة بانحرافات نقاط الملحقة المستطيلة والمستطيلة المشطوبة

القيمة العليا	القيمة الدنيا	الانحراف المعياري	المتوسط	العدد	الشكل	القياس
0.1219	0.0043	0.03573	0.0468	10	مستطيل	UR
0.0835	0.0151	0.02436	0.0523	10	مستطيل مشطوف	UR
0.0591	0.0040	0.02117	0.0214	10	مستطيل	UL
0.2595	0.0011	0.07972	0.0802	10	مستطيل مشطوف	UL
0.2558	0.0988	0.05308	0.1993	10	مستطيل	LL
0.2596	0.0154	0.08023	0.0885	10	مستطيل مشطوف	LL
0.2919	0.01411	0.08863	0.1820	10	مستطيل	LR
0.2160	0.0043	0.07564	0.0702	10	مستطيل مشطوف	LR
0.2059	0.0042	0.05482	0.0736	10	مستطيل	CENTER
0.1600	0.0026	0.05554	0.0791	10	مستطيل مشطوف	CENTER
0.1632	0.0798	0.02304	0.1051	10	مستطيل	RMS
0.2010	0.0492	0.04226	0.0919	10	مستطيل مشطوف	RMS



الشكل رقم (9): متوسطات انحراف نقاط الملحقات المستطيلة والمستطيلة المشطوبة

3 فروقات متوسطات انحرافات النقاط المقاسة بين الملحقة المستطيلة والمستطيلة المشطوبة.

أُجري اختبار t للعينات المستقلة لمقارنة متوسطات انحرافات النقاط المقاسة بين الملحق المستطيل والملحق المستطيل المشطوف، ويبين الجدول 3 نتائج هذا الاختبار.

الجدول رقم (3): نتائج اختبار (independent Samples T–test) لمقارنة أهمية فروقات متوسطات انحرافات النقاط المقاسة.

القرار الإحصائي	P-value	خطأ الفرق المعياري	فرق المتوسطات	درجات الحرية	قيمة t	القياس
غير معنوي	0.697	0.01368	0.00541-	18	0.396-	UR
معنوي	0.047	0.02608	0.05877-	10.263	2.253-	UL
معنوي	0.002	0.03042	0.11084	18	3.644	LL
معنوي	0.007	0.03685	0.11179	18	3.034	LR
غير معنوي	0.825	0.02468	0.00554-	18	0.224-	CENTER
غير معنوي	0.400	0.015220	0.013120	18	0.862	RMS

أظهرت النتائج وجود فرق ذي دلالة إحصائية عند النقطة UL بين الشكلين عند مستوى ثقة 95%، وكان متوسط الانحراف في هذه النقطة أكبر في الملحق المستطيل المشطوف.

كما ظهرت فروق ذات دلالة إحصائية عند النقطتين LL وLR عند مستوى ثقة 99%، وكان متوسط الانحراف أكبر في الملحق المستطيل. ومع ذلك، لم تظهر فروق ذات دلالة في بقية النقاط ولا في قيمة RMS الكلية، وهو ما يشير إلى أن الاختلافات الموضعية لم تنعكس على الدقة الكلية للطباعة ضمن شروط هذه الدراسة.

المناقشة

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم دقة تصنيع نوعين من ملحقات الراصفات الشفافة (المستطيل الأفقي والمستطيل المشطوف الحواف) باستخدام طابعة عرض بلوري سائل (LCD) مكتبية عالية الدقة عند سماكة طبقة ثابتة تبلغ 50 µm، وذلك من منظور عملي يركز على مدى قدرة هذا النوع من الطابعات على إنتاج ملحقات دقيقة ومقبولة سريرياً داخل بيئة تصنيع داخل العيادة.

أظهرت النتائج الرئيسة أن دقة الطباعة الكلية (RMS) لكلا المجموعتين بقيت ضمن نطاق ضيق، إذ بلغ متوسط الانحراف 0.1051 مم للملحق المستطيل الأفقي و0.0919 مم للملحق المستطيل المشطوف الحواف. والأهم أن اختبار t للعينات المستقلة لم يُظهر فرقاً ذا دلالة إحصائية بين المجموعتين في متوسط RMS (P = 0.400)، ما يشير إلى أن اختلاف الشكل الهندسي البسيط بين النموذجين لم ينعكس على الدقة الكلية للطباعة ضمن شروط هذه الدراسة.

أولاً: دقة طابعة العرض البلوري السائل (LCD)

تشير هذه النتائج إلى أن طابعة Elegoo Mars 4 Ultra، بصفتها نموذجاً من فئة طابعات LCD المكتبية منخفضة التكلفة نسبياً، قادرة على إنتاج ملحقات تقويمية بدقة تقع ضمن الحد السريري المقبول في الأدبيات لطباعة النماذج السنية، أي أقل من 0.25 مم [15–18]. وتكتسب هذه النتيجة أهمية تطبيقية لأنها تدعم مبدأ التصنيع داخل العيادة للراصفات وملحقاتها عندما تُضبط ظروف الطباعة والمعالجة اللاحقة بصورة متجانسة.

وتنسجم هذه الملاحظة مع الأدبيات التي تشير إلى أن طابعات LCD الحديثة ذات الشاشات عالية الدقة قادرة على تقديم دقة بعدية جيدة في التطبيقات السنية، وإن كانت المقارنات المباشرة مع DLP لا تزال تُظهر في بعض الحالات أفضلية طفيفة لصالح التقنية الأخيرة تبعاً للمادة والإعدادات المستخدمة [14]. وفي السياق العملي، فإن انخفاض كلفة الاقتناء والتشغيل النسبي لهذه الفئة من الطابعات يجعلها خياراً جذاباً للعيادات الراغبة في توسيع التصنيع داخل العيادة للراصفات الشفافة.

ثانياً: تأثير الشكل الهندسي للملحق

لم يظهر اختلاف ذو دلالة إحصائية في قيمة RMS الكلية بين الملحق المستطيل والملحق المستطيل المشطوف، رغم وجود فروق موضعية عند بعض الزوايا. ويشير ذلك إلى أن تعقيد الشكل الهندسي ضمن الحدود المدروسة لم يكن كافياً لإحداث فرق شامل في الدقة النهائية، وربما يعود ذلك إلى اجتماع سماكة طبقة صغيرة نسبياً مع دقة أفقية مرتفعة للطابعة المستخدمة، ما خفف من أثر ظاهرة التدرج الطبقي على الحواف المشطوفة [8,12].

ومع ذلك، فإن عدم ظهور فرق في RMS الكلي لا يعني بالضرورة تطابق السلوك الوظيفي لكلا الشكلين في جميع الظروف السريرية. فالتوزع الموضعي للخطأ قد يبقى مهماً عندما تكون الحركة المطلوبة شديدة الحساسية لشكل الملحق أو اتجاه سطحه الفعّال، وهو ما يستدعي تفسير النتائج على ضوء الوظيفة الميكانيكية للملحقات لا على أساس المتوسط الكلي وحده و تُشير مراجعات حديثة إلى أن تصميم الملحقات يؤثر على نقل القوى وسلوك الراصفة، لذا فإن الفروق الموضعية التي لوحظت قد تكون ذات دلالة وظيفية في بعض الحالات [18,19].

ثالثاً: الدلالة السريرية للفروق الموضعية لوحظ في هذه الدراسة وجود فروقٍ إحصائية موضعية في بعض النقاط، ولا سيما عند LL وLR، مع غياب أثر معنوي على RMS الكلي. وتوحي هذه النتيجة بأن بعض الحواف أو الزوايا قد تكون أكثر حساسية للتدرج الطبقي أو لتأثير الاتجاه الطباعي والدعامات، إلا أن هذا الأثر الموضعي لم يكن كافياً لإحداث تدهور في الدقة العامة للملحق. وفي ضوء المراجعات الحديثة حول تأثير الملحقات والوسائل المساعدة في سلوك الراصفات، قد تكتسب هذه الفروق الموضعية أهمية وظيفية في سيناريوهات معينة تتعلق بنقل القوى أو الاحتباس، لكنها لا تسمح وحدها باستنتاج خلل سريري عام ما دام الانحراف الكلي ضمن الحدود المقبولة [19]. من ثم، فإن هذه الدراسة لا تدّعي الحكم على الأداء السريري المباشر للملحقات المطبوعة، وإنما تقيس قدرة هذا النوع من الطابعات على إنتاج ملحقات دقيقة ومقبولة سريرياً من الناحية البعدية. وعليه، يمكن النظر إلى النتائج بوصفها داعمة لتشجيع التصنيع داخل العيادة للراصفات وملحقاتها باستخدام طابعات LCD منخفضة التكلفة نسبياً، شريطة الانتباه إلى أن التحقق النهائي من الكفاءة السريرية يتطلب دراسات إضافية تربط الدقة البعدية بنقل القوى وملاءمة الراصفة والنتائج العلاجية الفعلية [19,21].

نقاط القوة والضعف تكمن قوة هذه الدراسة في تركيزها على طابعة LCD مكتبية شائعة ومنخفضة التكلفة نسبياً، وعلى إعداد طبقي عملي شائع الاستخدام سريرياً (50 µm)، مع اعتماد بروتوكول موحد للطباعة والمعالجة والقياس. كما أن توضيح المطابقة على السطح الحنكي واستبعاد منطقة الملحق من التسجيل يعزز اتساق القياس. في المقابل، تشمل حدود الدراسة طبيعتها المخبرية، وعدم مقارنة سماكات طبقية أخرى، والاعتماد على تحليل نقطي دون خرائط سطحية كاملة لجميع العينات، إضافة إلى أن بعض تفاصيل التشغيل اللاحق لم تكن موثقة رقمياً منذ البداية بوصفها متغيرات مستقلة.

الاستنتاجات

بناءً على نتائج هذه الدراسة، يمكن استخلاص الاستنتاجات الآتية:

1- أظهرت طابعة LCD المستخدمة من نوع Elegoo Mars 4 Ultra قدرة جيدة على تصنيع ملحقات الراصفات الشفافة بدقة كلية تقارب 0.1 مم، وهي قيمة تقع ضمن الحدود المقبولة سريرياً في الأدبيات ذات الصلة.

2- لم يظهر فرق ذو دلالة إحصائية في دقة الطباعة الكلية بين الملحق المستطيل الأفقي والملحق المستطيل المشطوف الحواف عند استخدام سماكة طبقة ثابتة قدرها 50 µm.

3- تدعم نتائج هذه الدراسة إمكانية الاستفادة من طابعات LCD المكتبية منخفضة التكلفة نسبياً في سير العمل داخل العيادة لإنتاج ملحقات دقيقة للراصفات الشفافة، مع بقاء الحاجة إلى دراسات إضافية تشمل سماكات طبقية مختلفة وإعدادات تشغيلية ومعالجة لاحقة أكثر تفصيلاً.

وبذلك فإن هذه الدراسة تدعم مبدأ التصنيع داخل العيادة للراصفات وملحقاتها عندما تُضبط ظروف الطباعة والمعالجة بصورة متجانسة، لكنها لا تدّعي وحدها كفاية الدليل لاعتماد جميع الطابعات أو جميع الإعدادات على نحو سريري مطلق.

المقترحات

بناءً على نتائج هذه الدراسة، يُقترح إجراء دراسات مستقبلية تقارن بين سماكات طبقية مختلفة، وتختبر أثر اتجاه الطباعة والدعامات وبروتوكول المعالجة اللاحقة، مع إضافة خرائط انحراف سطحية كاملة وربط النتائج المورفولوجية بمخرجات سريرية أو ميكانيكية تتعلق بملاءمة الراصفة ونقل القوى.

References

1. Ke Y, Zhu Y, Zhu M. A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies. BMC Oral Health. 2019;19(1):24.

2. Kuncio DA, Maganzini AL, Shelton C, Freeman K. Invisalign and traditional orthodontic treatment postretention outcomes compared using the American Board of Orthodontics Objective Grading System. Angle Orthod. 2007;77(5):864-869.

3. Gibson I, Rosen DW, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer; 2010.

4. Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing. Munich: Hanser Publishers; 2011.

5. Revilla-Leon M, Ozcan M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry. J Prosthodont. 2019;28(2):146-158.

6. Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C. Treatment outcome and efficacy of an aligner technique regarding incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. BMC Oral Health. 2014;14:68.

7. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009;135(1):27-35.

8. Dizon JRC, Espera AH Jr, Chen Q, Advincula RC. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Addit Manuf. 2018;20:44-67.

9. You SM, You SG, Kang SY, Kim JH. Evaluation of the accuracy of the three-dimensional printed dental models manufactured with different layer thicknesses. J Prosthet Dent. 2020;123(1):135-142.

10. Jaber ST, Hajeer MY, Alkhouli KW, Al-Shamak RM, Darwich KMA, Aljabban O, et al. Evaluation of three-dimensional digital models formulated from direct intra-oral scanning of dental arches in comparison with extra-oral scanning of poured dental models in terms of dimensional accuracy and reliability. Cureus. 2024;16(2):e54869.

11. Jaber ST, Hajeer MY, Khattab TZ, Mahaini L. Evaluation of the fused deposition modeling and the digital light processing techniques in terms of dimensional accuracy of printing dental models used for the fabrication of clear aligners. Clin Exp Dent Res. 2021;7(4):591-600.

12. Topsakal KG, Gokmen S, Yurdakurban E, Duran GS, Gorgulu S. The effect of layer thickness on the accuracy of the different in-house clear aligner attachments. Clin Oral Investig. 2023;27(9):5331-5341.

13. Al-Imam H, Gram M, Benetti AR, Gotfredsen K. Accuracy of stereolithography additive casts used in a digital workflow. J Prosthet Dent. 2018;119(4):580-585.

14. Tsolakis IA, Papaioannou W, Papadopoulou E, Dalampira M, Tsolakis AI. Comparison in terms of accuracy between DLP and LCD printing technology for dental model printing. Dent J (Basel). 2022;10(10):181.

15. Bell A, Ayoub AF, Siebert P. Assessment of the accuracy of a three-dimensional imaging system for archiving dental study models. J Orthod. 2014;41(4):319-327.

16. Hazeveld A, Slater JJRH, Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2014;145(1):108-115.

17. Hassan WNW, Yusoff Y, Mardi NA. Comparison of reconstructed rapid prototyping models produced by three-dimensional printing and conventional stone models with different degrees of crowding. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2017;151(1):209-218.

18. Halazonetis DJ. Acquisition of 3-dimensional shapes from images. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2001;119(5):556-560.

19. Alam MK, Hajeer MY, Shqaidef A, Alswairki HJ, Alfawzan AA, Shrivastava D, et al. Impact of various aligner auxiliaries on orthodontic activity: a systematic review and network meta-analysis. Saudi Dent J. 2024;36(2):199-207.

20ELEGOO. Mars 4 Ultra 9K resin 3D printer specifications [Internet]. Available from: https://www.elegoo.com/products/elegoo-mars-4-ultra-msla-resin-3d-printer-with-9k-mono-lcd. Accessed 2026 Apr 3.

21. Formlabs. Using BioMed Clear Resin [Internet]. Available from: https://support.formlabs.com/s/article/Using-BioMed-Clear-Resin?language=en_US. Accessed 2026 Apr 3.