ترميم الفقود العظمية للفك السفلي باستخدام التخطيط الجراحي الرقمي ثلاثي الأبعاد وزرعات البولي إيثر إيثر كيتون (PEEK)

خلدون درويش*

الملخص

خلفية البحث وهدفه: يمثل ترميم التخربات الواسعة للفك السفلي بعد استئصال الأورام، أو الرضوض، أو التشوهات أحد أصعب التحديات التي تواجه جراحي الوجه والفم والفكين. تاريخياً اِسْتُخْدِمَ العديد من أنواع الطعوم العظمية الذاتية، أو بدائل العظم لمعالجة هذه النوع من الفقود العظمية. الـ PEEK (بولي إيثر إيثر كيتون) هو عبارة عن بوليمر خطي نصف بللوري عطري متعدد يقدم مزيجًا ممتازًا من القوة، والصلابة، والمتانة، والمقاومة للتأثيرات الحيوية المحيطة. أظهرت الدراسات الحديثة على التقبل الحيوي لهذه المادة إمكانية استخدامها بنجاح في معالجة أمراض الأقراص المفصلية في العمود الفقري الرقبي. عُرِضَتْ في هذه المقالة حالة فقد عظمي واسع في الفك السفلي عُوْلَجَتْ باستخدام زرعة مصمَّمة نوعياً من مادة PEEK. إذْ كانت نتائج المعالجة ممتازة بعد العمل الجراحي على صعيدي الشكل والوظيفة دون حدوث أية اختلاطات كالإنتان، أو الرفض المناعي.

الاستنتاجات: بالنظر إلى أنَّ هذه المادة قابلة للتصنيع بشكل مخصص ونوعي لكل حالة، وكونها قابلة للتطبيق بسهولة خاصة بالاستعانة بتقنيات التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد، وأنّها خاملة حيوياً، وغير مسامية، فإنَّها تمثل مادة مثالية للاستخدام في إعادة بناء التخربات والفقود العظمية في المنطقة الوجهية الفكية.

كلمات المفتاحية: تخربات الفك السفلي، إعادة بناء الفك السفلي، البولي إيثر إيثر كيتون

* أستاذ مساعد في قسم جراحة الفم و الوجه و الفكين كلية طب الأسنان – جامعة دمشق

RECONSTRUCTION OF MAMDIBULAR BONE DEFECTS USING 3D SURGICAL DIGITAL PLANNING AND POLYETHERETHERKETONE (PEEK) IMPLANTS

Khaldoun Darwich*

Abstract

Aim of The Study : Reconstruction of mandibular defects after trauma or tumor resection is one of the most challenging problems facing maxillofacial surgeons. Historically various autografts and alloplastic materials have been used in the reconstruction of these types of defects. Polyetheretherketone (PEEK) is a semicrystalline polyaromatic linear polymer exhibiting an excellent combination of strength, stiffness, durability, and environmental resistance. Recent investigations of PEEK as a biomaterial resulted in the successful treatment of cervical disk disease. We describe a case of mandibular trauma patient whose defect was reconstructed using customized PEEK implant. The treatment had excellent postoperative aesthetic and functional results without complications such as infections or extrusion.

Conclusion : Because PEEK implants are customizable, easily workable especially with help of 3D virtual planning techniques, bioinert, and nonporous, they represent an ideal alloplastic material for maxillofacial reconstruction..

Keywords—Mandibular defect; Mandibular reconstruction; PEEK

* Associate Professor – Oral and Maxillofacial Surgery Faculty of Dentistry – Damascus University

المقدمة :

يعدُّ الفك السفلي عنصراً أساسياً في مظهر الوجه البشري إذْ يعطي الشكل المميز للوجه، ويحدّد إطار ثلثه السفلي. كما يعدُّ الفك السفلي أكبر وأقوى عظام الهيكل الوجهي على الإطلاق، وهو يأخذ شكل حرف U ويحمل الأسنان السفلية[1].

يؤدي الفك السفلي دوراً أساسياً في حماية المجاري التنفسية ودعم اللسان والأسنان السفلية وعضلات قاع الفم ممَّا يسمح بإنجاز وظائف المضغ، الكلام والتنفس. تعدُّ إعادة بناء الفك السفلي بعد الرضوض أو الاستئصالات الورمية إحدى أهم المشاكلات والتحديات التي تواجه جراحي الوجه، والفم، والفكين، إذْ يؤدي أي تشوه في العظم إلى مشاكلات تجميلية و وظيفية، ويرتبط حجم العجز الوظيفي الناجم عن الاستئصال ارتباطاً كبير بحسب حجم الأجزاء المستأصلة[2] وشكلها وموقعها. يسبّب فقد استمرارية العظم إلى انحراف الفك السفلي باتجاه الجزء المستأصل بسبب الشد الناجم عن عضلات المضغ المتبقية، وانكماشات الأنسجة الرخوة فضلاً عن تشكل الندب الجراحية[3،4].

عند إجراء إعادة بناء الفك السفلي يجب عدم اعتبار إعادة استمرارية العظم وحده معيار نجاح إذْ يجب استعادة وظائف المضغ، والبلع والنطق. الهدف الأساسي لإعادة بناء الفك السفلي هو محاولة إعادة المريض إلى حالته الوظيفية السابقة.

يهدف ترميم الفك السفلي إلى اقتراح نموذج لاستعادة البنية التشريحية والوظيفية للفك وتنفيذها وكذلك الاستقرار النفسي للمريض، إذْ يمكن أن ينتج هذا الفقد عن أسباب خلقية، أو حوادث، أو أمراض أو أورام[5،6] .

عادة ما تجري عملية تعويض الفقد الناجم عن استئصال جزء من الفك السفلي مباشرة في أثناء العمل الجراحي عن طريق تكييف صفائح التيتانيوم الجاهزة وتثبيتها وهو ما يستلزم وقتاً وجهداً كبيرين من قبل الجراح، وإطالة كبيرة لزمن العمل الجراحي، ويرتبط هذا الإجراء باختلاطات عدّة منها الانكشاف التالي للصفيحة، والالتهابات الثانوية اللاحقة[7].

يعتمد نجاح الجراحة الترميمية للفك السفلي على التقييم المسبق للفقد، وتصميم النموذج التعويضي وتصنيعه بشكل دقيق، وكذلك على إتقان العمل الجراحي[7].

في سياق ذلك، تُسْتَخْدَمُ عدة مواد عدّة في تصنيع النماذج التعويضية، ولكن الأكثر استخداماً هي الإكريليات مثل البولي ميتيل ميتا أكريليت (PMMA)، أو النماذج التعويضية المصنعة من الطعوم العظمية، أو مواد بدائل العظم مثل الهيدروكسي أباتيت[8]. ولكن لكل طريقة مشكلاتها واختلاطاتها، إذْ تظهر الطعوم العظمية الذاتية نسباً مختلفة من الامتصاص العظمي، واختلاطات السرير المعطي[9]، في حين تعاني النماذج المصنوعة من المواد الإكريلية من احتمالات الإنتان والرفض المناعي، كما أنَّ بدائل العظم الاسمنتية مثل الهيدروكسي أباتيت تعدُّ صعبة التكييف والنمذجة وتستهلك وقتاً طويلاً لذلك في أثناء العمل الجراحي[10]. وبسبب تلك المساوئ الموصوفة سابقاً فإنَّ البحث ظلَّ مستمراً عن مادة التعويض المثالية، وكانت مادة الـ PEEK إحدى تلك المواد المرشحة [11]. الـ PEEK، وهو اختصار لـ Polyetheretherketone (بولي إيثر إيثر كيتون) هو عبارة عن بوليمر خطي نصف بللوري عطري متعدد يقدم مزيجًا ممتازًا من القوة، والصلابة، والمتانة، والمقاومة للتأثيرات الحيوية المحيطة. ولتلك الأسباب استخدمت هذه المادة على نطاق واسع في مجالات الطيران وصناعة السيارات والصناعات الكهربائية منذ أكثر من عشرين عاماً.

حديثاً أُثْبِتَ من خلال بحوث عدّة التوافق الحيوي لمادة PEEK، وبناء على ذلك بُدِءَ بتطبيق المادة في المجال

الطبي[12،13] ولاقت نجاحاً في استخدامها في جراحة اضطرابات العمود الفقري الرقبي[14،15،16]، ولم تُسْتَخْدَمْ استخداماً كبيراً وموثقاً في ترميم الفقود العظمية في المنطقة الفكية الوجهية إلَّا من خلال بعض من تقارير الحالات المنشورة خاصة في منطقة الحجاج[17]. ولكن يعدُّ استخدام هذه المادة بالمشاركة مع تقنيات التخطيط الرقمي الافتراضي ثلاثي، الأبعاد والنمذجة النوعية لزرعات تتوافق مع شكل الفقد العظمي (زرعات نوعية للمريض Patient specific implants PSIs) في المنطقة الوجهية الفكية مبشراً وواعداً.

إذْ إنَّه بالنظر إلى أنَّ مادة PEEK تتميز بصفات الصلابة، والثبات، والتقبل الحيوي، وسهولة التعامل معها فإنَّ استخدامها في الجراحة الترميمية للمنطقة الوجهية الفكية سوف يلقى رواجاً كبيراً [18].

سمح التقدم في التصوير الطبي مثل التصوير المقطعي المحوسب، والتصوير بالرنين المغناطيسي بإنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد للأنسجة التشريحية لعدة استخدامات طبية، بما فيها تصميم النماذج التعويضية الجراحية[19].

في حالة ترميم الفك السفلي، تتمتع طرائق التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسب بإيجابيات عدّة، إذْ إنَّها تلائم تماماً المنطقة التشريحية، كما أنَّها تقلل زمن العمل الجراحي، وتنتج مظهراً تجميلياً مناسباً بشكل أكبر. من جهة أخرى، تحتاج الطرائق اليدوية لوقت أكبر في عملية التصميم في حين أنَّ نجاحها يعتمد على مهارة الجراح اعتماداً كبيراً[8].

حديثاً، اِقْتُرِحَ أنَّ يُنَفَّذَ العمل الجراحي في بيئة افتراضية مقترحة تحاكي الحالة المرضية، من ثم تَقَيَّمُ العملية التعويضية حاسوبياً بالاعتماداً على طرائق تحليل رقمية، مثل تقنية العناصر المنتهية، وهو ما يؤمل أن يخفف آلام المريض، ويوفر وقت الجراح ويزوده بآفاق عمل عن المنطقة التشريحية وعن الطرائق المثلى لمعالجتها.

يُنْتَجُ النموذج ثلاثي الأبعاد للفك السفلي انطلاقاً من الصور الطبقية المحورية باستخدام برنامج معالجة الصورة Mimics، بعدها تُضَافُ الشروط الحدية، وخواص المواد الحقيقية إلى النموذج، وعندها يمكن دراسة الفك السفلي ضمن ظروف عدّة من قوى التحميل مثل العض الثابت، والعض المتجانس، أو العض أحادي الجانب. من الممكن إجراء القطوع العظمية، وتثبيت الصفائح العظمية بطريقة مشابهة أيضاً [20].

بالنتيجة تُخَمَّنُ الإجهادات والانزياحات في النموذج استجابة لتطبيق قوى التحميل المختلفة، وتعدُّ هذه المعطيات مفيدة للجراحين بغية التخطيط الفعال للترميم الجراحي[21].

تقرير الحالة:

أُجْرِيَتِ المعالجة على مريض بعمر 25 سنة مصاب بفقد عظمي في الجهة اليسرى من جسم ورأد الفك السفلي نتيجة آفة رضية سابقة (إصابة بطلق ناري منذ سنتين)، مع محاولة سابقة مخفقة لإجراء تطعيم عظمي ذاتي من الناتئ الحرقفي (الشكل 1)، وبعد الاستماع إلى شكوى المريض، وفحصه سريرياً، وشعاعياً، وُضِعَتِ النقاط التشخيصية الآتية:

1- فقدان التناظر والانسجام الوجهي لغياب خط الفك السفلي، وزاوية الفك في الجهة اليسرى، وميلان الفك السفلي نحو الأيسر.

2- تحدّد في حركات الفك السفلي نتيجة التوضع المعيب للقمة اليسرى.

الشكل 1 : الصورة الشعاعية ثلاثية الأبعاد للمركب الوجهي الفكي للمريض تظهر مكان الإصابة، والمحاولة المخفقة السابقة لتطعيم المنطقة وتثبيتها.

تم استحصال صور شعاعية مقطعية CBCT للهيكل الوجهي باستخدام جهاز PAX-I 3D GREEN من شركة Vatech، وبناء على فحص منطقة الفقد اِقْتُرِحَ استخدام مادة PEEK، وأُخِذَتْ موافقة المريض المكتوبة للبدء بخطوات التخطيط والمعالجة.

شمل تنفيذ المعالجة للخطوات التالية:

استحصال صور طبقية محورية لمنطقة الوجه، والفكين

↓

إنتاج النموذج ثلاثي الأبعاد للفك السفلي، وتصميم الجزء المعوض

↓

نسب الخواص الميكانيكية لنموذج الفك السفلي، والجزء المعوض

↓

عزل كل من أجزاء الفك السفلي والجزء المعوض، وطباعتها

↓

تكييف صفائح التثبيت على نموذج الفك السفلي، و الجزء المعوض

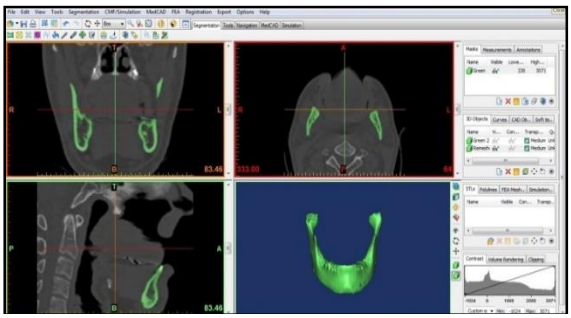
↓

إنجاز العمل الجراحي وفق التخطيط المنجز

البرامج الحاسوبية المستخدمة :

برنامج Mimics لقراءة الصور الطبية ومعالجتها:

وهو برنامج منتج من شركة (Materialise,Belgium) يستخدم لمعالجة الصور الطبية المحوسبة إذْ حُلِّلَتِ الصور المقطعية للفك السفلي باستخدام هذا البرنامج، كما تم بواسطته قراءة جودة الصور ثنائية الأبعاد وتحسينها، إذْ تُعْزَلُ في البداية منطقة العظم باستخدام مبدأ التعتيب Thresholding، وبعدها يقوم البرنامج بتطبيق تقنية توسيط رياضي Interpolation لإنتاج النموذج ثلاثي الأبعاد من المقاطع السطحية ثنائية الأبعاد (الشكل 2)، وذلك بناء على الدراسة الدقيقة المعتمدة على الفحص السريري والصور المقطعية، ثم تم تعويض الجزء المفقود بنموذج تعويضي افتراضي، وذلك باستخدام برنامج النمذجة والمحاكاة الرقمية Catia



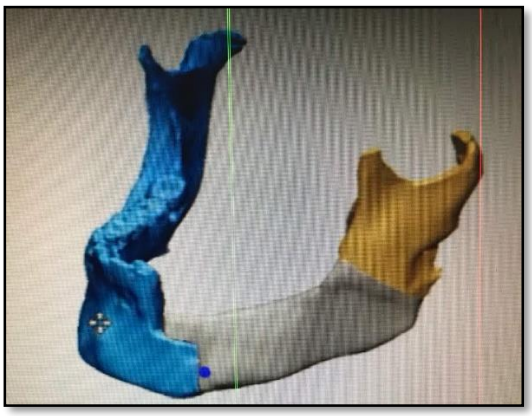
الشكل (2): يظهر واجهة برنامج Mimics إذْ تبيّن الصور الثلاث العلوية واليسارية المقاطع التشريحية الجبهية والمحورية والسهمية، وتبيّن النافذة السفلية اليمينية للنموذج ثلاثي الأبعاد المنتج بواسطة إحدى وظائف البرنامج

برنامج Catia للرسم الهندسي وتحليل العناصر المنتهية:

اِسْتُخِدْمَ برنامج النمذجة والمحاكاة Catia المنتج من شركة (3ds Dassault, France) للتنفيذ الافتراضي لتقنية التعويض الجراحي .

تم في البداية عكس الجزء الطبيعي من الفك السفلي الموافق للجزء المفقود بالنسبة إلى المستوى السهمي، فيما بعد تم تحريك الجزء المعكوس وقصّه، وإحكام توّضعه بحيث حل مكان الجزء المفقود من الفك السفلي، وبهذا الشكل تم ضمان أن يمتلك النموذج التعويضي الذي سَيُنْتَجُ أبعاد الفك السفلي نفسها في الجزء المصاب.

فيما يخص تقنية التثبيت الجراحي، أُعْطِيَتْ صفات مادة التعويض المصنوع منها النموذج PEEK تهيئة لطباعته بواسطة التقنية ثلاثية الأبعاد (الشكل 3).



الشكل (3): تصميم النموذج التعويضي للجزء المستأصل على برنامج Catia (الجزء المشار إليه بالسهم يمثل الجزء المعوض).

ثم حُدِّدَتْ خواص المادة المدروسة، وطُبِقَتِالأحمال ومناطق التثبيت المناسبة.

ثم عُزِلَ جزءا الفك السفلي عن الجزء المعوض، و طُبِعَ كل منها بالتقنية ثلاثية الأبعاد (الشكل 4).

الشكل (4): طباعة ثلاثية الأبعاد لجزأي الفك السفلي المدروس .

ثم وُضِعَ الجزء المعوض على نموذج الفك السفلي بالعلاقة المخطط لها وأُلْصِقَ مؤقتاً، ثم كُيِّفَتْ صفيحة Reconstruction على مجموعة (فك سفلي – الجزء المعوض)، وعُلِّمَتْ أماكن الحفر للبراغي المثبتة على الجزء المعوض PSIs PEEK (الشكل 5) .

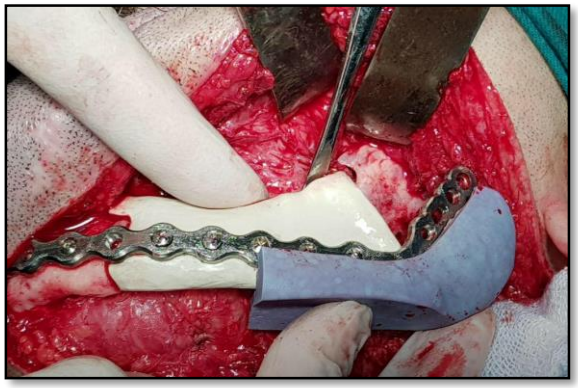
الشكل 5 : تنفيذ التخطيط ثلاثي الأبعاد بتثبيت زرعة الـ PEEK على النموذج المطبوع بواسطة صفيحة التيتانيوم المكيفة مسبقاً.

وفي نهاية مرحلة التخطيط كُيِّفَ دليل مطاطي بواسطة طبعة بمادة السيليكون القاسي (Putty) على الحافة السفلية لمجموعة أجزاء الفك السفلي، والجزء المعوض، وصفيحة التثبيت لاستخدامه لاحقاً كجبيرة توجيه تساعد في توضيع تلك الأجزاء في أثناء العمل الجراحي وفق التخطيط الافتراضي (الشكل 6) .

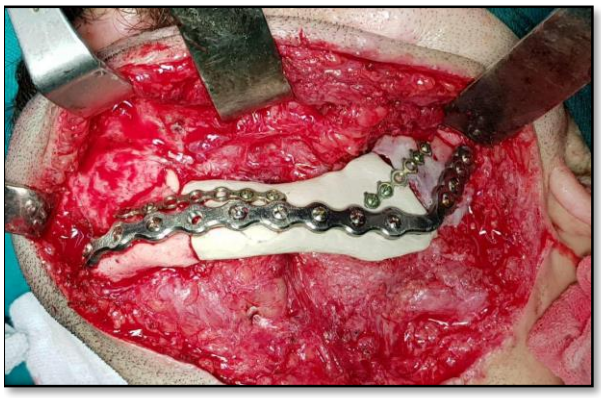
الشكل (6): تكييف الدليل الجراحي المطاطي على مجموعة (فك سفلي – PEEK – صفيحة)

في المرحلة التالية تحت التخدير العام كُشِفَتْ منطقة الفقد العظمي جراحياً وأُزيلَتْ وسائل التثبيت السابقة (الشكل رقم 7) ، ثم وُضِعَ الجزء المعوض وثبِّتَ مع أجزاء الفك السفلي وفق جبيرة الدليل الجراحي المطاطية (الشكل رقم 8)، و ذلك باستخدام صفيحة التيتانيوم التي كُيِّفَتْ مسبقاً، ثم غُطِّيَتِ المجموعة بالأنسجة الرخوة و الخياطة على طبقات (الشكل 9) .

الشكل(7): الكشف الجراحي لمنطقة الفقد العظمي وإزالة وسائل التثبيت السابقة.



الشكل(8): إتمام تكييف القطعة الخلفية للفك السفلي لتثبيتها مع زرعة الـ PEEK والصفيحة التثبيت بالاستعانة بالدليل الجراحي



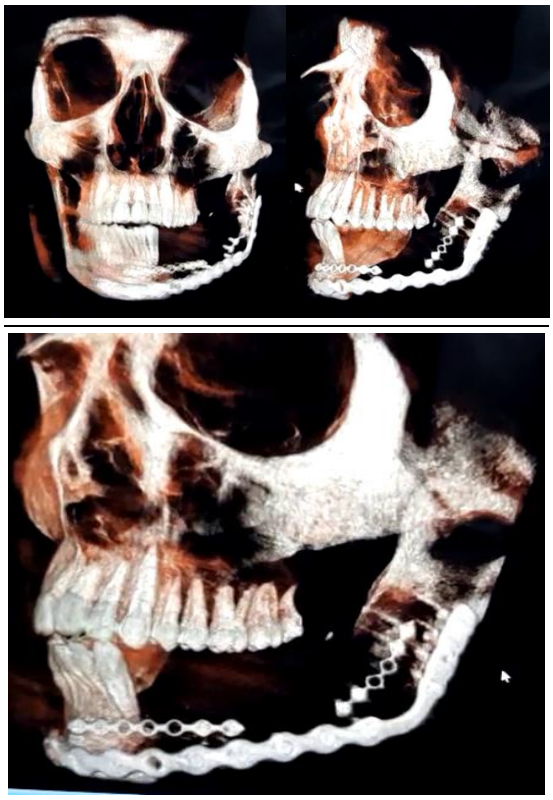
الشكل(9): تثبيت زرعة الـ PEEK على جزأي الفك السفلي بواسطة صفائح التيتانيوم و البراغي وفق التخطيط ثلاثي الأبعاد بعد الاستعانة بالدليل الجراحي.

في الأيام اللاحقة للعمل الجراحي أُجْرِيَتْ مراجعات عدّة لتقييم جودة الإغلاق، وعدم حدوث أي انكشاف، أو انفتاح للخياطة.

وبالتقييم السريري التالي (بعد يوم، أسبوع، شهر، وثلاثة أشهر) وجد تحسن كبير في البروفيل الوجهي في منطقة الفقد السابق، حيث تمت استعادة انسجام عناصر الوجه ولاسيَّما محيط الحافة السفلية للفك السفلي، ومحيط جسم الفك السفلي.

كما وجد تحسن ملحوظ في حركات الفك السفلي ولاسيَّما فتح الفم نتيجة استعادة التوضع السليم للقمة الفك السفلي في الجهة المصابة.

بالتقييم الشعاعي بعد شهر من العمل الجراحي وجد تمادٍ واضح للفك السفلي في المنطقة المصابة ووجود تناظر مع الجهة السليمة (الشكل 10).



الش(10): وضعيات مختلفة لصورة ثلاثي الأبعاد بعد الجراحة تظهر انطباق جزأي الفك السفلي وتكاملها مع زرعة الـ PEEK وصفيحة التثبيت

لم يلاحظ بعد ثلاثة أشهر وجود أي تأثيرات سريرية غير مرغوب فيها كالتأثيرات التحسسية، أو الرفض المناعي، أو مظاهر الإنتان، أو انكشاف الجزء المعوض.

المناقشة:

اِقْتُرِحَ هذا البروتوكول لتصميم نموذج تعويضي لأي حالات رضية، أو ورمية مترافقة مع فقد عظمي أو نسيجي يستدعي تداخلاً جراحياً، وتعويضاً تجميلياً و وظيفياً.

الفكرة الأساسية من هذا البروتوكول هي القدرة من استثمار البرمجيات الهندسية الخاصة بمعالجة الصور الطبية وبالنمذجة والمحاكاة الطبية في تنفيذ العمل الجراحي ضمن بيئة حاسوبية افتراضية تحاكي الواقع السريري. يندرج وراء ذلك إيجابيات عدّة تتمثل في القدرة على تحقيق نماذج

تعويضية دقيقة وبأبعاد قريبة من منطقة الفقد، كما أنّها تتيح إمكانية تقييم تقنية التثبيت الجراحي، واستقرارها الميكانيكي، وهذا ما لم يكن ممكناً في الطرائق التقليدية.

وبهذا فإنَّه وبتطبيق تقنية التجزئة والمحاكاة باستخدام البرامج المذكورة، تكون صور الطبقي المحوري قد أضافت إيجابيات إلى التقنية الجراحية بالمقارنة بالطرائق التقليدية. من جهة ثانية، تسمح نوعية هذه البرامج أن يمتلك الجراح رؤية أوسع عن توضع المنطقة الجراحية، وهي تمكنه من التخطيط المسبق للجراحة، وذلك أفضل من أن يقوم بالمخاطرة وبالتخطيط للجراحة ضمن غرفة العمليات وفي أثناء وضع المريض تحت التخدير، وبهذا فإنَّ الدمج المشترك بين كل من برنامجي Mimics وCatia سيعمل على تقليص وقت التداخل الجراحي بشكل كبير، كما أنَّه سيسمح بالتعامل مع صور طبية، وهذا ما يحقق تفاعلاً مباشراً بين الشكل الهندسي للفك والخطة التشخيصية من جهة وبين نموذج محاكاة التداخل الجراحي، وذلك بأعلى دقة ممكنة قبل التنفيذ الفعلي لهذا التداخل من جهة أخرى.

تم من خلال الطباعة السريعة للنموذج الترميمي الذي صُمِّمَ الوصول إلى إيجابيات عدّة منها الحصول في البداية على النموذج المصنع بحيث يمكن معالجته وثقبه وتعقيمه ليستخدم كتعويض جراحي نهائي، أو مؤقت، تكون وظيفته توجيه نمو الأنسجة الرخوة والندبية، ويهيئ المنطقة لاستقبال الطعم العظمي والتعويض الجراحي النهائي، كما يمنع الفك السفلي من الانزياح بتأثير القوى العضلية والوظيفية المختلفة، ومن ثم يمكن إنتاج نموذج معدني من التيتانيوم وتثبيته إلى الطعوم العظمية المأخوذة من المنطقة الحرقفية بواسطة براغٍ معدنية.

تظهر هذه الفكرة فعالية الطباعة التنفيذية السريعة Rapid prototyping والبرامج الهندسية في تصنيع نماذج ترميمية مخصصة، وبالغة الدقة لكل حالة على حدة.

وأخيراً ومع أنَّ استخدام مادة PEEK كزرعات صُمِّمَتْ وكُيِّفَتْ بشكل مخصص للحالة Patient Specialized Implant ما زال بحاجة إلى بحوث وخبرات معمقة إلَّا أنَّها أبدت صفات ميكانيكية وفيزيائية وحيوية مبشرة قد تفتح آفاقاً واعدةً لاستخدامها استخداماً واسعاً في ترميم الفقود العظمية المختلفة في المنطقة الوجهية الفكية.

References

1. R.S. Snell, "Clinical Anatomy ", 7th edition, vol. 4, 2003, Pearls
2. D.M. Wang, C.T. Wang, A.L. Qu, X.L. Xu, C.P. Zhang, "Design and biomechanical analysis of a novel mandibular prosthesis'', IFMBE Proceedings vol. 14, no.5, pp 2797- 2799, 2007
3. S. Atilgan, B. Erol, A. Yardimeden, F. Yaman, M.C. Ucan, N. Gunes, Y. Atalay, I. Kose, "A three dimensional analysis of reconstruction plates used in different mandibular defects a 3D analysis of reconstruction plates used in different mandibular defects", Biotechnol. & Biotechnol. Eq. vol. 24, no.2, pp. 1893-1896, 2010
4. S. Singare, L. D.L. Bingheng, L. Yanpu, G. Zhenyu, L. Yaxiong, "Design and fabrication of custom mandible titanium tray based on rapid prototyping", Journal of Medical Engineering and Physics, pp. 671-676, 2004.
5. E. Armentani, F. Caputo, R. Citarella, "FEM sensitivity analyses on the stress levels in a human mandible with a varying ATM modeling complexity", The Open Mechanical Engineering Journal, pp. 8-15, 2010
6. A. Lanza, L. Laino, L. Rossiello, L. Perillo, A. D. Ermo, N. Cirillo, "Giant cell tumor of the jaw mimicking bone malignancy on three dimensional computed tomography (3D-CT) reconstruction" , The Open Dentistry Journal ,pp 73-77, 2008.
7. P. Boyne, "Osseous reconstruction of the maxilla and the mandible: surgical techniques using titanium mesh and bone mineral". Chicago, 1997, Quintessence.
8. N. Chaudhary, S. T. Lovald, J. Wagner, T. Khraishi, B. Baack, "Experimental and numerical modeling of screws used for rigid internal fixation of mandibular fractures", Modelling and Simulation in Engineering,, pp. 1-11, 2008.
9. P. Tessier, " Autogenous bone grafts taken from the calvarium for facial and cranial applications ", *Clin Plast Surg*. 1982;9(4):531-538.
10. Maas CS, Merwin GE, Wilson J, Frey MD, Maves MD. Comparison of biomaterials for facial bone augmentation. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 1990; 116(5):551-556.
11. Jockisch KA, Brown SA, Bauer TW, Merritt K. Biological response to choppedcarbon-fiber–reinforced PEEK. *J Biomed Mater Res*. 1992;26(2):133-146.
12. Morrison C, Macnair R, MacDonald C, Wykman A, Goldie I, Grant MH. In vitro biocompatibility testing of polymers for orthopaedic implants using cultured fibroblasts and osteoblasts. *Biomaterials*. 1995;16(13):987-992.
13. Wenz LM, Merritt K, Brown SA, Moet A, Steffee AD. In vitro biocompatibility of polyetheretherketone and polysulfone composites. *J Biomed Mater Res*. 1990; 24(2):207-215.
14. Toth JM, Wang M, Estes BT, Scifert JL, Seim HB III, Turner AS. Polyetheretherketoneas a biomaterial for spinal applications. *Biomaterials*. 2006;27(3):324- 334.
15. Cho DY, Liau WR, Lee WY, Liu JT, Chiu CL, Sheu PC. Preliminary experience using a polyetheretherketone (PEEK) cage in the treatment of cervical disc disease [published correction appears in *Neurosurgery*. 2003;52(3):693].*Neurosurgery*. 2002;51(6):1343-1350.
16. Mastronardi L, Ducati A, Ferrante L. Anterior cervical fusion with polyetheretherketone (PEEK) cages in the treatment of degenerative disc disease: preliminary observations in 36 consecutive cases with aminimum 12-month follow-up. *Acta Neurochir (Wien)*. 2006;148(3):307-312.
17. Scolozzi P, Martinez A, Jaques B. Complex orbito-fronto-temporal reconstruction using computer-designed PEEK implant. *J Craniofac Surg*. 2007;18(1): 224-228.
18. PSI–Patient Specific Implants. West Chester, PA: Synthes Inc; 2004.
19. A. Boccaccio, L. Lamberti, C.Pappalettere, M. Cozzani, G. Sicilianie,"Comparison of different orthodontic devices for mandibular symphyseal distraction osteogenesis: A finite element study", American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, pp 260-269, 2006
20. C. Kober, B. Erdmann, J. Lang,R. Sader, H.F.Zeilhofer, "Adaptive Finite Element Simulation of the Human Mandible Using a New Physiological Model of the Masticatory Muscles", ZIB-Report, pp-04-16 , 2004
21. H.H Ammar, P. Ngan, R.J.Crout, V.H. Mucino, and O.M. Mukdadi,''Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement", American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Vol 13, Issue 1, American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, pp. 59-7, 2011.