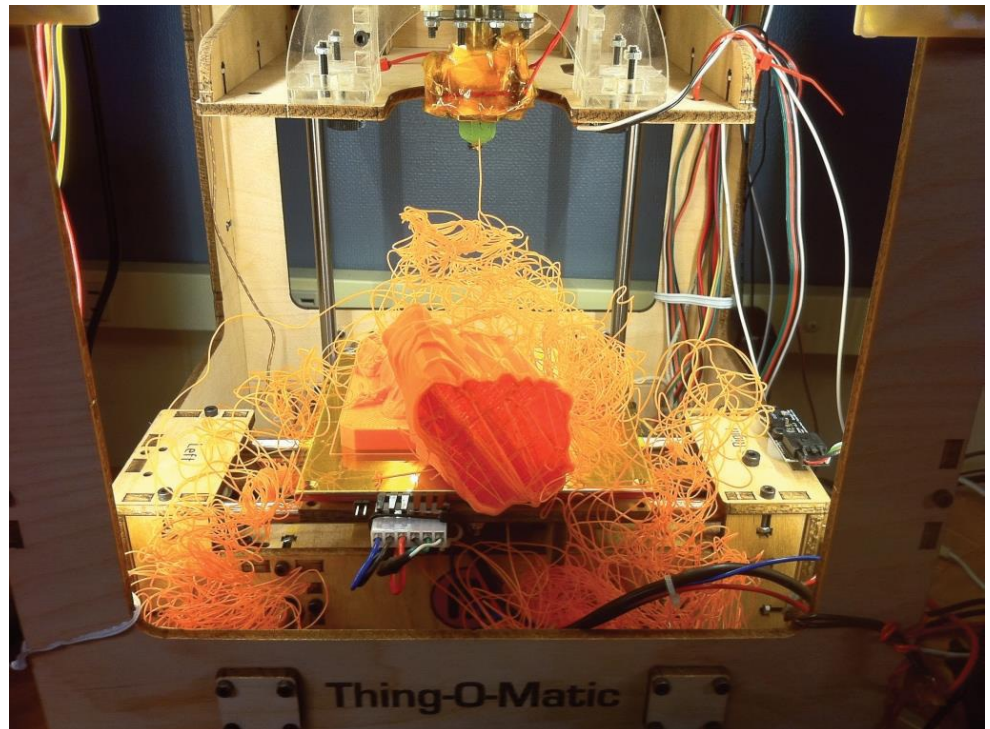


**שחר שלוח**  
מערכת אקולוגיה וסביבה

[ציטוט מומלץ](#)

שלוח ש. 2016. הממד הסביבתי של מדפסות תלת-ממד – חשש לרעילות תוצרי המדפסות. אקולוגיה וסביבה **7**(1).



הדפסה תלת-ממדית שיצאה מכלל שליטה | צילום: Tony Buser (CC BY-SA 2.0)

## הממד הסביבתי של מדפסות תלת-ממד – חשש לרעילות תוצרי המדפסות

28 במרץ, 2016

גיליון אביב 2016 / כרך (1)7

[בקצרה](#)

מדפסות תלת-ממד הן מהמוצרים (או אולי אפילו מאמצעי הייצור) המדוברים ביותר בעת האחרונה. ב-12 בפברואר 2013, בנאום לאומה, התייחס נשיא ארה"ב אובמה למדפסות התלת-ממד, ואמר כי "יש להן הפוטנציאל לחולל מהפכה כמעט בכל דבר שאנו עושים". אובמה, כמו אחרים שמתלהבים מהאפשרויות הטמונות בטכנולוגיה המהפכנית, מדגיש את כוחן של מדפסות התלת-ממד לעזור לעסקים ולאנשים להסתמך יותר על עצמם ולהיות תלויים פחות בגורמים חיצוניים ובמוצרים משונעים מקרוב ומרחוק.

שלוש שנים חלפו מאז אותו נאום, ושוק מדפסות התלת-ממד צומח במהירות. אף על פי שהטכנולוגיה קיימת כבר מ-1983, רק בשנים האחרונות זכו מדפסות התלת-ממד לפופולריות, ואנו צפויים לפגוש יותר ויותר בהן ובחלקים ובמוצרים שהודפסו באמצעותן. לפיכך, יש להיערך גם לכך שתוצריהן ייעשו חלק קבוע מתמהיל הפסולת הביתית והתעשייתית.

היקף שוק מדפסות התלת-ממד, הכולל את המדפסות, החומרים והאביזרים הנלווים, זינק מ-288 מיליון דולר ב-2012 ל-2.5 מיליארד דולר ב-2013, והוא צפוי להגיע ל-16.2 מיליארד דולר עד שנת 2018 <sup>[1]</sup>. הסיבות לגידול העצום הן שיפור הטכנולוגיה וירידה במחיר המדפסות. המשמעות של התפתחות זאת היא שמדפסות תלת-ממד זמינות יותר מאי פעם. הן ייראו לא רק במעבדות מחקר ובמוסדות גדולים, כמו למשל בתי חולים שמשמשים בהן ליצירת תותבים מותאמים אישית לחולה, אלא גם בעסקים קטנים ואפילו בבתים פרטיים. על רקע זה בדקו חוקרים מאוניברסיטת ריברסייד בקליפורניה את רעילותם של חלקים שהודפסו במדפסות תלת-ממד <sup>[2]</sup>.

החוקרים השתמשו בעוברי דגי זברה (*Danio rerio*) כדי לבדוק את רעילותם של חלקים שהודפסו במדפסות תלת-ממד. מין זה מקובל כמודל לבדיקת רעילות בשל השתייכותו לחולייתנים, התרבותו המהירה, הדמיון הגנטי הרב בינו לבין בני אדם, וכן בשל היותו שקוף, תכונה המקלה על החוקרים לאבחן בו מומים. החלקים ששימשו למחקר הודפסו בשתי טכנולוגיות התלת-ממד הזמינות ביותר לרכישה: סטראוליתוגרפיה – (stereolithography)

Fused Deposition – המבוססת על פוטופולימר נוזלי המתמצק בחשיפה לאור, והתכה ומיזוג לצורך מידול – Fused Deposition Modelling (FDM). החוקרים בחנו את שיעור הבקיעה של עוברי דגי זברה שנחשפו לחלקים, את שרידותם ואת המומים שנמצאו בהם.

לצורך הניסוי הודפסו דסקות בקוטר 40 מ"מ ובעובי 4 מ"מ מחומרים סטנדרטיים למדפסות תלת-ממד. במדפסת FDM הודפסו דסקות מאקרילוניטריל בוטאדיאן סטירן (ABS), חומר נפוץ בתעשיית הפלסטיקה. במדפסות STL הודפסו דסקות משרפים אקריליים נוזליים, המתמצקים בחשיפה לאור. לאחר ההדפסה, נוקו הדסקות בהתאם להוראות היצרן. נוסף על כך, השתמשו החוקרים בדסקות STL, שעברו טיפול נוסף באמצעות חשיפה לאור על-סגול. עוברי דגי הזברה חולקו לארבע קבוצות שנבדלו ביניהן בסוג החשיפה: FDM, STL, STL, ו-90 עוברים נחשפו לכל סוג דסקה בצלחות פטרי סטריליות עם מים על-טהורים (ultrapure water).



עוברי דגי זברה (Danio rerio) שנחשפו לחלקים שהודפסו במדפסות תלת-ממד באמצעות טכנולוגיית סטראוליתוגרפיה, סבלו כולם ממומים, ומתן תוך שבוע | צילום: Marci (CC BY-NC-ND 2.0)

**התוצאות מעוררות דאגה.** שיעור הישרדות העוברים מקבוצת ה-FDM היה קרוב לזה של קבוצת הביקורת, אבל בקבוצת ה-STL הסתבר כי אחרי שלושה ימים נותרו פחות ממחצית העוברים, וכולם מתו עד היום השביעי. בבדיקת שיעורי הבקיעה נראתה מגמה דומה. החוקרים השתמשו גם בשישה מומים כדי להעריך את רמת הרעילות של החלקים המודפסים. כל העוברים שנחשפו לחלקי ה-STL היו בעלי מומים. בקבוצת ה-FDM היו פחות מומים בהשוואה לקבוצת ה-STL, אך יותר מאשר לקבוצת הביקורת, והמום השכיח היה בצקת בשק החלבון. דסקות ה-STL שנוקו באור על-סגול התגלו כרעילות הרבה פחות מדסקות ה-STL שנוקו רק לפי הוראות היצרן, אך גם בקבוצה זאת שיעורי הישרדות והבקיעה היו נמוכים משל קבוצת הביקורת, ושיעור המומים היה גבוה בהרבה ברוב סוגי המומים.

לנוכח התוצאות ולאור תפוצתן ההולכת והמתעצמת של מדפסות תלת-ממד, מציעים החוקרים לגופים האמונים על טיפול בפסולת למצוא פתרונות סילוק בטוחים לפסולת המדפסות. לאנשי מקצוע מתחום הבריאות הם קוראים להיות ערניים לרעילותם הפוטנציאלית של חלקים אלה. כמו כן, מצביעים החוקרים על הצורך בהכשרה של המשתמשים לשימוש בטוח במדפסות תלת-ממד ובהעלאת מודעותם לסכנות הגלומות בהן.

מנגד, לטענת הנציגות הישראלית של אחת החברות הגדולות בעולם בתחום ההדפסה התלת-ממדית, סטרטסיס, לא ידוע על בעיה בטיחותית לאדם או לסביבה בעקבות ההדפסות. הפולימרים התרמופלסטיים בטכנולוגיית ה-FDM נפוצים במגוון רחב של טכנולוגיות ייצור פלסטיק. ישנם תהליכים נוספים בעיבוד המשלים בטכנולוגיית הזרקת פולימרים (polyJet), שכרוכים בעבודה עם חומרים שדורשים היתרים או ידע, ושם הבחירה והאחריות נמצאות בידי המשתמש, על פי התקנים החלים עליו במקום הימצאו (זיו שדה, חברת סופאד, תקשורת אישית).

נראה כי יש להפריד בין שתי שיטות ההדפסה התלת-ממדית. בשיטת FDM מדפיסים חלק על-ידי התכת פולימר, כך שעקרונית תכונות החומר אינן משתנות, ולכן לא מפתיע שלא נצפו בעיות עם חומר זה, שהוא נפוץ ביותר. הפולימר איננו מסיס במים, ולכן יפגע בדגים רק אם הוא מאיכות ירודה ומכיל חומרים שאינם פולימרים. החומר שנבדק במאמר הוא ABS, שאם איכותו טובה, אינו אמור לעורר כל בעיה.

לעומת זאת, בשיטת SLA מתחילים במונומרים, וגורמים להם להפוך לפולימר תוך כדי תהליך ההדפסה. אם הפלמור מלא (polymerization) – הפיכת המולקולות הקטנות יחסית, המונומרים, למולקולת ענק אחת – פולימר, יתקבל פולימר שאינו מסיס במים. אם לא בוצע פלמור מלא, עלולים להישאר מונומרים נפרדים, שחלק מהם עשויים להיות מסיסים במים. במקרה כזה, טבילת החלק המודפס במים עשויה לגרום למיצוי של מונומרים מסיסים במים. כלומר, ייתכן שלא כל החומר יהפוך לפולימר בלתי מזיק. להוכחת עניין זה החוקרים פשוט המשיכו את תהליך יצירת הפולימרים על-ידי הקרנה נוספת של החלק המודפס, ואכן הרעילות קטנה. יש לזכור כי במדפסות מסוג SLA ניתן לשלוט במשתני המדפסת, כך שרמת הפלמור הסופי עשויה להשתנות.

כיוון שיש הרכבי 'דיו' שונים למדפסות SLA, ככל הנראה לא ניתן לטעון טענה גורפת על רעילות. מה שברור הוא שדיו ל-SLA עשוי להיות בעייתי יותר מהדיו ל-FDM. יש לזכור כי בשלב זה מדפסות SLA בדרך כלל אינן נמצאות בשימוש ביתי, כך שכללי העבודה צריכים להיות מתאימים לסביבה תעשייתית או אקדמית (פרופ' שלמה מגדסי, האוניברסיטה העברית בירושלים, תקשורת אישית).

למחפכת מדפסות התלת-ממד שאנו ניצבים בפניה, עשויות להיות השפעות סביבתיות חיוביות ושליליות. שינויים בדפוסי הייצור, בשרשרת הצריכה ובתמהיל הפסולת הביתית הם רק חלק מההשפעות הסביבתיות שיש לתת עליהן את הדעת.

## מקורות

1. Canalys. 2014. [3D printing market to grow to US\\$16.2 billion in 2018](#). Press release 31 Mar 2014.
2. Oskui MS, Diamante G, Liao C, et al. 2015. Assessing and reducing the toxicity of 3D-printed parts. *Environmental Science & Technology Letters* **3**(1): 1-6.