

טכנולוגיות תלת־ממד באורתופדיה אונקולוגית

תקציר

במהלך העשורים האחרונים, ההתקדמות בטיפולים אדג'ובנטיים של סרקומות עצם האיצה את התפתחותן של טכנולוגיות כירורגיות חדשות המאפשרות ניתוחים משמרי גף. עד כה, טכנולוגיות אלו הפכו את הניתוחים משמרי הגפיים לעמוד התווך של הטיפול הכירורגי במחלות אלה, בעוד שמספר הניתוחים לקטיעות גפיים הפך להיות זניח. התקדמויות אלו כוללות טכנולוגיות דימות, טרום ותוך ניתוחיות המאפשרות תכנון תלת־ממדי מדויק במודלים וירטואליים ומוחשיים, וייצור מכשירים מותאמים אישית למטופל המאפשרים ביצוע מדויק של תכניות ניתוח. פיתוחם של שתלי טיטניום נקבוביים מותאמים אישית המיוצרים בהדפסה תלת־ממדית, העניק למנתחים חופש רב יותר לשמור על רקמה בריאה שמסביב לשאת (Tumor) ולייעל את שחזור מבנה הגף, ובאופן זה לשפר את איכות החיים ולהפחית תחלואה נלווית לאחר הניתוח. שתלים מותאמים אישית אלה האיצו את הפיתוח של תהליכים, חומרים וטכנולוגיות חדשניים והביאו לעלייתו של עידן חדש באורתופדיה האונקולוגית.

יואב לוי¹

עמית בנאדי^{1,2}

ליאת צורן¹

שלמה דדיה^{1,2}

יאיר גורצק^{2,3}

¹ מרכז לזין לחדשנות כירורגית ולהדפסת תלת־ממד, מרכז רפואי תל אביב ע"ש סוראסקי, מסונף לפקולטה לרפואה ע"ש סאקלר, אוניברסיטת תל אביב, תל אביב
² המחלקה הארצית לאורתופדיה אונקולוגית, מרכז רפואי תל אביב ע"ש סוראסקי, מסונף לפקולטה לרפואה ע"ש סאקלר, אוניברסיטת תל אביב, תל אביב
³ היחידה לאורתופדיה אונקולוגית ילדים, בית חולים לילדים על שם דנה־דואק

מילות מפתח: כירורגיה אורתופדית; אורתופדיה אונקולוגית; מודלים אנטומיים; מודלים תלת־ממדיים; הדפסת תלת־ממד; סרקומות עצם; שתלים תלת־ממדיים; מותאמים אישית; מכשירים מותאמים אישית למטופל.

keywords: Orthopedic surgery; Orthopedic oncology; Anatomical models; 3D-digital models; 3D printing; Bone sarcomas; Customized 3D implants; Patient-specific instruments (PSIs).

הקדמה

אורתופדיה אונקולוגית היא תחום כירורגי המתמקד בשאתות של מערכת השלד (עצמות ומפרקים) והרקמה הרכה. סרקומות עצם ראשוניות הן שאתות מזנכימיות הנובעות מרקמת עצם ומרקמת חיבור, והן בין השאתות הנפוצות ביותר בגיל ההתבגרות, בשכיחות שנתית מוערכת של 10–26 מיליון אנשים ברחבי העולם [1]. ניתן לסווג את רוב סרקומות העצם לשלושה סוגים שונים: אוסטאוסרקומה (Osteosarcoma); סרקומה על שם יואינג (Ewing's sarcoma); וכוונדרוסרקומה (Chondrosarcoma) [2]. התסמינים העיקריים של סרקומת עצם ראשונית כוללים תסמינים מקומיים כגון כאבי עצמות, נפיחות ורגישות ליד האזור הפגוע, ועצם מוחלשת עם נטייה מוגברת לשבר, כמו גם תסמינים מערכתיים המשתנים מצליעה במקרים עם מעורבות בגפיים התחתונות ועד לירידה לא מכוונת במשקל ותסמינים נוספים (תסמיני B). שאתות אלה יכולות להתפשט ישירות כנגעי דילוג או לשלוח גרורות דרך זרם הדם, רובן לריאות. אבחון של שאתות בעצם מגיע בדרך כלל בעקבות חשד קליני, עם אימות באמצעות בדיקות דימות, כגון צילומי רנטגן מכוונים, טומוגרפיה מחשבית (CT) ודימות תהודה מגנטית (MRI) עם גדוליניום וטומוגרפיה של פליטת פוזיטרונים לכל הגוף (PET-CT). אלו יובילו לביופסיה כדי לאשר את האבחנה הפתולוגית

המדויקת. שיעור של כ-20% מהחולים הללו מאובחנים עם מחלה גרורתית כבר בהסתמנות הראשונית [3]. מטרת הטיפול היא למגר תאי שאת מקומיים ומערכתיים כאחד. דרכי הטיפול כוללות כימותרפיה, התערבות כירורגית ובמקרים מסוימים תוספת של קרינה. לעיתים כטיפול יחיד ולעיתים כטיפולים (ניאו) אדג'ובנטיים. ככלל, מדד הזהב בטיפול בשאתות העצם הוא ניתוח לכריתה רחבת־שוליים עם או ללא טיפול (ניאו) אדג'ובנטי. על מנת להקטין את הסיכוי להישנות מקומית של השאת במיטת הניתוח, נדרשת כריתה רחבה של השאת בשוליים נקיים. היסטורית, טרם השימוש בכימותרפיה בשאתות אלה (בעיקר אוסטאוסרקומה), קטיעות היו הטיפול המועדף בשאתות עצם פולשניות על מנת להשיג כריתה רחבת־שוליים [4]. עם זאת, כריתה עם שוליים רחבים של רקמה בריאה שמסביב עלולה להיות כרוכה גם במחיר גבוה של איכות החיים בעתיד וניידות המטופל. טרם ההתקדמויות האחרונות בכירורגיה האורתופדית, עמדו לרשות המנתחים פחות אפשרויות לשמירה על רקמה בריאה סביב השאת, ויכולות השחזור היו מוגבלות [5]. עם התקדמות הטיפול והטכנולוגיות, פותחו ניתוחים משמרי גף, אשר במהלכם מסולקת השאת יחד עם העצם המעורבת, תוך שימור תפקודי של האיבר הנותר.

במאמר זה, נתמקד ביישומים וביתרונות של הדפסת תלת־ממד, טכנולוגיה מתפתחת לא פולשנית, ללא



תמונה 1: דוגמה של תהליך התכנון והייצור במקרה סרקומה ע"ש Ewing באזור המקורב של עצם השוקה (proximal tibia). (א) תמונה דו-ממדית מדימות MRI. (ב) מודל תלת-ממדי דיגיטלי לאחר איחוי תמונות הדימות ופילוח. במודל ניתן לראות את מישורי החיתוך שנבחרו, מכשיר מנחה מסור מותאם אישית למטופל, ומדידה של אורך הכריתה הכולל. (ג) הדמיה של שחזור העצם עם שתל מותאם אישית הכולל מסמר תוך לשדי. (ד) שתל טיטניום נקבובי מותאם אישית בהדפסת תלת-ממד. (ה) צילום רנטגן של הגפה עם המשתל לאחר הניתוח.

רכישה ועיבוד תמונה: CT לעומת MRI

מודלים המיוצרים בהדפסת תלת-ממד חייבים להסתמך על נתונים גולמיים באיכות גבוהה הנרכשים באמצעות אמצעי דימות דו-ממדיים. CT ו-MRI הם אמצעי דימות נפוצים ומשלימים זה את זה למטרה זו. CT רגיל בדרך כלל תוחם את האנטומיה הגרמית של המטופל על ידי הפקת תמונות חתך דקות, שניתן לעבד באופן ממוחשב ליצירת מודל תלת-ממדי. סריקות CT לוקחות פחות זמן מבדיקות MRI באופן משמעותי, והן זמינות לשימוש בבתי חולים [8,7]. יחס עם זאת, MRI מציע יתרון משמעותי שכן הוא אינו חושף את המטופל לקרינה במהלך ההדמיה. יתר על כן, MRI עדיף על CT ביכולתו לבחון רקמות רכות ושולי שאת.

קרינה, חסכונית וקלה לשימוש. נתאר את ההישגים ואת הפוטנציאל של הדפסת תלת-ממד במתן טיפול מיטבי מותאם אישית להליכים אורתופדיים אונקולוגיים כגון כריתת שאתות והצלת גפיים.

הדפסת תלת-ממד

בעשור האחרון נרשמה עלייה בשימוש בייצור אדטיבי (Additive Manufacturing, AM), המוכר יותר בשם

■ **הדפסת תלת-ממד רפואית היא טכנולוגיה המתפתחת במהירות שאינה פולשנית, נטולת קרינה חסכונית וקלה לשימוש.**

■ **להדפסת תלת-ממד רפואית מגוון רחב של יישומים בתחום האורתופדיה האונקולוגית, לרבות תכנון טרום ניתוחי, הדפסת מודלים אנטומיים (ופתולוגיים) מותאמים אישית, ייצור מכשירים תוך ניתוחיים מותאמים אישית למטופל, וייצור שתלי טיטניום מותאמים אישית.**

■ **בתחום הרפואה המותאמת אישית ובאונקולוגיה האורתופדית בפרט, טכנולוגיות הדפסת תלת-ממד מציעות פוטנציאל לחולל מהפכה, במיוחד עבור תיקון עיוותי שלד, הליכי כריתה של שאתות מורכבות ושחזור עצם.**

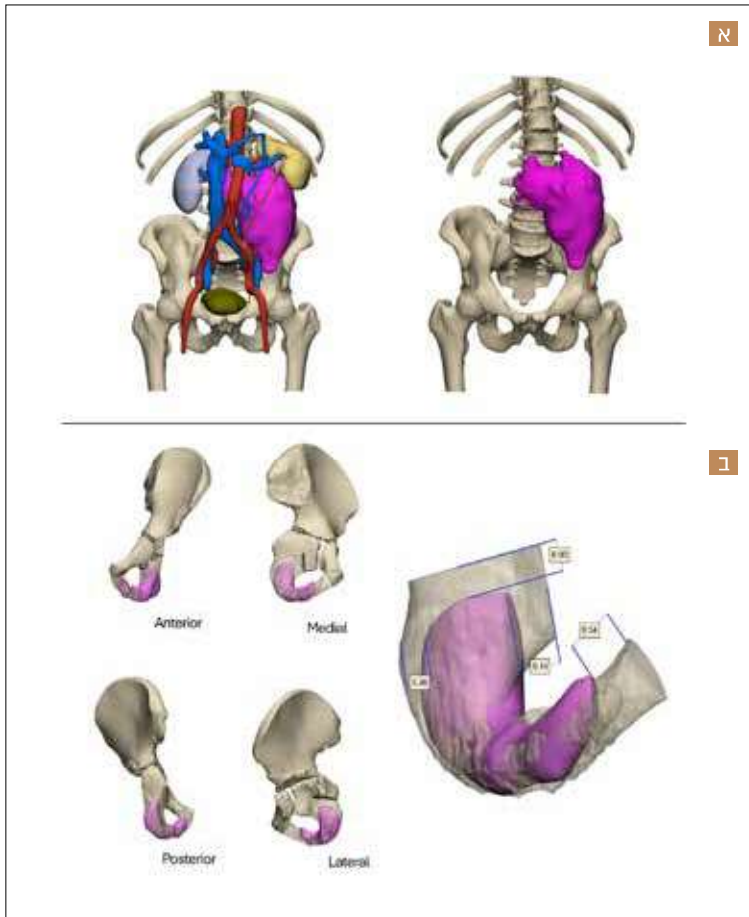
הדפסת תלת-ממד, גם בעולם הרפואה, כאשר גם מנתחים וחוקרים הבינו את פוטנציאל הטכנולוגיה ואת הגמישות שהיא מאפשרת לייצור אבזרים ליישומים רפואיים מגוונים [6]. AM מתייחס לתהליך ייצור שבו חומרים כמו פולימרים פלסטיים, קרמיקה או מתכת מיושמים בשכבות דקות זו על זו לכדי יצירת אובייקט תלת-ממדי, על בסיס מודל דיגיטלי, כפי שמוסבר במאמרנו זה.

פילוח (Segmentation): מדו-ממד לתלת-ממד

כל התמונות הרפואיות שנרכשו נשמרות כקובצי הדמיה ותקשורת דיגיטלית ברפואה (DICOM), שהוא פורמט נתונים סטנדרטי המשמש לאחסון, החלפה והעברת תמונות רפואיות (תמונה 1). כדי ליצור מודל תלת-ממד, המבנים האנטומיים הרלוונטיים מסומנים בנפרד בתמונה הדו-ממדית בתהליך הנקרא סגמנטציה (פילוח), שיכול להתרחש באופן אוטומטי, חצי אוטומטי או ידני [9]. לאחר מכן, שני תוצרי הסגמנטציה שנרכשו מ-CT ו-MRI ממוזגים יחדיו ליצירת תמונה מורכבת שנוצרה על ידי שימוש בשני אופני ההדמיה הללו ביחד. היתוך תמונה זה מבוסס על השוואת תמונות שצולמו על ידי שני האופנים בכל שלושת הצירים (x, y, z) והתאמה אנטומית מדויקת של ציוני דרך על העצם שצוינה.

תהליך התכנון וההדפסה

להדפסת תלת-ממד יתרון בולט של יכולת ייצור



תמונה 2: מודלים תלת-ממדיים וירטואליים המאפשרים תכנון מדויק של התוכנית הניתוחית ומזעור אובדן עצם ופגיעה במבנים סמוכים, תוך הותרת שוליים אונקולוגיים בטוחים. (א) כונדורסקומה בדרגת ממאירות גבוהה שמקורה בחוליות L2-L4, עם וללא איברים וכלי דם סמוכים (ב) סרקומה ע"ש Ewing בעצם השת (Ischium). המודל הוירטואלי מרגים את מישורי הכריתה ושולי השאת והמרחקים ביניהם.

ספציפי מבחינת משקל, צבע ואפילו צפיפות [14-16].

מודלים אנטומיים מודפסים בתלת־ממד

המידע המבני והמרחבי המסופק על ידי מודל פיזיקלי תלת־ממדי מתגלה רלוונטי במיוחד כאשר התהליך האונקולוגי כרוך בשינוי האנטומיה של המטופל או ביצירת עיוות. מודל כזה גם מאפשר הערכה של שולי השאת ברקמה רכה ובעצם עצמה, אשר יכולים להיות קשים להבחנה בתמונה דו־ממדית לפני ששאתות ממאירות בעצם, ראשוניות וגוררתיות, מופיעות באופן משתנה בכל מטופל, והאופי הבלתי צפוי שלהן גורם לכך שלעיתים קשה למנתחים להבין ו/או לדמות את הצורה והמיקום המדויקים של השאת. הוכח, כי השימוש במודלים פיזיים תלת־ממדיים בעת ההכנה לניתוח מגביר את הדיוק של שולי כריתת השאת. בנוסף, הוכח כי מודלים אלו מסייעים במקרים של כריתות אונקולוגיות נרחבות בכך שהם משמשים ככלי נוסף למיפוי מבנים בסביבת השאת כגון רקמות רכות, כלי דם ועצבים [17]. מידע זה משמש לאחר

אמצעים עם גיאומטריה מורכבת, יתרון שהוא בלתי אפשרי בעת שימוש בשיטות ייצור מסורתי כגון עיבוד שבבי וכרסום [6]. באופן מסורתי, טכניקה הידועה בשם ייצור חיסור (Subtractive manufacturing – SM) שימשה להדפסת מודלים פיזיים תלת ממדיים באמצעות מכונה בשליטה ממוחשבת (כגון Computerized Numeric Control – CNC) שמגלחת בהדרגה שכבות מגוש קיים עד הגעה לצורה הסופית הרצויה. מחקרים קליניים ארוכי טווח הוכיחו את בטיחותה ויעילותה של שיטה זו והיא עדיין משמשת לייצור רוב שתלי המדף, בגדלים ומאפיינים שונים המשרתים את רוב החולים הזקוקים להשתלת קיבוע או משתל מתכת.

כמו כן, שתלי מדף בייצור SM מאפשרים גמישות במהלך הניתוח, שכן במידת הצורך, המנתח יכול לבחור מתוך מגוון שתלים עם מאפיינים פיזיים ומכאניים שונים, בזמן אמת. עם זאת, הדפסת תלת־ממד הוכחה כעדיפה על SM בכך שהיא מאפשרת חופש עיצוב מוגבר ליצירת גיאומטריות מורכבות. כמו כן, היא מאפשרת שליטה במאפייני המיקרו של המבנה כגון נקבוביות החומר, וכן היא מאפשרת שילוב של חלקים מוצקים המחוברים זה לזה עם מבנים נקבוביים. חופש זה מאפשר יצירה מדויקת של שתלים מותאמים אישית שיתאימו בדיוק לצורה ולמיקום הדרושים. יתרון זה מתגלה כרלוונטי במיוחד בעת תכנון שתלים מותאמים אישית שמטרתם לחקות את המאפיינים המכניים והנקבוביות של עצם האדם. עם זאת, שיטה זו יקרה ומצריכה זמן ייצור ממושך בהשוואה ל־SM [10]. נציג באופן פשוט את התהליך לייצור מודל או אבזר תלת־ממד על בסיס דימות של המטופלים. ראשית, קבצי ה־DICOM ממוזגים באופן ממוחשב ליצירת דימות תלת־ממד. לאחר מכן באותה התוכנה מתבצעת הסגמנטציה. לאחר מכן, המוצר מיוצא לתוכנת התכנון בעזרת מחשב (Computer Assisted Design – CAD) מיוחדת לתכנון כירורגי, שם מיוצרת הדמיית תלת־ממד וירטואלית, המאפשרת בחינה מדוקדקת של איבר או אזור המטרה והמבנים הסמוכים לו.

כמו כן, על גבי הדמיה זו ניתן לתכנן את מישורי החיתוך והשוליים הרצויים (תמונה 2). לאחר יצירת המודל המתוכנן ואישורו הוא נשלח לפריסה, שבה מתוכננים תומכים ופיגומים חיצוניים במידת הצורך. לבסוף, התוצאה הסופית מודפסת בכל אחת משיטות הייצור האדטיבי. כיום, הדפסת תלת־ממד רפואית מבוססת גם היא על עקרון ייצור אדטיבי שבו שכבות דקות של חומרים כגון פולימרים, מתכות או קרמיקה מתווספים זה על גבי זה ומתמזגות זו לזו על ידי אור, תגובות כימיות או טמפרטורה משתנה [11-13]. בסוף שלב זה, השכבות השונות מתמזגות למודל תלת־ממדי. שיטת ההדפסה והחומר הנבחרים תלויים בעיקר בדרישות מהדגם והנגישות של מדפסות וחומרים. יתר על כן, ניתן להדפיס דגמים מחומרים יציבים בחום כך שיוכלו להיכנס למעקר קיטור (Autoclave) או יכולים לעבור חיטוי בכלורהקסידין (Chlorhexidine) טרם הכנסתם לחדר הניתוח. הדפסת תלת־ממד מציעה שיטה להדפסת מודל פיזי התואם במדויק לאנטומיה ולפתולוגיה של מטופל



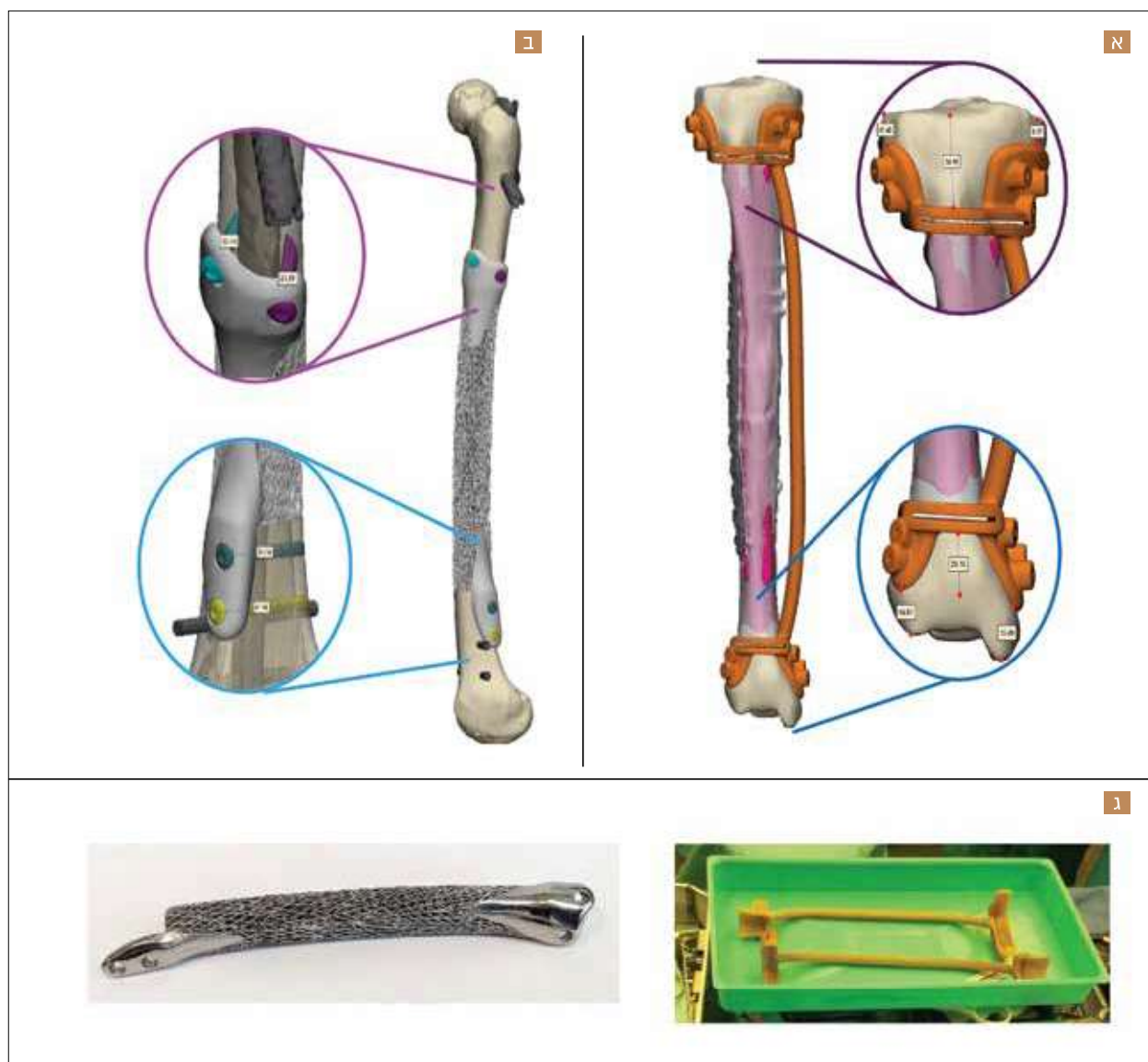
תמונה 3: מודלים אנטומיים מודפסים בתלת-ממד ביחס של 1:1. (א) מודל אגן עם שאת תאי ענק (המתפרץ מעצם העצה (Sacrum) לתוך האגן. (ב) מודל עצם הזרוע (Brachium) עם שאת טובה (שפירה) מסוג אקזוסטוזיס (Exostosis) המתבלט מדיאלית ודוחק את העורק הברכיאלי. ברקע נראית ההדמיה (ג) קריסטת גוף חוליה פתולוגית בחוליה L5 עקב תהליך ציסטי שפיר. מימין לשמאל: לפני ואחרי כריתה. לאחר שחזור עם שתל טיטניום מודפס בתלת-ממד.

התמיכה באופן ידני. יתרון זה של התאמה אישית מראש עשוי בסופו של דבר להפחית את זמן הניתוח ולשפר את תוצאי הניתוח באופן שמודל דו-ממדי לא מאפשר.

מכשירים מותאמים אישית למטופל בהדפסת תלת-ממד

מכשירים מותאמים אישית למטופל (Patient Specific Instruments - PSIs) הם כלים חשובים באורתופדיה האונקולוגית אשר ממשיכים לצבור פופולריות בפרקטיקה הקלינית [17]. מכשירים אלה מסייעים הן בתכנון מראש והן ככלים תוך ניתוחיים. הם מאפשרים למנתחים ליצור תכנית ניתוח מדויקת, במיוחד כאשר ההליך כרוך בחתכים מורכבים בעצמות ולקידוח חורים שיש להם נקודות כניסה ומסלול דרך העצם (תמונה 4). למרות שלעיתים קרובות

מכן ליצירת תוכנית כירורגית המוגדרת על ידי מישור חיתוך אחד או יותר כדי להבטיח כריתת שאת עם שוליים מספיקים (תמונה 3). תוכנית ניתוח זו מסייעת למנתח להגדיר את גבולות הניתוח המדויקים ולהתכונן לקראת השחזור [4]. מנקודת מבט לימודית, Zhang וחב' [18] הראו, כי שימוש במודלים תלת-ממדיים שיפר את איכות התוכניות הטרנס-ניתוחיות של המנתח המתאמן והגדילה משמעותית את הבנתו בשלב הקדם-ניתוחי [18]. מחקר שפורסם על ידי Punyaratabandhu וחב' [19], נבחן השימוש במודלים תלת-ממדיים מודפסים לתכנון מקדים שהעלה קשר לאובדן דם מופחת, קיצור זמן הניתוח וקיצור אורכי חתך. המודלים הפיזיים התלת ממדיים גם מאפשרים למנתח לקבוע מראש את המכשירים הדרושים לביצוע הפעולה על בסיס המודל האנטומי של איבר המטופל. לדוגמה, המנתח עשוי לבחור את אורכי המקדחים והברגים המתאימים או לעצב מראש את לוחות



תמונה 4: תכנון וייצור מכשירים ומשתלים מותאמים אישית. (א) תכנון וירטואלי של מכשיר מנחה מסור מותאם אישית לעצם השוקה של מטופל עם גידול ממאיר מסוג אדמנטינומה (Adamantinoma). (ב) תכנון משתל מותאם אישית לעצם הירך של מטופל עם סרקומה ע"ש Ewing. (ג) מכשיר מנחה מסור מותאם אישית מודפס בתלת-ממד מפולימר פלסטי (ימין) ומשתל טיטניום מותאם אישית מודפס בתלת-ממד, מוכנים לשימוש בחדר הניתוח לאחר עיקוב.

עצם מתורם מת להשתלה לאחר כריתת שאת. המכשיר המותאם אישית לחולה הנתרם מבטיח שתל שיתאים בצורה מושלמת לגודל ולצורה של העצם במקום הכריתתו.

משתלים מותאמים אישית בהדפסת
תלת־ממד

כריתת שאתות עצם היא מדד הזהב לטיפול בסרקומה של העצם. לאחר כריתת השאת, אחד האתגרים הגדולים הוא שחזור הפגם שנוצר כתוצאה מהכריתה כדי לשמור על מבנה ותפקוד תקינים ככל הניתן, תוך התייחסות גם לשיקולים אסתטיים. עד כה, מערכות מודולריות של שתלים, כולל

קל יחסית למדוד נקודות כניסה, הערכת הסטייה של המסור או המקדחה בעצם היא מורכבת יותר, והמכשירים ומומחאים אישית ממלאים תפקיד קריטי במזעור סטייה זו. לדוגמה, מדריכי מסור (Jigs) מגבירים את הדיוק של חיתוכי עצם (אוסטאוטומיות) במהלך כריתות מורכבות או מרובות הדורשות מישורי חיתוך מדויקים [20]. הוכח, כי השימוש במכשיר שנבנה כדי להתאים באופן מושלם לאנטומיה הגרמית הספציפית של האדם, מגביר את הדיוק והבטיחות של הליכים אלה [21,10]. יתרונות אלו מועילים במיוחד כאשר משתמשים במכשירים אלה במקומות מורכבים או רגישים כמו אזור האגן המסובך בשל הגיאומטריה, מרחב עבודה מוגבל וראות מוגבלת [24-22]. ניתן להשתמש במכשירים אלה גם לקצירת שתלי

להשיג הסכמה מקצועית רחבה ולהפוך את הפרקטיקה זו לנפוצת יותר. הביקוש הגובר לרפואה מותאמת אישית, יחד עם ההתקדמות המהירה של תעשיית AM בכללותה והמחקרים האחרונים בתחום, מצביעים על כך שחולים שעוברים כריתת שאתות ושחזורים יפיקו תועלת מיתרונות אלו, ויוכלו לחזור לאיכות חייהם הקודמת בזמן קצר לאחר הניתוח.

בעת כתיבת מאמרנו זה, לא פורסמו עדיין עבודות שמראות שיפור בתוצאה האונקולוגית של מטופלים העוברים שחזור עם משתל תלת-ממד, וגם לא סביר שזאת תהיה התוצאה, מאחר שהישרדות המטופלים תלויה בעיקר בטיב התגובה לכימותרפיה ולהסגת גבולות נאותים בכריתה הגרמית. במספר מצומצם של עבודות הודגם שיפור בתפקוד לאחר שחזור עם משתל מודפס בטכנולוגית תלת-ממד, זאת בהשוואה לשחזור במשתלים מודולריים קלאסיים [29], אך עדיין לא ניתן לקבוע חד משמעית ששיטה זו מובילה לשיפור מובהק בתפקודם של המטופלים.

לסיכום

בעולם הרפואה קיימת הסכמה רחבה כי עתיד הטיפול נשען על התאמה אישית. בתחום הרפואה המותאמת אישית, טכנולוגיות הדפסת תלת-ממד הן בעלות פוטנציאל לחולל מהפכה בתחום האורתופדיה האונקולוגית, במיוחד עבור הליכי כריתת שאתות מורכבות. ניתוח מוצלח כרוך בכריתה מלאה של השאת עם שוליים נקיים. המורפולוגיה הייחודית של כל שאת בודדת מקשה על המנתח להשיג מטרה זו באמצעות תמונות דו-ממדיות בלבד. תכנון מוקדם ושחזור תלת-ממד מספק אמצעי חדש לפתרון אתגר זה, בכך שהוא מאפשר למנתח גם לתכנן כריתה מיטבית וגם לבצע אותה בצורה מדויקת. למרות שהתקדמות זו כבר נמצאת בשימוש בפרקטיקה הקלינית כמתואר במאמר, יש להמשיך לחקור אותן וליישם אותן בקליניקה, טרם ניסוח תהליך העבודה מלא ומתוקנן לשימוש נרחב בשגרה. יתר על כן, השימוש בשתלים מותאמים אישית הוצג רק בשנים האחרונות, ומחקרי עוקבה גדולים עדיין לא קבעו שיטות עבודה ותהליכים מומלצים וסטנדרטיים להשגת תוצאות אונקולוגיות ותפקודיות אופטימליות של המטופלים. עם זאת, הספרות אכן מראה קונצנזוס סביב הפוטנציאל של טכנולוגיות אלו לחולל מהפכה בעתיד הקרוב.

מחבר מכותב: יאיר גורצק
דוא"ל: yairg@tlvmc.gov.il

החלפת מפרקים, שימשו לרוב הכריתות סביב המפרקים. עם זאת, כריתות אחרות כגון כריתות גיאוגרפיות וכריתות אינטרקאלאריות (כריתה של עצם ארוכה ללא מעורבות של המפרקים הסמוכים) אינן זוכות לפתרונות שחזור נאותים. נכון להיום, קיימות מספר אפשרויות עבור הוריות (אינדיקציות) אלו, כולל שתל ממקור עצמי (Autograft), שתל מתורם זר (Allograft) ושתלים מלאכותיים. מבין השתלים המלאכותיים הזמינים, נעשה שימוש תכוף בפרוטזות תוך-גופניות מודולריות שכן הן מספקות גמישות כירורגית ותקנון [25,25]. עם זאת, פרוטזות מודולריות אלה לא מספקות מענה למגוון מיקומים אנטומיים ומצבים פתולוגיים, ואינן מתאימות במקרים בהם חלק ניכר מפני שטח המפרק מוקרב לטובת קיבוע השתל.

בשנים האחרונות, טכנולוגיה חדשנית המאפשרת שתלי טיטניום מותאמים אישית בהדפסת תלת-ממד התקדמה לקראת הפיכתה לאמנות של ממש. שתלים אלה, אשר יכולים להיות מעוצבים באופן אינדיבידואלי עבור גדלים וצורות יוצאי דופן, הציגו עידן חדש של אפשרויות שחזור עצם. (איור 4). שתלים אלו מאפשרים התחדשות עצם והשתלבות של רקמת עצם (Osteo-integration) בתוך ומעל פני השטח של הפיגום המהווה את גוף השתל. כתוצאה מכך, נוצר אזור מעבר בין העצם לשתל המתכת אשר מפחית את הסיכויים לשבר בנקודת תורפה זו. שתלי טיטניום בתלת-ממד בהתאמה אישית זוכים לפופולריות הולכת וגוברת בשל התאמתם לשחזור עצם לאחר כריתת שאת, לתיקונים מורכבים של עיוותים קיצוניים או במקרים של שאתות הממוקמות בסמוך למפרקים. עד כה, סגסוגת טיטניום Ti6Al4V היא המתכת העיקרית המשמשת עבור שתלים מודפסים בתלת-ממד, מכיוון שהיא בעלת צפיפות נמוכה, חוזק גבוה, עמידות גבוהה בפני קורוזיה ותאימות ביולוגית מעולה. מאפיינים אלה מקלים על ייצור אביזרים אורתופדיים המתאימים ליישומים נושאי עומס [28,26].

יחד עם זאת, לשתלי טיטניום מודפסים בהתאמה אישית בתלת-ממד כמה חסרונות, שכן כל אחד מהם יקר ומצריך זמן יצור. חיסרון בולט נוסף הוא היעדר סטנדרטיזציה בין שתלים, מבחינת הרכב החומר ומבחינת מבנה הפיגום עצמו. דרוש מחקר נוסף לגבי המאפיינים ההנדסיים והחומריים המרכיבים של פיגומים אלה כדי ליצור סטנדרטיזציה שתביא שתלים אלה לשימוש קליני בקנה מידה רחב. עד היום חלה התקדמות איטית של תחום זה, שכן הטכנולוגיה והיתרונות של שתלים מודפסים בתלת-ממד הנדונים כאן ובפרסומים אחרים בספרות, מבוססים על גדלי מדגם קטנים או מקרים בודדים. נדרשת בחינה של שימוש בשתלים אלו בקבוצת ניסוי רב-מרכזית גדולה כדי

ביבליוגרפיה

- Ottaviani G, Jaffe N. The epidemiology of osteosarcoma. *Cancer Treat. Res.* 2009;152:3–13.
- Damron TA, Ward WG, Stewart A. Osteosarcoma, chondrosarcoma, and Ewing's sarcoma: national cancer data base report. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2007; 459(June):40–47.
- Bacci G, Briccoli A, Rocca M et al. Neoadjuvant chemotherapy for osteosarcoma of the extremities

- with metastases at presentation: recent experience at the Rizzoli Institute in 57 patients treated with cisplatin, doxorubicin, and a high dose of methotrexate and ifosfamide. *Ann. Oncol.* 2003;14(7): 1126–1134.
4. Gaston CL, Nakamura T, Reddy K et al. Is limb salvage surgery safe for bone sarcomas identified after a previous surgical procedure? *Bone & Joint J.* 2014; 96-B(5): 665–672.
 5. Brookes MJ, Chan CD, Baljer B et al. Surgical advances in osteosarcoma. *Cancers* 2021;13(3).
 6. Wong KC. 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthop. Res. Rev.* 2016; 8: 57.
 7. JT C, GD L. Radiologic approach to bone and soft tissue sarcomas. *Surg. Clin. North Am.* 2016; 96(5): 963–976.
 8. Ritacco LE, Milano FE, Farfalli GL et al. Accuracy of 3-D planning and navigation in bone tumor resection. *Orthopedics*, 2013; 36(7).
 9. Suetens P, Bellon E, Vandermeulen D et al. Image segmentation: methods and applications in diagnostic radiology and nuclear medicine. *Eur. J. Radiol.* 1993; 17(1): 14–21.
 10. Yu AW, Khan M. On-demand three-dimensional printing of surgical supplies in conflict zones. *J. Trauma Acute Care Surg.*, 2015; 78(1): 201–203.
 11. Christensen A, Rybicki FJ. Maintaining safety and efficacy for 3D printing in medicine. *3D Print. Med.*, 2017; 3(1): 1–10.
 12. Green N, Glatt V, Tetsworth K et al. A practical guide to image processing in the creation of 3D models for orthopedics. *Tech. Orthop.* 2016; 31(3): 153–163.
 13. Wong KC, Scheinmann P. Additive manufactured metallic implants for orthopaedic applications. *Undefined*, 2018; 61(4): 440–454.
 14. Frizziero L, Liverani A, Donnici G et al. New methodology for diagnosis of orthopedic diseases through additive manufacturing models. *Symmetry*, 2019; 11(4): 542.
 15. Kurenov SN, Ionita C, Sammons D, Demmy TL. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, 2015; 149(4): 973–979.e1.
 16. Gonz'alez-Henr'iquez CM, Sarabia-Vallejos MA, Rodriguez-Hernandez J. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: materials, methodologies, and biomedical applications. *Prog. Polym. Sci.*, 2019; 94: 57–116.
 17. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed. Eng.*, 2016; 15(1): 1–21.
 18. Zheng YX, Yu DF, Zhao JG et al. 3D printout models vs. 3D-rendered images: which is better for preoperative planning? *J. Surg. Educ.*, 2016; 73(3): 518–523.
 19. Punyaratabandhu T, Liacouras PC, Pairojboriboon S. Using 3D models in orthopedic oncology: presenting personalized advantages in surgical planning and intraoperative outcomes. *3D Print. Med.*, 2018; 4(1): 1–13.
 20. Khan FA, Lipman JD, Pearle AD et al. Surgical technique: computer-generated custom jigs improve accuracy of wide resection of bone tumors. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 2013; 471(6): 2007–16.
 21. Jentzsch T, Vlachopoulos L, F'urnstahl P et al. Tumor resection at the pelvis using three-dimensional planning and patient-specific instruments: a case series. *World J. Surg. Oncol.* 2016; 14(1).
 22. Evrard R, Schubert T, Paul L, Docquier PL. Resection margins obtained with patient-specific instruments for resecting primary pelvic bone sarcomas: a case-control study. *Orthop. Traumatol. Surg. Res.*, 2019; 105(4): 781–787.
 23. Cernat E, Docquier PL, Paul L et al. Patient specific instruments for complex tumor resection-reconstruction surgery within the pelvis: a series of 4 cases. *Chirurgia (Bucur)*, 2016; 111(5): 439–444.
 24. Moreta-Martinez R, Pose-D'iez-de-la-Lastra A, Calvo-Haro JA et al. Combining augmented reality and 3D printing to improve surgical workflows in orthopedic oncology: smartphone application and clinical evaluation. *Sensors*, 2021; 21(4): 1370.
 25. Park JW, Kang HG, Kim JH, Kim HS. The application of 3D-printing technology in pelvic bone tumor surgery. *J. Orthop. Sci.*, 2021; 26(2): 276–283.
 26. Liu W, Shao Z, Rai S et al. Three-dimensional-printed intercalary prosthesis for the reconstruction of large bone defect after joint-preserving tumor resection. *J. Surg. Oncol.*, 2020; 121(3): 570–577.
 27. Zhao D, Tang F, Min L et al. Intercalary reconstruction of the “ultra-critical sized bone defect” by 3D-printed porous prosthesis after resection of tibial malignant tumor. *Cancer Manag. Res.*, 2020; 12: 2503.
 28. Wei R, Guo W, Yang R et al. Reconstruction of the pelvic ring after total en bloc sacrectomy using a 3D-printed sacral endoprosthesis with re-establishment of spinopelvic stability: a retrospective comparative study. *Bone Jt J.*, 2019; 101B(7): 880–888.
 29. Hu X, Wen Y, Lu M, Luo Y, Zhou Y, Yang X, Tu C, Min L. Biomechanical and clinical outcomes of 3D-printed versus modular hemipelvic prostheses for limb-salvage reconstruction following periacetabular tumor resection: a mid-term retrospective cohort study. *J Orthop Surg Res.* 2024; Apr 23;19(1):258.