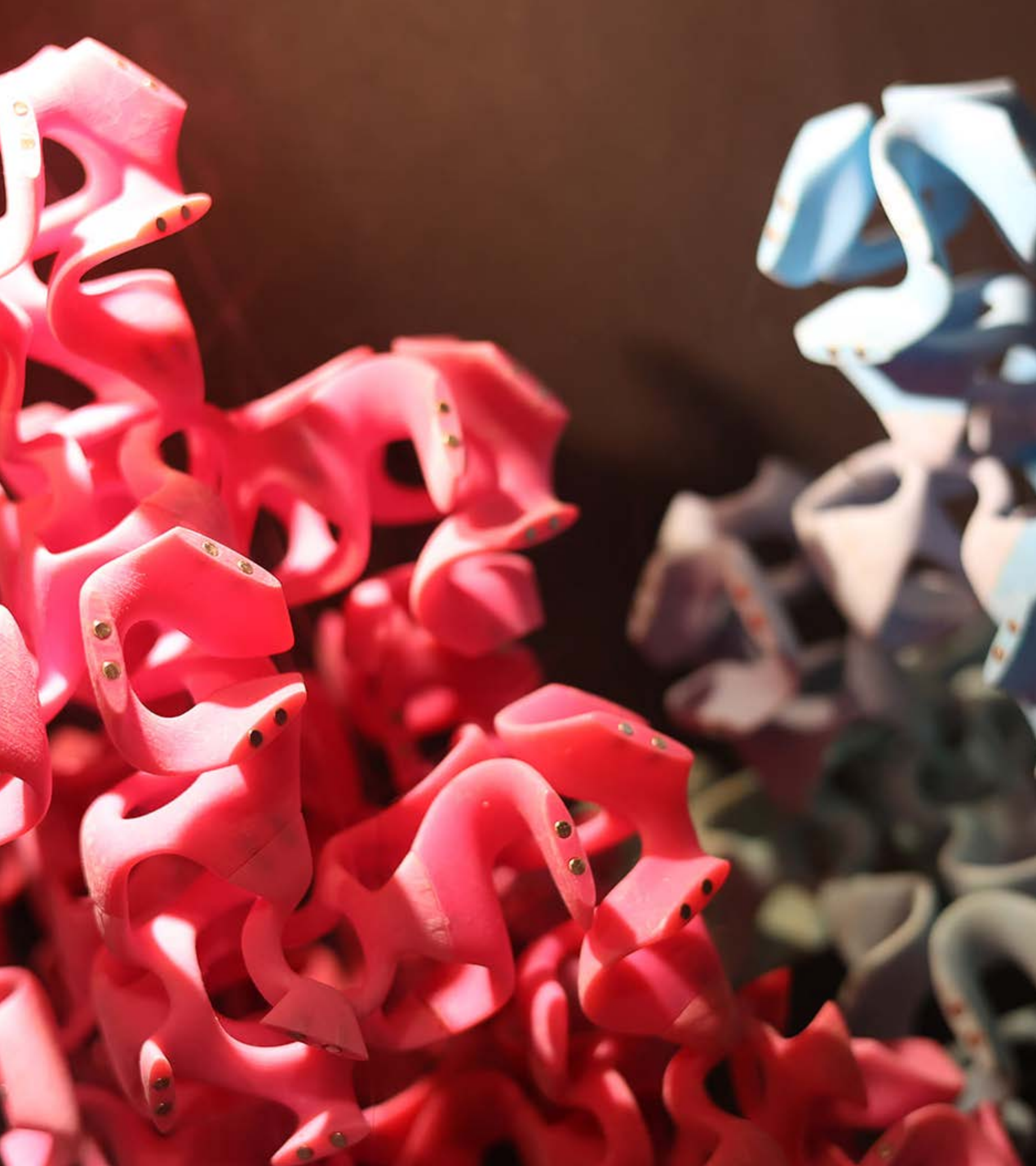




החופש חִסְרָהּ לִבְרִיאָה THE FREEDOM TO CREATE

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים



מסע בין עולמות של חומה, קוד ויצירתיות

חיינו מתנהלים במקביל בעולם הפיסי והדיגיטלי והצורך לעבור ביניהם הולך וגובר. טכנולוגיות התכנון והייצור הדיגיטליות הן אלו המסייעות לנו להעביר את ה"תרבות החומרית", החפצים המבטאים את הצרכים, הרצונות ואף הזהות, האישית והקולקטיבית שלנו בין אותם עולמות. ייצור הוא מימוש אובייקטים פיסיים מנתונים דיגיטליים, בעוד סריקה והדמיה הן התהליכים ההפוכים של המרת חפץ פיסי לייצוג דיגיטלי.

חלק ניכר מהחופש המאפיין טכנולוגיות אלו נשען על אופיין המתמטי והחישובי; צורות חדשות ואינספור ווריאציות שלהן נוצרות מנוסחאות ומודלים מתמטיים שלא ניתן כלל לייצור באופן מסורתי.

החפצים בעולם הדיגיטלי הם רק ספרות וסימנים בקבצי מחשב. הם חופשיים מכל אילוץ ואינם מושפעים מכח הכבידה, מלחץ האוויר, מרוחות ומרטיבות. בלחיצת מקש, הם יכולים לשנות את צבעם, גודלם וצורתם. הייצור, השלב בו עוברים אותם חפצים מהעולם הדיגיטלי לפיסי, מגביל חלק מחרויות אלו, אך מוסיף אחרות. חומרי הגלם, יחד עם טכנולוגיות ותהליכי הייצור, קובעים גם הם את תכונות החפץ ומאפשרות שליטה עליהם. זהו סודה של היצירה הדיגיטלית, השילוב שבין הרעיון, התכנון והייצור.



בתערוכה זו, "החופש ליצור" ניסינו להציג למבקרים, את הנושאים והמושגים המלווים את עולם הייצור דיגיטלי. מצד אחד המדע והטכנולוגיה המסתתרים במכשירים ובמכונות, ומצד שני ההיבטים החברתיים והתרבותיים המשפיעים ומושפעים מאתנו בני האדם שהחשוב בהם הוא החופש, אמיתי או מדומה, שנותן לנו השילוב והמעבר בין העולם הפיסי לדיגיטלי.

בינה מלאכותית – לחקות את המוח?

בינה מלאכותית (AI-ARTIFICIAL INTELLIGENCE) היא יכולת מכונה (לרוב מחשב) לחקות חשיבה והתנהגות אנושית, כולל היכולת ללימוד עצמי והשתנות עם הזמן.

בסיוע בינה זו, יכול המחשב לקלוט מידע, לעבדו, לקבל החלטות ולבצע פעולות באופן שבעבר נחשב ייחודי לבני האדם: פענוח תמונות וזיהוי פרטים בתוכם, זיהוי והבנת קולות וצלילים, הבנת משמעות טקסטים ואף קבלת החלטות בתחומים המשתנים כמעט אקראית.



ווקסלים – פיקסלים שצמחו לגובה

ווקסלים (VOXELL) הם אלמנטי נפח (לרוב בצורת קוביות) המגדירים חפץ תלת ממדי בעולם הדיגיטלי. בדומה לפיקסלים היוצרים תמונה דו ממדית, ככל שהווקסלים קטנים יותר, ניתן לדייק יותר בפרטי החפץ ולהגדירו ברזולוציה טובה יותר. מצד שני, כמות הווקסלים הנדרשת תהיה גדולה מאד, בפרט בגלל שהווקסלים "ממלאים" את כל נפח הגוף, בניגוד לייצוג על ידי פוליגונים/משולשים המגדירים רק את המעטפת. לכן, משתמשים בייצוג על ידי ווקסלים בעיקר במודלים לחפצים בהם יש חשיבות לא רק לצורה החיצונית אלא גם למבנה ובעיקר לתכונות של חלקים פנימיים בתוך החפץ. הדמיות וסריקות רפואיות, תכנון חלקים ורכיבים העשויים מכמה חומרים. בדומה לתמונה בה ניתן להגדיר צבע לכל פיקסל, במודל המורכב מווקסלים ניתן להגדיר תכונות שונות (קשיות, צבע, שקיפות, הולכת חום וחשמל וכו') לכל ווקסל.



שימוש ברובוטים – האם יחליפו את בני האדם?

לרובוטים תפקיד בעולם היצור הדיגיטלי, והם מסוגלים לא רק להחליף אנשים בביצוע עבודות פיסיות קשות, משעממות ומסוכנות אלא גם הרבה יותר. רובוטים מודרניים מצוידים במצלמות ובחיישנים בעזרתם הם קולטים מידע מהסביבה, במחשבים מהירים העוזרים להם לעבד מידע זה ומגוון רחב של זרועות, תפסנים, מנועים ומכלולים מכניים מדויקים המאפשרים להם לבצע באופן עצמאי כמעט על פעולה: ניתוחי עיניים, איסוף דגמי סלעים על כוכבים רחוקים, נטרול פצצות וכמובן ייצור, בניה והרכבה בכל קנה מידה, מחציבת סלעים ובניית רבי קומות ועד הרכבת רכיבים אלקטרוניים זעירים.

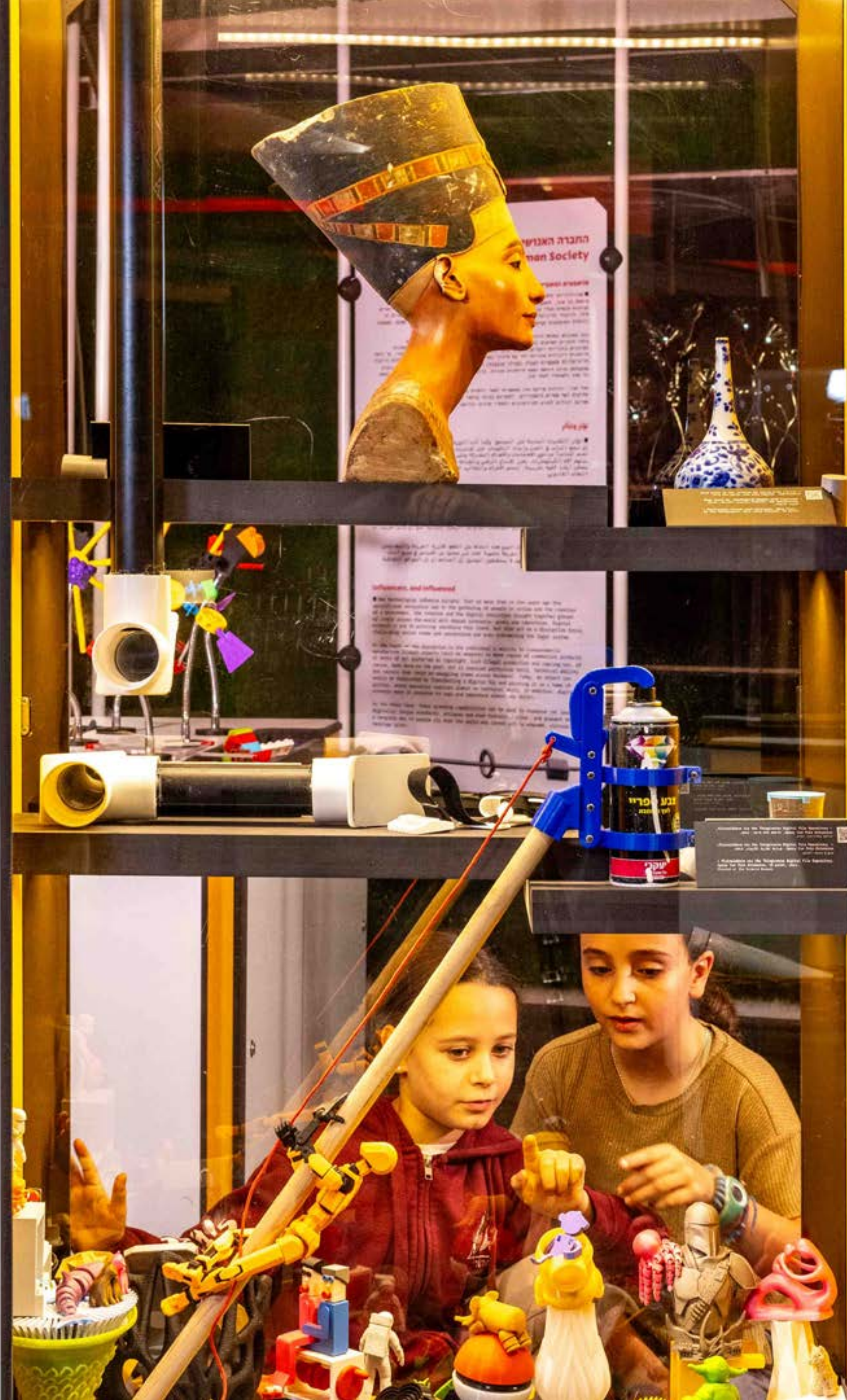


החברה האנושית – מושפעים ומשפיעים

טכנולוגיות חדשות משפיעות על החברה. כמו שהמהפכה החקלאית הביאה, כבר לפני יותר מ-10,000 שנה, להתקבצות אנשים בערים וליצירת ממשל, האינטרנט והמהפכה הדיגיטלית יוצרים קבוצות אנשים בעלי עניין, מטרות ואף זהות משותפת גם כשהם מרוחקים אלפי קילומטרים זה מזה.

הייצור הדיגיטלי והדפסה תלת ממדית מחזקים מגמה זו אך פועלים גם ככוח משבש, המאתגר נורמות ומוסכמות חברתיות ואף עלול לערער את מערכת החוק.

בלב השיבוש נמצאת היכולת של היחיד לייצר באופן עצמאי חפצים מוחשיים, לעתים בלתי חוקיים לשימוש (כלי נשק..) או העתקים של מוצרים מסחריים או יצירות אמנות המוגנים בזכויות יוצרים. ייצור בלתי חוקי והעתקות כאלו נעשה כמובן כבר גם בעבר, אך דרשו מיומנות ויכולות טכניות יחד עם סיכון. יכולות הייצור הדיגיטליות מאפשרות העברה רק של קבצים דיגיטליים וייצור במדפסת ביתית שהפעלתה אינו דורשת כמעט מיומנות טכנית. בנוסף, סורקים דיגיטליים מאפשרים להעתיק כמעט כל חפץ ולשכפלו לאחר מכן.



שכבות – לא רק בעוגה

אחת השיטות הקלות יחסית, הן להגדרת מודל והן לייצור חפץ תלת ממדי, היא חלוקתו לפרוסות.

תוכנות המכינות קבצים למדפסות דיגטליות מחלקות את המודל התלת ממדי של החפץ אותו רוצים לייצר לסדרה של פרוסות\שכבות דו ממדיות. פרוסות הדומות לקבצי תמונה או שרטוט שקל יחסית להגדיר ולשמור. את אותן הפרוסות ניתן להדפיס בזו אחר זו אחת מעל השנייה או לחילופין לחתוך אותן מיריעות חומר שטוח ולהדביק או להצמיד אותן יחד. חיתוך דו ממדי כזה הוא פשוט יחסית וניתן לבצעו בעזרת קרן לייזר אותה מזיזים רק במישור בעזרת שני מנועים בלבד. עובי השכבות ומספרן קובע את דיוק וחלקות פני השטח של החפץ. הרבה שכבות דקות יאפשרו ייצור חפץ חלק ומדויק, אך ידרשו יותר זיכרון ומשאבי מחשב והייצור יימשך זמן ארוך יותר.





פוליגונים – לבנות במשולשים

פוליגון (או מצולע) הוא צורה שטוחה סגורה העשויה מקווים ישרים וכל פוליגון ניתן לחלק למשולשים. פני השטח (מעטפת) של גופים תלת ממדים אינם תמיד מישוריים ושטוחים, אך תמיד ניתן "לעטוף" אותם במשולשים צמודים זה לזה.

זהו הרעיון שמאחורי מודלי רשת (MESH) תלת ממדים. במקום להגדיר כל נקודה שעל מעטפת הגוף – מסתפקים רק במיקום של קודקודי המשולשים. רשת עם יותר נקודות מתארת במדויק יותר את פני השטח של הגוף והמודל "חלק" יותר. הקובץ הדיגיטאלי והזמן והמשאבים שידרשו לעיבודו יגדלו כמובן, אך עדיין הרבה פחות מאשר ייצוג כל נפח הגוף בווקסלים. כיום מאפיינים ומיצרים בעזרת פוליגונים צורות ביו מורפיות וצורות מופשטות אחרות שבלתי אפשרי להגדירן אחרת. יתרון נוסף הוא שניתן לייצר את החפץ מחומרים שטוחים כמו זכוכית, לוחות מתכת או עץ, שכל מה שצריך זה לחתוך למשולשים ולחבר יחד.



תנועה במרחב – להגיע מכאן לשם

כדי לייצר עצם תלת ממדי, צריך לדעת במדויק לא רק את צורת העצם, אלא גם את מיקומו בחלל בו ייוצר ואת כיוונו במרחב ובהתאם להזיז את "כלי הייצור". אך שיטות ייצור שונות ואף עצמים שונים דורשים לפעמים תנועה אחרת. לייזר של מכשיר חיתוך למשל מספיק להזיז במישור בתנועה של שני צירים, אך מדפסת תלת ממד הפועלת בשיטת FDM, צריכה להזיז בשלושה כיוונים את מיטת ההדפסה ו/או ראש ההדפסה, כדי לבנות במדויק את השכבות בהתחשב גם בכוח המשיכה.

קימות מספר דרכים להגדיר נקודה במרחב ולניווט בו:

מערכת צירים קרטזית (XYZ) בה התנועה נעשית על גבי פסים/מובילים ישרים. שיטה זו היא הנפוצה בצורבי לייזר ומדפסות תלת ממד פשוטות דלתא (DELTA), שלוש זרועות או חוטים המחזיקים את ראש ההדפסה ועל ידי שינוי אורכם מזיזים אותו למקום הרצוי.

רדיאלי או קוטבי (RADIAL/POLAR) בה מיטת ההדפסה והחלק שעליה מסתובבים וראש ההדפסה או החיתוך נע בקו ישר.

SACARA המשמשת בעיקר להזזת זרועות רובוטיות בתנועות מעגליות באותו מישור.

שלוש הדרכים האחרונות, בניגוד לקרטזית, דורשות חישוב מתמטי (קינמטיקה הפוכה) להגדרת הקשר שבין המיקום במרחב לתנועת המנועים הנדרשת כדי להגיע אליו.

סריקה בתלת־ממד – מחפץ לקובץ

הקשר בין העולם הדיגיטלי לפיסי הוא דו־סטרי. כמו שכלי הייצור הממוחשבים הופכים מודל דיגיטלי לחפץ מוחשי, סריקה תלת ממדית מאפשרת להפוך כמעט כל חפץ למודל מתמטי אותו ניתן לשמור כקובץ מחשב שאפשר לשנות ולעבד בעזרת תוכנות מתאימות לפני שמייצרים העתק.

הטכניקות המקובלות לסריקות אלו הן:

- פוטוגרמטריה, המבוססת על צילום סדרה של תמונות דו ממדיות "רגילות" מזוויות שונות ובעזרת רמזים חזותיים (כמו זיהוי של אותם אזורים בכמה תמונות) ויצירת רשת (MESH) תלת ממדית של מעטפת החפץ. יתרונה של שיטה זו הוא שאינה מחייבת ציוד מיוחד (לכן תוכלו למצוא אותה גם באפליקציות לטלפונים סלולאריים) ושבנוסף לצורה המודל המתקבל הוא צבעוני.
- מצלמת המשמשות בקונסולות משחק משלבות מצלמה רגילה עם חיישן עומק (הקרנת אור אינפרה אדום בצורה מוגדרת וקליטתו בחיישן מתאים). יתרונה במהירת הצילום ופשטותה.
- מדידת החזר אלומת אור (LIDAR-LIGHT DETECTION AND RANGING: הקרנת אלומת אור צרה (לרוב לייזר) ומדידת זמן חזרתה. הזאת האלומה מאפשרת לסרוק במהירות את כל החפץ. יתרונותיה בדיוק גבוה וטווח גדול יחסית ומשמשת לכן במערכות אתראה בכלי רכב.





בהתאמה אישית – לכל אחד לפי צרכיו

אחד מיתרונות הייצור הדיגיטלי הוא היכולת לייצר בהתאם לדרישות ולצרכים ספציפיים. כל חפץ מיוצר באופן יחיד ויחודי בהתאם לקוד שנכתב עבורו. שינוי החפץ מחייב רק שינוי של אותו קוד. כיום, חלק מתעשיית האופנה מנצל טכנולוגיות ייצור דיגיטלי כדי לשלב התאמה אישית גם בייצור בקנה מידה תעשייתי להמונים.



פולימר באור – הקשיה בהבזק

אור, ובפרט או על סגול, (UV) ממלא תפקיד חשוב בטכנולוגיות הדפסה תלת ממדיות כמו סטריאוליטוגרפיה (SLA), עיבוד אות דיגיטאלי (DLP) ובהתזת פוליג'ט (POLYJET). הרעיון הבסיסי בשיטות הללו הוא פילמור (מיצוק) נוזל או ג'ל בעזרת אור על-סגול הנעשה תוך זמן קצר יחסית.

טכנולוגיה חדשה יחסית המבוסס גם היא על פילמור באור היא הדפסה נפחית (VOLUMETRIC) המבוסס גם על מיכל מלא בפוטופולימר נוזלי, אך הפילמור נעשה על ידי מערך אלומות אור (לרוב לייזר) המגיעות מכיוונים שונים ובעצמות שונות ומדפיסות את החפץ כמעט בבת אחת.

חומרים פוטופולימרים המתמצקים בהשפעת אור משמשים גם כדבקים (למשל אצל רופאי שיניים או יצרני כלי זכוכית), לכות ג'ל לציפורניים, יציקת תכשיטים מחומרים פלסטיים ואף כצבעים ולכות הגנה בעולם ההדפסה הדו ממדי.



עיוות פלסטי – מתכופף ולא נשבר

תהליך הייצור הפיסי הוא בעצם הפיכת חומר גלם (מצורתו הגולמית) לצורה הרצויה. ניתן לעשות זאת בשלוש דרכים: הסרת חומר, הוספת חומר או עיוות צורתו. חלוקה זו מתאימה הן לשיטות ייצור מסורתיות (ואף עתיקות) והן לשיטות דיגיטליות מודרניות.

יתרונות תהליכי העיוות הוא שאין צורך להוסיף או לאבד מחומר הגלם. אך הם מוגבלים לשימוש בחומרים בעלי "פלסטיות" מתאימה. כלומר שומרים על צורתם לאחר העיוות (בניגוד לחומרים אלסטיים כמו גומי) ושאינם קשיחים ושברים (כמו זכוכית). מדובר לרוב במתכות ובחומרים פלסטיים (שחלקם ניתן לעיוות רק בזמן חימום).



מאז ועד היום – מה השתנה ומה לא

הייצור הדיגיטלי, עם כל ה"קסם" הטכנולוגי וההנדסי והמורכבות המדעית ומתמטית שמאחוריו, הוא בסך הכל עוד שלב ברצף הכרונולוגי המלווה את התפתחות המין האנושי בשליטתו בחומר והפיכתו לחפצים שימושים. כחלק מהתפתחות התרבות בכלל. כל עוד אנו, כמין האנושי, ממשיכים להתקיים כיצורים פיזיים בעולם מוחשי, אנו צפויים להמשיך לייצר עצמים.

טכנולוגיות דיגיטליות, כמו הדפסה תלת ממדית, רק משכללות יכולות אנושיות אלו. הן מאפשרות ליחידים ולקבוצות חופש ליצור וחופש לשתף יצירה זו בדרכים רבות ומגוונות. למשל, שילוב טכנולוגיות דיגיטאליות עם אומנויות מסורתיות. נגרים המשלבים חלקים חתוכים בלייזר ברהיטים, אמן קרמיקה המעבד חימר דיגיטאלית, מעצב טקסטיל המייצר בגדים באריגה תלת ממדית. תכנון והדמיה בעזרת תוכנות מתאימות, שיתוף פעולה עם יוצרים מכל העולם, קניה ומכירה באמצעות הרשת ועוד.





על התערוכה – גם אנחנו בדיגיטל

בפיתוח ובניית תערוכה זו ניסינו להמחיש את חופש היצירה של שימוש בכלי התכנון והייצור הדיגיטליים:

תוכנות וסימולציות, מרחבי עבודה דיגיטאלית שיתופית, מסרוני דוא"ל, שיחות וועידה. כרסום ועיבוד חלקי עץ בבקרת מחשב (CNC), חיתוך בלייזר, הדפסת טקסטים במדפסות דיגיטליות, ייצור חלקי ניילון בסנטור לייזר בררני (SLS), העברת שרטוטים ב-PDF ועוד ועוד.

כלים דיגיטליים אלו אפשרו התאמה אישית של חלקים, פתרון מורכבויות גיאומטריות (כגון המחבר הכדורי התלת ממדי המיוצר בפעולה אחת ללא צורך בחיבור ובהרכבה), הזמנת חלקים מחו"ל ושילובם עם חלקים בייצור מקומי וכאלו שיוצרו בבתי המלאכה ובסדנאות המוזיאון. מחזורים קצרים ומהירים של התאמות ושינויים, חיסכון בחומר ודיוק בכל מקום שנדרש.

קיימות – לטובת הדורות הבאים

לכאורה, לא לייצר כלל אקולוגי יותר מלייצר, אך לא תמיד הדבר מעשי. מצד שני, ייצור דיגיטאלי מציע יתרונות רבים לטכנולוגיות ולתהליכים הקיימים, עם יכולת לשפר את הרגלי הייצור הקיימים שלנו תוך התחשבות בסביבה, באנשים ובמשאבים. למשל:

- מוצר בעל התאמה גבוהה לצרכי המשתמש יגרום לשימוש ממושך יותר במוצר.
- הדפסה לפי ביקוש משמעותה שהמוצר מתקיים רק בצורתו הדיגיטאלית ומיוצר פיסית רק כשצריך, מה שמבטל את הצורך בחללי אחסון ובמלאי.
- ייצור מקומי חוסך את פליטות הפחמן הנגרמות משינוע מיותר. ניתן לרכוש קובץ דיגיטלי של המוצר, לייצרו קרוב ולחסוך גם את זמן הובלה.
- ייצור דיגיטאלי מאפשר לשפר את סביבתנו: הדפסה בתלת מימד של שוניות אלמוגים, פרוטזות לצבי ים או לציפורים פצועות ויכול לשמש כמקור חופשי לכלים חינוכיים בתחומים רבים.



קרדיטים

אוצר שותף ומעצב: פרופ' דב גנשרוא

אוצר שותף ומפתח מוצגים: ד"ר אמיר בן שלום

מנהל צוות טכני: אורי סיני

עיצוב ופיתוח מוצגים אינטראקטיביים: אייל פוגל

עיצוב גרפי: אביב חן

פיתוח מוצגים: אורי קאופמן, איליה פורטוס, אלעד

שפירא, אמיתי בן שלום, ארד שפירא, דפנה קפלן, דקל

אזולאי, יותם עמרני, יעקב רוזנברג, ישי קריצ'ר, ליענה

אלון, עומר אלירז, עידו הופמן, שגיא חולי, שלו נוימן

ייצור מוצגים: צוות בית המלאכה של מוזיאון המדע: ברוך אונגר, גיא קלינגר,

גינדי ימליאנוב, דימה פולנסקי, דני שלם, סאמר אסלי, עומר יצחקוב, רונן בן

זאב, שמוליק אוליאל, תמר פוקס

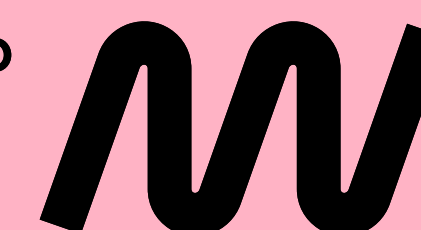
תרגומים ועריכה לשונית: רוני בן חורין, שרי פייגלסון

פיתוח קונספט: ורדה גור בן שטרית

ניהול פרויקט: רוני בן חיים

יועצים: פרופ' שלמה מגדסי, פרופ' ערן שרון

תודה מיוחדת: נעמי קמפפר, חברת סטרטסיז



מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem