# השאלות של לאונרדו
# Leonardo's Questions
# أسئلة ليوناردو

מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem

# השאלות של לאונרדו

**מדוע לאונרדו דה וינצ'י חשוב לנו?**

לאונרדו די סר פיירו דה וינצ'י נולד סמוך לכפר וינצ'י שבטוסקנה ב-15.4.1452, ונפטר ב-2.5.1519 בקלו שבעמק הלואר, צרפת. כבר במהלך חייו הוכרה גדולתו כאומן, מהנדס ואיש אשכולות, וב-500 השנים שמאז פטירתו היה לאייקון תרבותי ולמי שמגלם בדמותו את מושג איש הרנסנס רחב האופקים. אולם בעוד שיצירותיו האומנותיות השפיעו רבות על אומנים לאורך הדורות, מבט מפוכח מגלה שפיתוחיו ההנדסיים לא הובילו למהפכות טכנולוגיות, ו"המצאותיו", שצמחו בהשראת דמיונו הפורה, לא קרמו עור וגידים. יתרה מזו, גילוייו המדעיים, גם אם הקדימו את זמנם, לא התפרסמו במשך מאות שנים ותרמו מעט לקידום הַידע האנושי.

**לאונרדו חשוב עבורנו במוזיאון המדע בשל השאלות ששאל, הסקרנות שהובילה אליהן והאופן שבו חקר אותן.**

ב-7,000 עמודי המחברת שהשאיר, שהם ככל הנראה רק כשליש מאלה שחיבר, מתגלה לאונרדו כאדם בעל סקרנות ללא גבול. בווינצ'י וסביבותיה, בפירנצה, מילאנו, רומא וצרפת, בחיק הטבע, בעיר ההומה, במעבדה ובסטודיו, לאונרדו לא חדל לשאול שאלות, בכל נושא אפשרי.

שאלותיו של לאונרדו הובילו אותו להתבוננות מקיפה ומעמיקה בעולם שסביבו. ידיעותיו הרבות במִגוון תחומים אפשרו ללאונרדו ליצור **אנלוגיות** (היקשים) בין תופעות שונות שבהן צפה, וכישוריו הטכניים, בשילוב סבלנותו סייעו לו לחשוף את המבנה הפנימי, **האנטומיה** של מִבְנִים ומנגנונים טבעיים ומכניים. את תצפיותיו ותובנותיו תיעד לאונרדו בכתב, ובעזרת יכולת הרישום יוצאת הדופן שבה ניחן עיבד את מחשבותיו ומסקנותיו.

בתערוכתנו, כאן בירושלים, אנו מציגים מבחר מהשאלות שבהן עסק לאונרדו דה וינצ'י בתחומי הטבע, המכניקה והאופטיקה לצד דוגמאות לרעיונותיו בתחומי המוזיקה והתיאטרון. אנו מזמינים אתכם להצטייד בסקרנות ולקחת לעצמכם זמן כדי להכיר, להתבונן, לרשום ולהנות מ**"השאלות של לאונרדו"**.

Leonardo's Questions
أسئلة ليوناردو
Why is Leonardo da Vinci important to us?
What is a Fossil?
ما هو الأحفوري؟

# אנלוגיות בטבע

סקרנותו הָרַבָּה של לאונרדו דה וינצ'י (1452-1519) ויכולת ההתבוננות יוצאת הדופן שלו, אִפשרו לו לזהות קווי דמיון בין תופעות שונות בטבע וליצור ביניהן אנלוגיות.

לאונרדו חקר את הטבע על גווניו השונים במשך כל חייו. הוא הגדיר את עצמו כ"תלמיד הניסיון", דוגל בחֵקר ובניסוי בעולם המוחשי שסביבו. זהות זו התגבשה בצעירותו של לאונרדו, במהלך שתי תקופות מעצבות בחייו: ילדותו בווינצ'י ובסביבתה, שם בילה זמן רב במרחבי הטבע, ונעוריו בבית המלאכה של אנדראה דל ורוקיו (1435-1488) שבו בא במגע בלתי אמצעי עם עולם החומר והטכנולוגיה של אותה תקופה. את ההגדרה העצמית כ"תלמיד הניסיון" הציב לאונרדו כניגוד למושג המשכיל הרנסנסי: כיוון שהוריו של לאונרדו לא נישאו, נמנעה ממנו השכלה פורמלית אשר באותה תקופה כללה בעיקר לימוד כתבים קלאסיים שזכו למעמד של סמכות שאין לערער עליה.

לאונרדו האמין שישנם עקרונות יסוד המתארים מִגוון רחב של תופעות בטבע, אך כיוון שהכלים המתמטיים שעמדו לרשותו היו מוגבלים, התקשה לנסח חוקים מופשטים על סמך התצפיות שערך. תחת זאת יצרָ אנלוגיות או היקשים שנועדו לקשור בין תחומים שונים בחֵקר הטבע.

**בתחילת דרכו** אימץ לאונרדו אָנָלוֹגִיוֹת קלאסיות שרווחו בתקופתו כגון הָאָנָלוֹגְיָה בין גוף האדם ובין כדור הארץ, שאותה זנח בהמשך דרכו. עם הזמן פיתח לאונרדו אנלוגיות רבות-עוצמה משלו. בזכות יכולת ההתבוננות שלו והתפקיד החשוב שתפסה הגיאומטריה בחשיבתו, הצליח לאונרדו לזהות תבניות צורניות דומות שהופיעו בהקְשֵרִים שונים, ולהקיש מהן על כללים דומים החלים בתחומים שונים זה מזה. כך למשל זיהה לאונרדו תבניות הסתעפות דומות בנחלים ובענפי עצים, וכן מערבולות דומות במים ובאוויר.

**שאיפתו של לאונרדו** לחשוף את המבנה הפנימי ואת אופן הפעולה של מנגנונים בטבע הובילה אותו לחֵקר האנטומיה, בראש ובראשונה של גוף האדם. כך הצליח להרחיב את האנלוגיות שיצר: הסתעפויות ישנן לא רק ביובלֵי הנהר ובענפי העץ אלא גם בכלי הדם ובָּרֵאות; מערבולות נוצרות לא רק באוויר ובמים אלא גם בלב. הכשרתו הטכנולוגית של לאונרדו אפשרה לו ליצור אנלוגיות גם בין עולם הטבע ובין מעשה ידי האדם כך ידע לְשַעֵר שיש דמיון בין היווצרות מאובנים בזמנים קדמוניים ובין תהליכי היציקה ששימשו אותו כפַסָל, וזיהה עקרונות מכניים דומים בתנועת שרירים ועצמות ובמכונות שהכיר מעבודתו כמהנדס. את שאיפתו של לאונרדו לחקות את תעופת הציפורים על-ידי שילוב בין אנטומיה אנושית ומכניקה אפשר לבחון בראי זה.

**באזור "אנלוגיות בטבע"** אנו מזמינים אתכם להתבונן סביבכם ומעליכם, ללמוד על תעופה, לזהות מערבולות והסתעפויות ולחוות מעט מהעושר שנוצר במפגש בין עולם הטבע ותלמידו, לאונרדו דה וינצ'י.

# רישום נוף מוקדם

רישום דְּיוֹ זה, של נוף טוסקני בסביבת נהר האַרְנוֹ, הוא אחת היצירות המוקדמות ביותר של לאונרדו שישנן בידינו. הוא מתוארך, בשׁוּרוֹת הטקסט שבפינה העליונה השמאלית, ל-5 באוגוסט 1473, כלומר כשלאונרדו היה בן 21. הנוף המאויר הוא ככל הנראה שילוב של אתרים אמיתיים ודמיון, ומציג נושאים שלאונרדו יחזור ויחקור במהלך חייו – גיאולוגיה, צמחייה וזרימת מים. הרישום המקורי, הידוע כ"נוף 8P" על שם מספרו הקטלוגי בגלריית האופיצי בפירנצה, הוצג במהלך 2019 בוינצ'י, עיר הולדתו של לאונרדו, לציון 500 שנים למותו של לאונרדו.

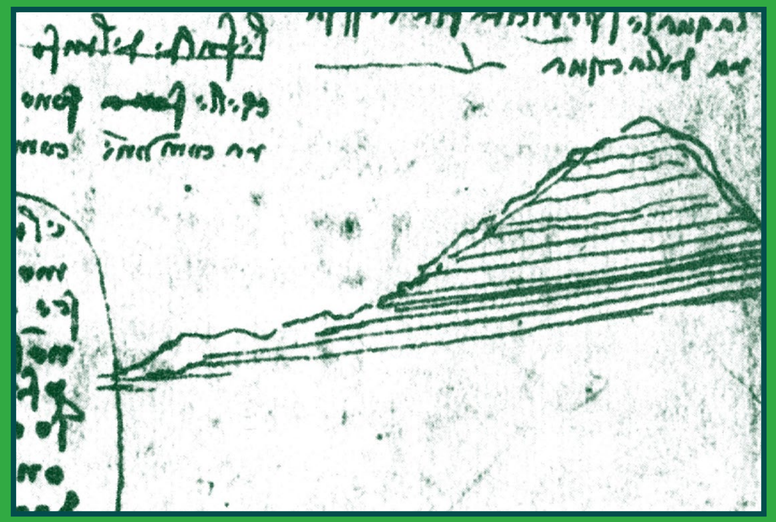
## מהו מאובן?

**מְאֻבָּן הוא שריד המעיד על קיומו של יצור או צמח אשר חי ופעל בעבר. ישנם סוגים שונים של מאובנים:**

דוגמאות למאובנים כמעט שלמים הם גופת מָמוּתָה קפואה בסיביר; בעלי חיים טְבוּעים בבִצַּת נפט או חרקים שנלכדו בשׂרף עצים שהפך לעִנְבָּר. שימור יצורים וצמחים כגון אלו לאחר מותם מחייב קבורה מהירה בתנאים דלי חמצן שימנעו עיכול של כל חומר אורגני, ויצמצמו את הפירוק הכימי של חלקי השלד.

**מאובני גוף:** קוֹנכיוֹת של רַכִּיכוֹת עשויות גיר. כאשר הבוץ סביבן מתמצק הוא מעתיק את צורתן החיצונית (דפוס), וגם מחלחל פנימה ויוצר גלעין פנימי. השלד הגירי עלול להתפורר על-ידי חומצה חלשה של מֵי גשמים, ולהפריד בין הגלעין והדפוס כאשר שוברים את הסלע.

**מאובני עֲקֵבוֹת** מעידים כי בעל חיים התגורר ופעל בסביבת מִחְיָתוֹ ושהשאיר את עקבותיו על הקרקעית או במחילות בתוך הקרקע; בדמות קדיחוֹת בתשתית קשה למגורים, או בתוך קונכיות אחרות בניסיון לְטָרְפָן. הַפְרָשׁוֹת של בעלי חיים עשויות להתאבן בבוץ הקרקעית ולְשַׁמֵּשׁ לזיהוי יוצרן.



Leicester 36r

לאונרדו דה וינצ'י נחשף למאובנים כאשר סייר כנער צעיר בגבעות טוסקנה. השאלה כיצד הגיעו מאובנים של יצורים ימיים לאזורים יבשתיים גבוהים העסיקה אותו, והוא כתב עליה רבות בקודקס לֶסֶטר (נכתב בשנים 1504-1508). בזמנו של לאונרדו הדעה הרווחת הייתה שמאובנים אלה הם תוצאה של כוחות בתוך כדור הארץ המנסים לייצר חיים בתוך סלע, או שהם שרידים של יצורים שהגיעו לאזורים אלה בעקבות המבול התנ"כי.

לאונרדו בחן ביסוֹדיות את המאובנים והגיע לתובנות מעניינות ומקוריות לגבי מקורם. לאונרדו הבין ששכבות הסלע השונות נוצרו בתקופות שונות (גם כאן, דרך אנלוגיות לדוגמאות מעולם החי והצומח כגון היווצרות טבעות בגזעי עצים). בתצפיותיו מצא שמאובנים נמצאים בשכבות סלע שונות, לכן הסיק שלא ייתכן כי מקורם באירוע מבול יחיד בהיסטוריה של כדור הארץ.

מִמְצָא מעניין נוסף של לאונרדו היה הימצאותם של "מאובני עקבות" (Trace fossils). אלה הם מאובנים שנוצרים כתוצאה מפעילותו של בעל החיים בסביבת הַמִּחְיָה שלו. הימצאותם של מאובנים כאלה שללה הן את התיאוֹריה שהמאובנים הם תצורות סלע טבעיות הן את התיאוריה שאלו שרידים של בעלי חיים שנסחפו לאזור באירוע יחיד דוגמת המבול התנ"כי. סקרנותו של לאונרדו בתצפיותיו על סלעים ועל מאובנים הביאה אותו להבנה שהקדימה את זמנה לגבי גילו של כדור הארץ; דרך היווצרותם של סלעים ודרך היווצרותם של מאובנים. רבות מתובנותיו בנושאים האלה קיבלו התייחסות ואישור מדעי רק מאות שנים מאוחר יותר, עם ההתפתחות של מדעי כדור הארץ וחֵקֶר המאובנים.

# בוטניקה

"הטבע הוא כה מהנה וכה מְגֻון, לעולם לא נמצא שני עצים הזהים זה לזה לחלוטין"

מחקריו של לאונרדו בתחום הבוטניקה מְשַׁקְפִים היטב את תפיסת עולמו הרב-תחומית. שאיפתו של לאונרדו לייצוג מדויק ככל האפשר של צמחים בציוריו הובילה אותו לשאלות ולאבחנות על המורפולוגיה של העצים; לחשיפה "אנטומית" של מבנים פנימיים בהם וליצירת אנלוֹגיוֹת בין תופעות בוטניות לתופעות אחרות בעולם הטבע.

הבוטניקה, התחום במדעי החיים אשר עוסק בחֵקֶר צמחים (ביוונית עתיקה משמעות המילה botane היא צמח), התמקדה עד תקופתו של לאונרדו בחֵקֶר השימושיים הרפואיים לתועלת האדם. אולם סקרנותו של לאונרדו ויכולת ההתבוננות שלו הובילו אותו להבנות לגבי מבנה הצמח.

לאונרדו חקר את האופן שבו צמחים מתפתחים, והבחין בין השאר בתופעות דוגמת הניצן היוצא מחֵיק העלה, וכי צמחים נוטים לכיוון השמש (פוטוטרופיזם). סקרנותו של לאונרדו בנושא הסתעפויות בטבע הובילה אותו לנסות למצוא חוקיות בפיצול ענפי העץ. גילוי נוסף של לאונרדו הוא הצלחתו להבין את המידע הטמון בטבעות הצמיחה השנתיות שאפשר לראותן בחתך גזע.

## "חוק לאונרדו" והסתעפויות

מתבוננים מעלה בעץ ההדר התלוי מהתקרה.
למה דומים הסתעפויות השורשים? למה דומים הענפים?

כאשר לאונרדו התבונן בענפי העץ הוא גילה כי הענפים מתפצלים לענפי מִשְׁנֶה. על סמך תצפיותיו ניסח לאונרדו כְּלָל אשר לפיו שטח החתך של הענף שווה לסכום החתכים של ענפי המשנה המתפצלים ממנו. כלל זה מכונה "חוק לאונרדו".

ה"חוק" נבחן בשני היבטים: ההיבט המכני – יכולת העץ לשׂאת את משקלו העצמי ועמידותוֹ כנגד שבירה כתוצאה ממשׂב רוח; ההיבט ההידראוּלי – הוֹבָלַת המים לאורך הצמח.

אולם, אין מספיק תמיכה עובדתית וניסויית התומכת ב"חוק לאונרדו": לאונרדו התייחס לענפים כאל צינורות מים, אך כיום ידוע לנו שחתך הענפים אינו שווה לחתך צינורות ההובלה שבתוכו (הענפים מכילים רקמות נוספות מֵעֵבֶר לצינורות ההובלה). בהיבט המכני לאונרדו לא הביא בחשבון משתנים אחרים כגון הזוויות בין הענפים ומשקל הענפים.

עם זאת, את חוק לאונרדו ראוי לבחון במסגרת אנלוֹגיה רחבה יותר של לאונרדו בנושא **הסתעפויות**. בצמח אפשר לִצְפּוֹת בהתפצלויות בשורשים, בענפים ואף בצינורות ההובלה הנמצאים בעלים עצמם.

Paris M 78v

איור המדגים את "חוק לאונרדו"

Windsor RCIN 912676

מפה של נהר (1507 - 1508)

לאונרדו דימה את מערכות ההובלה בצמח לזרימת מים בנחלים ובנהרות: "כל ענפי העצים בכל שלב של גובהם, כשהם מאוחדים, שווים לעובי הגזע שלהם. כל הסתעפויות זרמי המים יחד, בכל שלב באורכם שבו הם שווים בתנועתם, שוות גם לגודל זרם האב שלהן" (Paris I 12 v).

## מה בטבעת?

בשנת 322 לפני הספירה גילה הפילוסוף היווני תיאוספרטוס שאפשר לקבוע את גיל העץ לפי מִסְפָּר טבעות הצמיחה שלו. עובדה זו נכונה לצמחים הגדֵלים באזורים שבהם יש עונות שנה מֻבְחָנות. כאשר מתבוננים בחתך עץ ניתן לראות טבעות כהות ובהירות. הטבעות הבהירות מעידות על עונה גשומה (חורף בישראל), ואילו הטבעות הכהות מעידות על עונה יבשה (קיץ בישראל). בעונת היובש קצב הצימוח איטי. שנה בחיי העץ מצוינת על-ידי טבעת כהה וטבעת בהירה. המדע שעוסק בתארוך גיל העץ מְכֻנֶּה דֶנְדְרוכרוֹנוֹלוגיה (ביוונית: דנרון – עץ, כרוֹנוס – זמן).

**האם בחתך העץ רוחב הטבעות קבוע?**

ליאונרדו דה וינצ'י חידש והוסיף כי מעֵבֵר לגיל העץ אפשר ללמוד מטְבעות הצמיחה השנתיות על התנאים ששׂררו באותה שנה. אם מתבוננים בחתך ניתן לראות כי הטבעות הפנימיות הקרובות למרכז הגזע רחבות יותר. הדבר נובע מכך שקצב גידול העץ הצעיר מואץ, ולאחר כמה שנים חלה האטה בקצב גידולו. באמצעות חקֶר טבעות צמיחה שנתיות אפשר ללמוד על האקלים ששׂרר טרם תקופות תיעוד הטמפרטורות והמשְקעים, וניתן לאתר אירועי אקלים קיצוניים; אירועי חום וקור; שיטפונות ושׂריפות יער.

## האם אפשר למצוא את הצפון בהסתכלות בגדֶם עץ?

בחתך העץ במוצג ניתן לראות כי הטבעות נוטות ומתרחבות לכיוון מסוים (המרחקים ממרכז העץ לגזע שונים).

לאונרדו דה וינצ'י הבחין כי הטַבָּעות בגזעי עצים מתרחבות לכיוון דרום. הסיבה לכך היא שהכיוון הדרומי מקבל יותר שמש מהכיוון הצפוני, ולכן העץ מכַוֵן את צמיחתו לעבר המשאב החשוב, האור. אם תתבוננו בעץ בשטח פתוח תוכלו להבחין כי גם הפריחה והפירות מרובים יותר בצידו הדרומי של העץ.

אז אם אתם מאבדים את דרככם ביער תוכלו למצוא את הצפון באמצעות מבט על גדם עץ. (אפשר למצוא את הצפון גם בהתבוננות בחִזָיוֹת הגדלֵות על הצד הצפוני והלח של העץ).

# הלב

מחקריו של לאונרדו על מבנהָ הלב ותפקודו היו תוֹלדָה של סקרנות טהורה, והביאו אותו לגילוייו המשמעותיים ביותר בתחום האנטומיה. לאונרדו עסק רבות באנטומיה של גוף האדם. הוא צייר רישומים רבים של השרירים, העצמות והאיברים השונים.

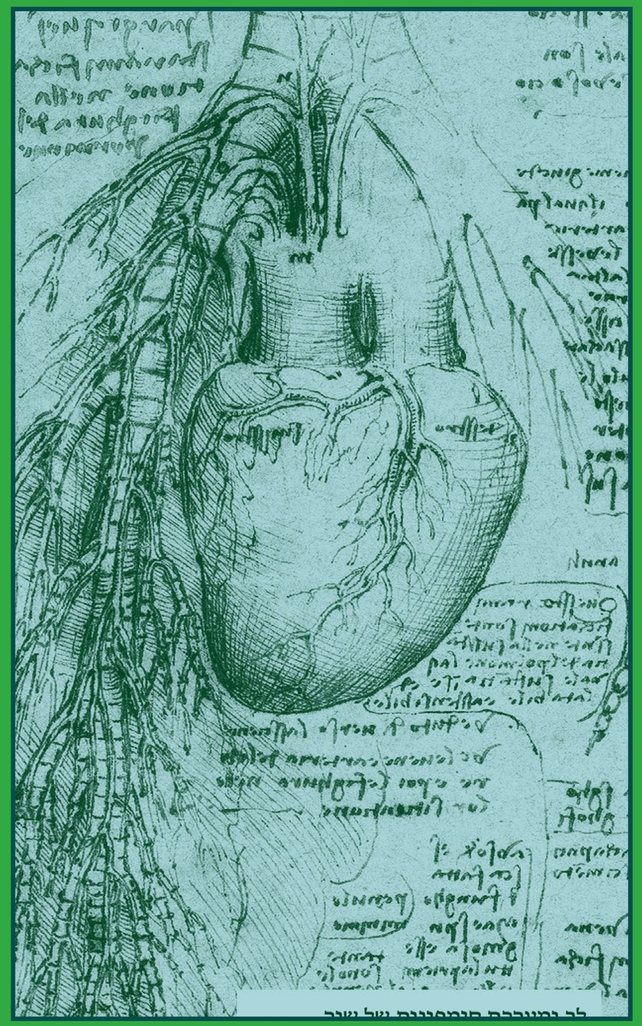
אולם בניגוד לרישומים אלה, שתרמו ליכולתו של לאונרדו לייצג בציוריו דמויות אנוֹשיוֹת, מחקריו על הלב האנושי, שאותם שכלל לאורך השנים, נבעו מרצונו של לאונרדו למצוא מענה לשאלות על תפקוד הגוף האנושי.

בניגוד למבנהָ העין, נושא שנחקר ופֻתַּח בימי הביניים, הַידָּע בתקופתו של לאונרדו על מבנה הלב ותפקודו לא היה שונה באופן מהותי מקביעותיו של גלנוס (129-200 אחרי הספירה) אשר כתביו הנחו מלומדים מהעת העתיקה ועד לרנסנס. הלב על פי גלנוס נחשב לאיבר בעל רִקְמָה ייחודית ומבנה של שני מדורים שביניהם מְפַעְפֵּעַ הדם. הלב בתפיסה הגלנית הוא המקור לחום הגוף, ותפקידו להזרים בעורקים את "הנוזלים החיוניים" (vital spirits) הנספגים באיברי הגוף ומתפרקים.

**בתחילת דרכו** ביסס לאונרדו את ידיעותיו על הלב מִקְריאה בעיקר של האנטוֹמיסט מונדינו (1270-1326), אולם סקרנותו הובילה אותו לחקור ולחזור ולחקור את הלב בתקופות שונות של חייו במילאנו (1489), פירנצה (1510 - 1508) ורומא (1513). מחקרים אלה התבסס על ניתוח, התבוננות ורישום של מבנה הלב בבעלי חיים ובבני אדם ועל בניית מודלים מכניים לחֵקֶר סוגיות מסוימות, ונשענו על ידיעותיו הנרחבות במכניקה ובזרימה. הבנתו של לאונרדו בתחום זה אפשרה לו ליצור אנלוגיות בין זרימת מים בערוצים ותעלות לזרימת הדם בגופנו.

**הישגיו הבולטים** של לאונרדו בתחום האנטומיה ותפקוד הלב היו ההבנה שהלב הוא שריר הכולל ארבעה מדורים, ושהוא יכול להתכווץ באופן עצמאי ובצורה מחזורית. כמו כן רישומיו המדויקים של הלב ומערכת הדם הם התיעוד הראשון הַמֻּכָּר של העורקים הכְּלִיליים. הישגו האנטומי הגדול ביותר של לאונרדו היה זיהוי האופן שבו מְתַפְקֵד מַסְתֵּם אבי העורקים. למרות הישגיו הרבים של לאונרדו במחקריו על הלב, הוא לא הצליח להשתחרר מהפָּרָדִיגְמוֹת העתיקות: ההנחה שהלב וזרימת הדם אחראים לחוֹם הגוף, וההנחה שהלב מזרים דם רק לכיוון אחד. את מחזור הדם גילה ויליאם הארווי (1657 – 1578) קצת יותר ממאה שנים אחרי מותו של לאונרדו.

לב ומערכת סימפונות של שור

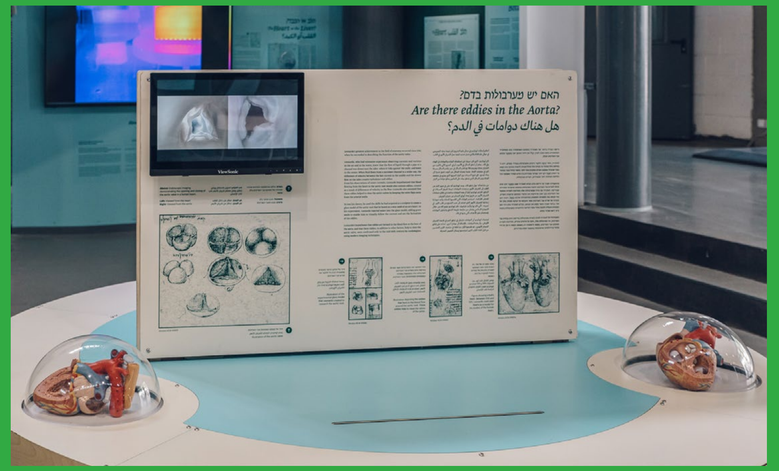


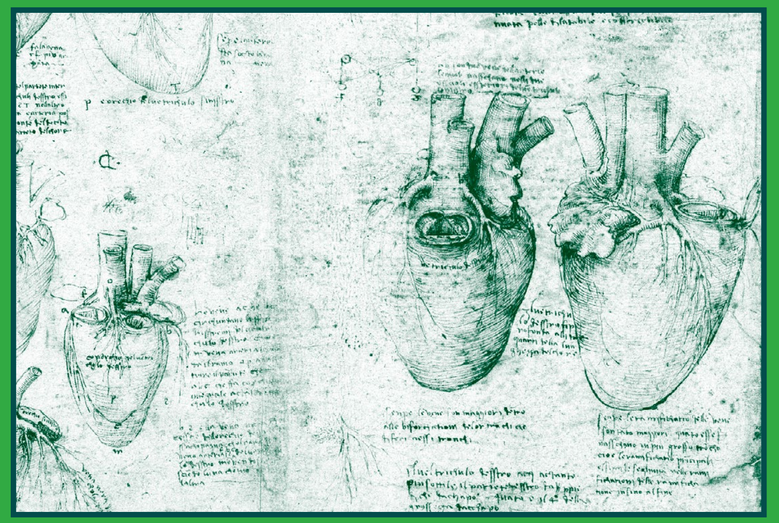
Windsor RCIN 919071r

# האם יש מערבולות בדם?

הישׂגו הגדול ביותר של לאונרדו בתחום האנטוֹמיה נבע ממחקריו האנטומיים בשנת 1510 לערך, וכָלל את זיהוי האופן שבו מְתַפְקֵד מסתם אבי העורקים שבלב.

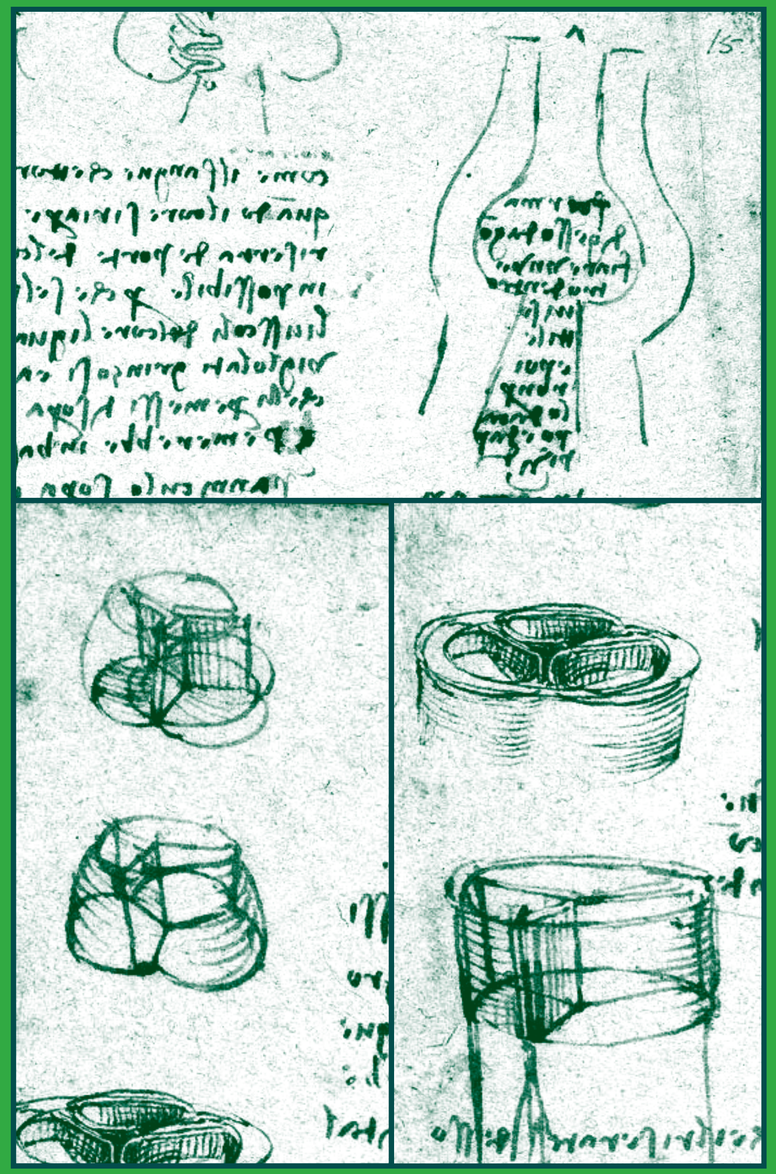
לאונרדו, אשר הִרְבָּה לחקור זרמים ומערבולות באוויר ובמים, ידע כי בזרימת נוזל בצינור או בערוץ נחל הנוזל שקרוב לדפנות מתחכך בהן ומֵאֵט בעוד שהנוזל באמצע הערוץ מתקדם מהר יותר. כאשר הנוזל עובר מצינור צר יחסית למְכָל רחב יותר הפרשׁי המהירות בין הזרם המהיר האמצעי ובין הזרימה האיטית יותר שבצדדים, יוצרים מערבולות.



Windsor RCIN 919073v

באיור מוצג לב של שור. בין השנים 1510-1515 השתמש לאונרדו בלבבות של שורים כמודל למחקריו על הלב האנושי.



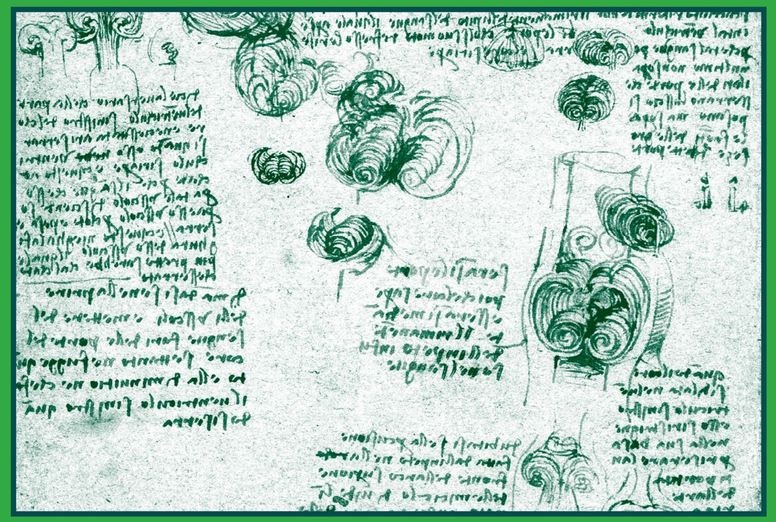
Windsor RCIN 919082

איור של מתקן הניסוי מזכוכית של לאונרדו. הוא הכין אותו כדי לחקור את שורש אבי העורקים.

מהתצפיות שערך על זרימת מים הקיש לאונרדו שגם במַעֲבָר זרם הדם מהלב לשורש אבי העורקים ייווצרו מערבולות כתוצאה מהפרשי המהירות שבזרימה. לאונרדו אף הניח שמערבולות אלה מסייעות לסגירת מסתמי אבי העורקים בכך שהן מרחיקות את עלעלי המסתם מדפנות העורק.

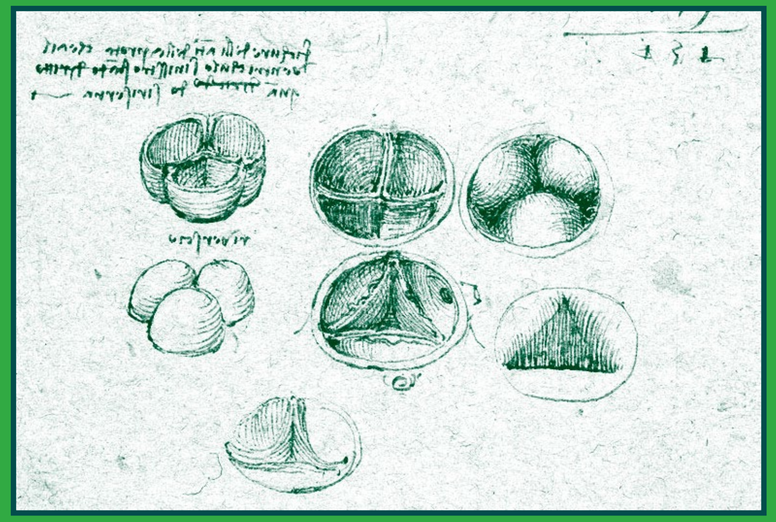
כדי לבחון את השערתו השתמש במיומנויות שרכש כְּפַסָּל, והכין דגם זכוכית של שורש אבי העורקים אשר התבסס על יציקת שעווה מלב של שור. בניסוי שערך ואשר אִשֵּׁש את הנחתו, הִזְרִים לאונרדו מים דרך דגם הזכוכית והצליח לעקוב אחרי אופי הזרימה והיווצרות המערבולות בזכות זרעי דשא שפיזר במים.

השערותיו של לאונרדו לפיהן נוצרות מערבולות בזרימת הדם בבסיס אבי העורקים, וכי מערבולות אלה, נוסף על גורמים אחרים, מסייעות לסגירת שסתום אבי העורקים, אֻשְׁשׁוּ לראשונה רק באמצע המאה ה-20 על-ידי צוותי קרדיולוגים שהשתמשו באמצעי דִּמּוּת מודרניים.



Windsor RCIN 919083

איור המתאר את המערבולות אשר נוצרות בזרימת הדם בשורש אבי העורקים. מערבולות אלה משמשות בסגירת הַמִּסְתָּמִים (שסתומים) באבי העורקים.



Windsor RCIN 919079

איור של מַסְתָּם (שסתום) אבי העורקים

## הלב האנושי

דגם בהדפסת תלת מימד של לב אנושי, אבי עורקים והסתעפויות ממנו. דגמים מסוג זה, המתבססים על מידות אנטומיות של מטופלים אנונימיים, משמשים ללימוד ומחקר בתחום מדעי הרפואה. לצורך מחקריו על מבנה ותפקוד הלב יצר לאונרדו דגמי זכוכית שקופים שבהם עקב אחר זרימת נוזלים בחללי הלב וכלי הדם.

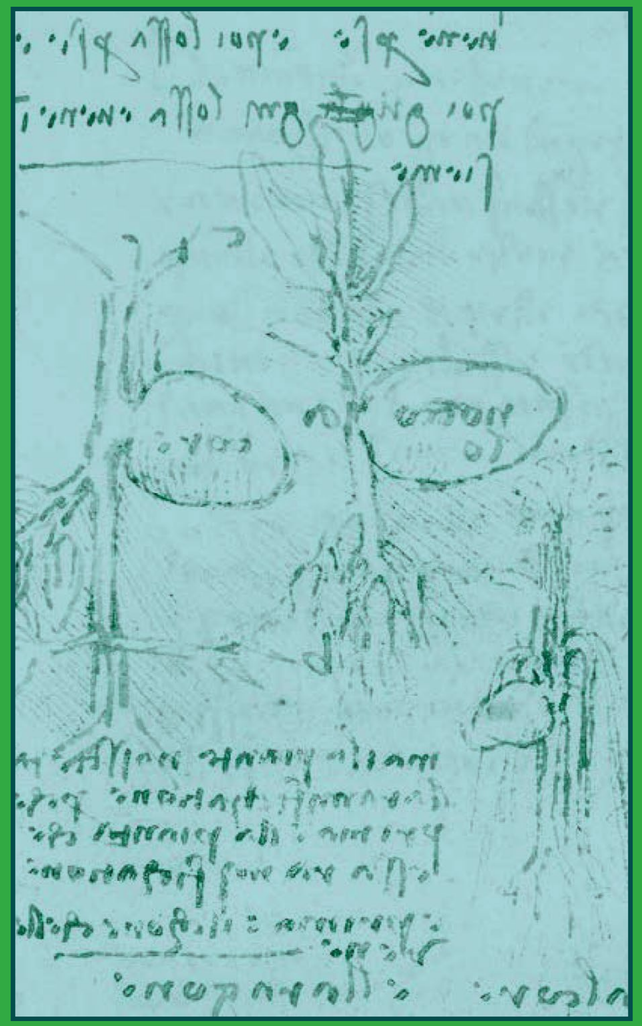
# הלב או הכבד?

דוגמה לשימוש מעניין של לאונרדו באנלוֹגיוֹת נמצאת בתשובה שהציע לשאלה שהעסיקה אנשי רפואה בני זמנו: מהו האיבר "המרכזי" של מערכת הדם הוורידית – הכבד או הלב?

בתקופת הרנסנס האמינו רבים שהכבד הוא האיבר המרכזי של מערכת הדם הוורידית, וכי הוא מזין את הוורידים הצרים הרבים בקרבתו כפי שהאדמה מזינה את השורשים הרבים הצרים המסתעפים מעליה. אולם לאונרדו טען שזו אינה הַקְבָּלָה נכונה כיוון שמקור השורשים אינו באדמה אלא בזרע שממנו הם צומחים!

האיור (מסביבות 1508) שבו לאונרדו משווה בין צורת הלב והסתעפויות הוורידים (משמאל) ובין זרע אפרסק עם הסתעפויות גבעול ושורשים (מימין) לאונרדו הציע אנלוגיה מְשֻׁל עצמו ואף צייר אותה – כפי שהגזע והשורשים הם עבים יותר סמוך לזרע שממנו הם צומחים, העובדה שהוורידים היוצאים מהלב הם העבים ביותר מעידה כי הלב הוא האיבר המרכזי במערכת הוורידית.

היום, כמובן, לא מקובל לחשוב על איבר מסוים כמקור או כבסיס של הוורידים אלא מקובלת ההשקפה אשר לפיה מערכת הדם בנויה ממרכיבים שונים שכֹּל אחד מהם חשוב וחיוני לתפקודה של המערכת.



האיור (מסביבות 1508)

Windsor RCIN 919071

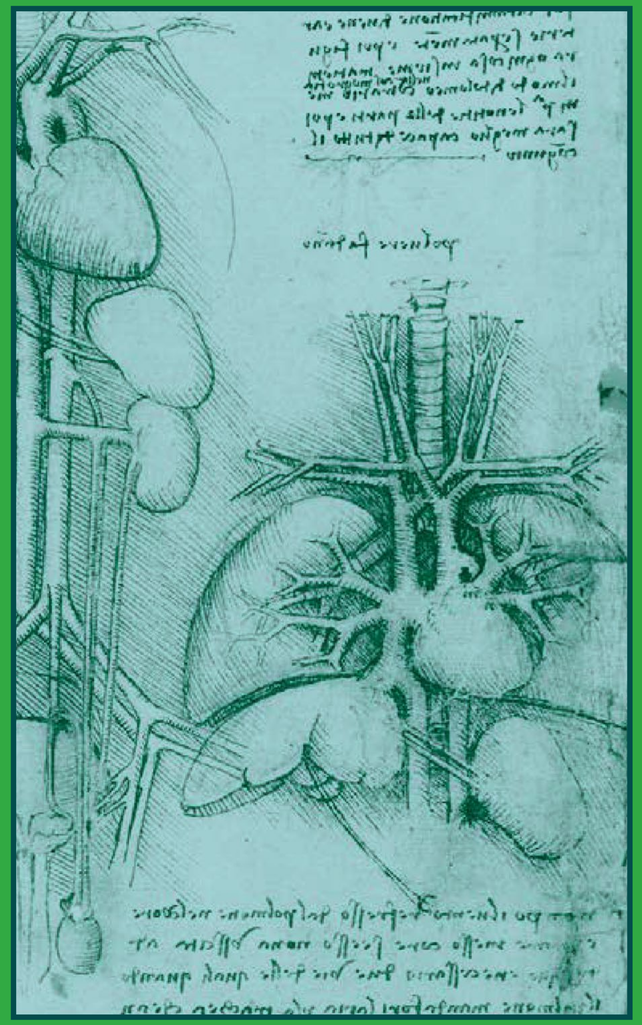
## איך "להתבונן" בחום?

מתבוננים על הדמות שעל המסך ומבחינים בצבעים השונים של איברי הגוף. חלקם בגוף אדומים וחלקים כחולים. משפשפים את הידיים זו בזו ומציגים את כפות הידיים למצלמה: האם צבען השתנה? פותחים את הפה – מה הצבע של הלשון?

המצלמה המחוברת למסך נקראת מצלמת חום (מצלמה תֶּרְמִית).היא קולטת קרינה אלקטרומגנטית שהעין אינה מסוגלת לראות (אור תת-אדום באורכי גל של 8-12 מיליוניות המטר), אך נפלטת ומוחזרת מכל חֵפֶץ. קרינה זו מְכֻנָּה קרינת חום, ועוצמתה גְּדֵלָה ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר. המצלמה מתרגמת את הטמפרטורה לצבעים שאנו רואים: אדום – חם; כחול – קר.

בתקופתו של לאונרדו לא ידעו שחום הגוף נוצר מתהליכים ביוכימיים, וחיפשו הסברים אפשריים לטמפרטורת הגוף.

בתחילת דרכו לאונרדו אימץ אנלוגיה מקובלת באותה תקופה של הלב כְּכִבְשָׁן וכמקור חום של הגוף. מאוחר יותר זנח הסבר זה, וּשְׁעֵר כי חום הגוף נוצר כתוצאה מחיכוך הדם בדפנות העורקים והווריד.



Windsor RCIN 919104

# מערבולות

הצורה הלולייניות הקסימה את ליאונרדו. הוא צפה בצורות ובתנועות לולייניות במגוון של מצבים טבעיים ותיעד אותן: תבניות גדילה של צמחים וצדפות, תלתלי שיער, תנוחות ותנועות אנושיות, מעוף ציפורים וגם רכיבים מכניים. בצורה הלולייניות זיהה ליאונרדו מצב שבו תהליכים טבעיים, שנצמדו לעקרונות מתמטיים, הביאו לידי תבניות גיאומטריות מוּפָרות.

מערבולות, התנועות הלולייניות של אוויר ומים (וגם דם) היו מקור משיכה מיוחד לליאונרדו. ליאונרדו צפה במערבולות בטבע במגוון מצבים וחקר אותן: מערבולות במים, רוחות מערבולת, מערבולות דם ועוד. יש מי שסבורים כי עבור ליאונרדו העובדה שבמערבולות מתקיימות בו - זמנית תנועה ויציבות, מייצגת תכונה מהותית של צורות החיים.

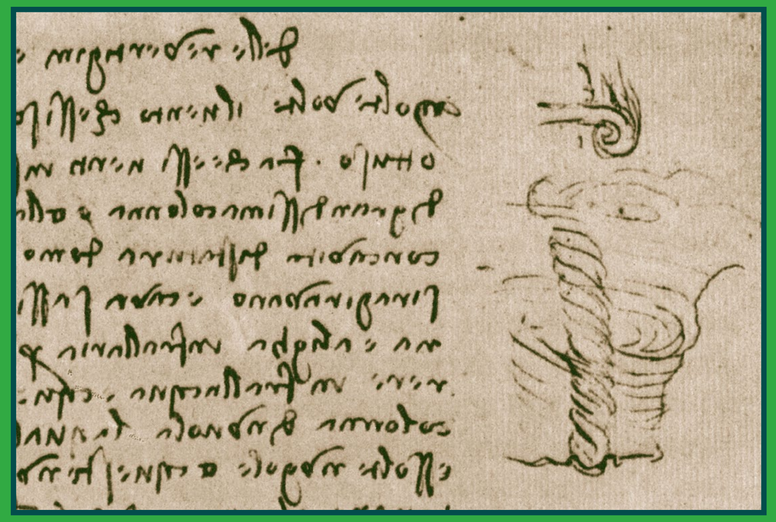
# למה מסתובבים המים?

מה קורה למים במערבולת כאשר לוחצים ברציפות על הלחצן, ומה קורה כאשר עוזבים את הלחצן? מהיכן נכנסים המים לצינור? מהיכן הם יוצאים? ומדוע בכלל נוצרת המערבולת?

המים מוזרמים מצינורות שבשולי תחתית המיכל, עולים למעלה צמודים לדופן ויוצאים החוצה דרך הפתח העגול שבמרכזו. המערבולת נוצרת באופן טבעי משום שזהו מסלול זרימה המאפשר ירידה ועליה בו זמניים דרך צינורות ופתחים. גודל וצורת המערבולת תלויים בגובה המים ונקבע לפי קצב הזרמת לצינור.

לחיצה על הלחצן מפסיקה את הזרמת המים, גובהם יורד ובהתאם משתנה צורת המערבולת. ניתן למצוא מערבולות כמעט בכל מקום בו קיימת זרימה של נוזל או גז. בכיור האמבטיה, בריקון בקבוקים, בים ובנהרות ונחלים ואף בכלי הדם בגופנו.

לאונרדו, שהיה מוקסם מצורת המערבולת וממגוון המקומות שהיא נמצאת בטבע, הרבה לחקור ולצייר אותה, הן מההיבט הפיסיקאלי של זרימת הנוזל והן מההיבטים המתמטיים והאסטטיים של צורתה.



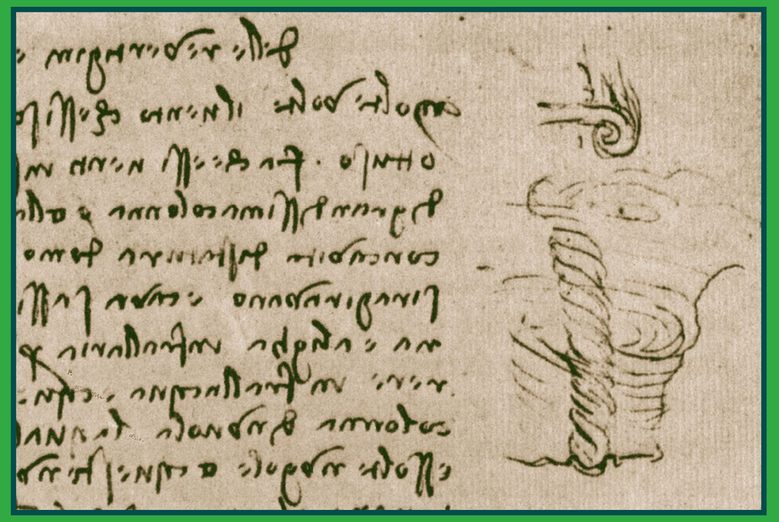
Leicester 30v

## למה עולה הערפל?

מתבוננים באדי המים העולים למעלה. באיזה צורה הם עולים ומדוע?

האדים הם ערפל (רֶסֶס טיפות זעירות שגודלן כמיליונית הַמֶּטֶר) אשר נוצר על-ידי הרעדת מים בקצב של מאות אלפי תנודות בשנייה. זרמי אוויר עדינים היוצאים מצינורות הנירוסטה שבהיקף, בשילוב שאיבת המפוח שבתקרת המוצג, גורמים לערפל לעלות כלפי מעלה.

צורת המערבולת נוצרת הן בְּשֶׁל כיוון זרמי האוויר הן מאחר שזו הצורה שבה הערפל יכול לנוע במהירות רבה באזור צר יחסית. מערבולות וסופות טוֹרְנָדוֹ בטבע נוצרות אף הן מִסִּבָּה זו: זרימה מהירה מאוד של מים או אוויר המתרכזת באזור קטן יחסית.



Leicester 30v

# תעופה

"כדי לתת את ההסבר המדעי האמיתי לתעופת הציפורים באוויר עליך לתת תחילה את מדע הרוחות, שאותו נוכיח באמצעות תנועת המים; והֲבָנת המדע הזה, שאותו ניתן לחקור באמצעות החושים, תשמש לנו סולם כדי להגיע לתפישֹת הדברים שעפים באוויר וברוח".
(לאונרדו דה וינצ'י, פאריס, E, 54R)
PARIS E, 54

הזיכרון הראשון של לאונרדו מילדותו היה של מקרה מוזר, ככל הנראה חלום, שבו נחתה ציפור על עריסתו, פתחה את פיו וטָפְחָה על לשונו בעזרת זְנָבָה. לאונרדו ראה במקרה אות למקום המיוחד שחֵקר התעופה עתיד לתפוס בחייו.

היכרותו הראשונית של לאונרדו עם "מכונות מעופפות" הייתה במופעים התיאטרליים שהיה עֵד להם בפירנצה – שָם יצרו אומנים תפאורות מתוחכמות שדימו מכונות מעופפות דמיוניות. האפשרות של בניית מכונות אמיתיות שיאפשרו לאדם להמריא לשמיים הציתה את סקרנותו ודמיונו של לאונרדו, והייתה לעיסוק מרכזי שלו לאורך כשני עשורים. כפי שנהג לאונרדו לעשות בכל תחום שבו התעניין, גם את נושא התעופה הוא חָקַר מכמה היבטים.

כבר בשנות העשרים לחייו התעניין לאונרדו בתכונות הפיזיקליות של האוויר והמים, מה שהקנה לו בסיס מתאים לחֵקר התעופה. הוא הבין שאוויר הוא חומר שאפשר לדחוס אותו ודחיסתו יכולה לייצר את הלחץ הדרוש כדי ליצור ריחוף. בשנותיו הראשונות במילאנו, אליה עבר ב-1483, החל לאונרדו להתמקד בהתבוננות באנטומיה ובדינמיקה של גוף האדם. שילוב הידַע שצָבַר בתצפיות אלה, יחד עם הבנתו במכניקה, סייעו ללאונרדו לתכנן מכונות שבהן, כך קיווה, ניצול נכון של הגוף האנושי יאפשר דחיסה מספיקה של האוויר והַמְרָאָה.

לאורך כל חייו של לאונרדו עולם הטבע היה מקור השראה עיקרי עבורו. עם שובו לפירנצה בשנת 1500 הוא החל להקדיש זמן רב להתבוננות בבעלי חיים מעופפים, בעיקר ציפורים ועטלפים, וערך רישומים מפורטים של הכנפיים שלהם. בדרך זו הוא ניסה להבין כיצד הטבע יצר "מכונות מעופפות". באותה תקופה חיבר את הקודקס על תעופת הציפורים (1505 לערך) שבו התרכז בחֵקר צורת הכנפיים של הציפורים ותנועתן באוויר, ובאפשרות לחקות את הציפורים במכונה מעשה ידי אדם. אולם בסופה של תקופה זו נראה שלאונרדו הבין כי המשקל של אדם והכוח שהוא מסוגל לייצר אינם מאפשרים התרוממות מהקרקע באמצעות תנועת כנפיים.

לכן, בשנים שלאחר מכן החל לאונרדו להקדיש זמן רב יותר לתכנון דאונִים על חשבון מכונות מעופפות. ככל הידוע לנו אף דאון או מכונה מעופפת של לאונרדו לא המריאו לאוויר במהלך חייו, אולם מאות התרשימים והעמודים שהקדיש לנושא הם עדות לסקרנותו ולדמיון שלו שנסקו אל על.

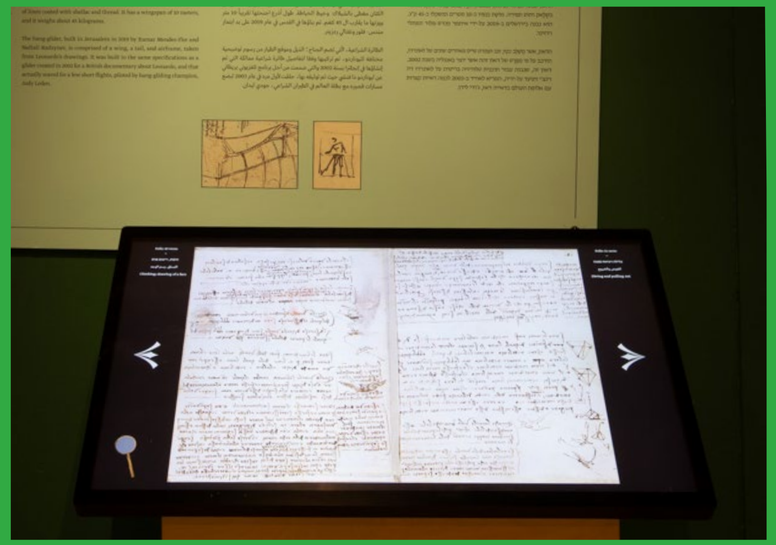
## איך ציפורים עפות?

לערוץ היוטיוב **לחצו כאן**

## קודקס על תעופת ציפורים

לאונרדו דה וינצ'י חיבר את מה שידוע היום כקודקס על תעופת ציפורים בין השנים 1505 ל1506. מידותיו של הקודקס 21.3 על 15.4 ס"מ והוא מורכב מ - 18 גיליונות נייר וכריכה. תחילתו עוסקת במכניקה, ורובו במסקנותיו של לאונרדו מתצפיות מפורטות וחדות עין על תעופת ציפורים, ומתרשימים של מכונה מעופפת שתכנן. כמו כן פזורים בקודקס רישומים "אקראיים" ספורים בנושאים שונים. גיליונות הקודקס פוזרו במהלך השנים ועברו ידיים רבות עד שנאגדו יחד בתצורתם הנוכחית בספרייה המלכותית בטורינו שבאיטליה בשנת 1903.

לאתר עם הקודקס **לחצו כאן**

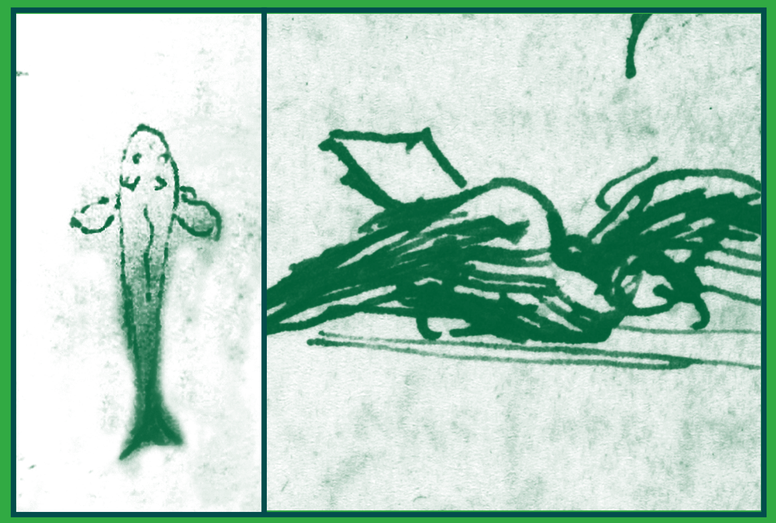


## מה בין דג לציפור?

באקווריום יש נוזל פוֹטוֹכְּרוֹמִי אשר משנה את צבעו בהשפעת האור הסגול המאיר עליו. "צביעה" זו מאפשרת לראות את מסלול תנועתו (קווי הזרימה). לאחר כמה שניות ה"צבע" נעלם, הנוזל נהיה שקוף ו"נצבע" מחדש כאשר הוא מגיע לאזור המואר.

גם דגים וגם ציפורים נעים בסביבה שהמדענים מכנים "זוֹרֶם" – אומנם מדובר במצבי צבירה שונים: מים שהם נוזל ואוויר שהוא גז, אך שניהם זורמים בצורה רצופה סביב חפצים הנמצאים בדרכם.

חפצים שצורתם מתאימה לזורם שבו הם נעים (צורה אווירודינמית באוויר והידרודינמית במים) נעים בקלות רבה, ולעתים אף נוצר כוח המושך אותם כלפי מעלה (כוח עילוי).

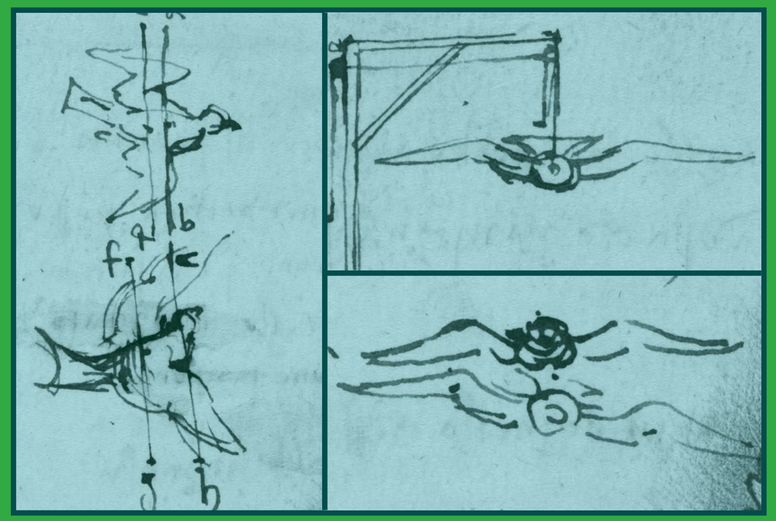


Paris G 50v Codex on Flight 15r

# איך לחקור ציפורים?

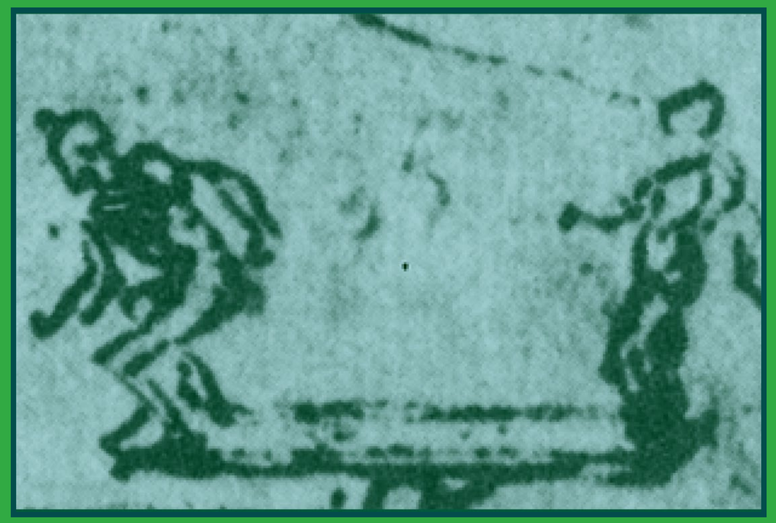
במוצג תלויים שלושה דגמים מכניים של דַּיּוֹת אדומות (MILVUS MILVUS) בגודל טבעי, בשלושת מַנְחֵי תעופה אופייניים: דאייה, גלישה וצלילה. ניתן לשים לב לשוני בפריסת הכנפיים והזנב בהתאם לשלב השונה של מְעוֹפָן.

כדי לענות לשאלותיו בנוגע לטבע לא הסתפק לאונרדו בתצפיות "שדה" אלא גם בנה מודלים מכניים כדי שיוכל לחקור תופעות מורכבות בתנאי מעבדה. במחקריו המתועדים ב"קודקס על תעופת ציפורים" (1505-1506) התמקד לאונרדו בַּדַּיָּה האדומה כמודל שאותה חקר, ואף בנה דגמי עץ של הדיה כדי ללמוד מקרוב על תצורות התעופה השונות שלה.



Codex on flight 15v

אדם מתכונן לקפוץ



Leicester 8r

## האם תצליחו לעוף?

עומדים על משטח השקילה ומתבוננים במסך – הקו האופקי מראה כיצד משתנה המשקל עם הזמן. האם המשקל גדל או קטן כאשר מרימים או מורידים את הידיים? כיצד הוא משתנה כאשר אתם מרימים או מורידים חפצים כבדים? וכאשר אתם מנפנפים בכנפיים גדולות?

בזמן הרמת הידיים (או חפץ כבד) משקלכם גדל משום שעליכם להפעיל כוח כלפי הרצפה (עקרון הפעולה והתגובה), אך כאשר הידיים (או החפץ) מגיעות לשיא הגובה – הן מושכות מעט את גופכם כלפי מעלה ומשקלכם קטן. בממוצע הוא לא ישתנה כלל. נפנוף כנף שונה במקצת: שינוי המשקל נגרם כתוצאה מדחיפת האוויר ובגלל צורתה הקמורה, היא דוחפת יותר אוויר בתנועתה כלפי מטה מאשר בתנועה למעלה. אך, כדי להתרומם באוויר רק בעזרת כנפיים, הן צריכות גדולות מאד ביחס לגודל הגוף ותנועתן כה מהירה עד שרק בעלי חיים קלים (ובפרט חרקים) מסוגלים לעשות זאת והדבר דורש מהם מאמץ רב.

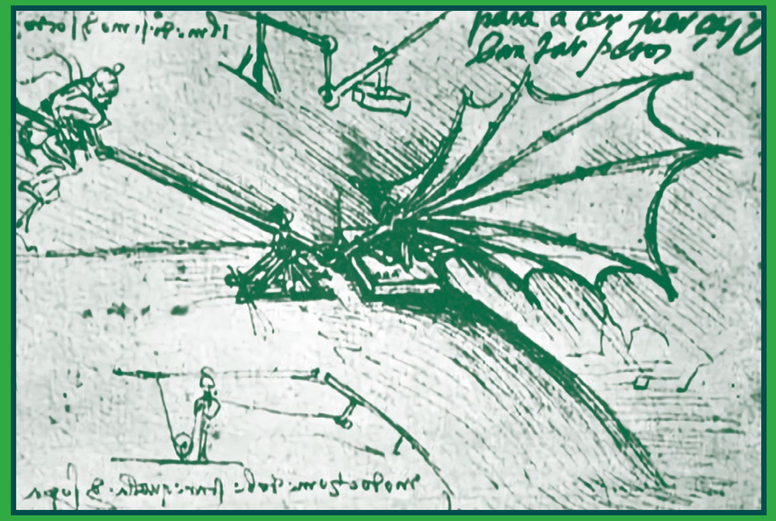
תרומתן העיקרית של הכנפיים לתעופה היא בכוח העילוי שהן יוצרות כאשר האוויר זורם מעליהן. לא במקרה דאונים ומטוסים אינם מנפנפים כלל בכנפיהם.

# איזה גודל כנף?

מורידים במהירות את זרוע העץ!

האם הבסיס הכחול המחובר לכנף התרומם?

במסגרת ניסיונותיו של לאונרדו לִבְנוֹת מכונות מעופפות הוא ערך ניסויים שונים. באחד הניסויים, הציע לִבְנוֹת כנף ענקית ברוחב של 12 מטרים מנייר וְקָנֶה ולְחַבֵּר לה משקולת במשקל אדם. אם יצליח נסיין להוריד את הכנף מהר מספיק כך שתדחוס מספיק אוויר כדי להעלות משקולת במשקל אדם, משמע אפשר אולי שאדם יוכל להתרומם לאוויר על-ידי שילוב של כוח שריריו, מנגנון מכני (דוגמת זרוע המנוף במקרה זה), וכנפיים מלאכותיות. איננו יודעים אם לאונרדו אכן ערך את הניסוי המתואר, אך חוקרים סבורים שבמהלך מחקריו למד להבין כי שרירינו אינם מסוגלים לייצר מספיק כוח כדי להרים את משקלנו לאוויר.

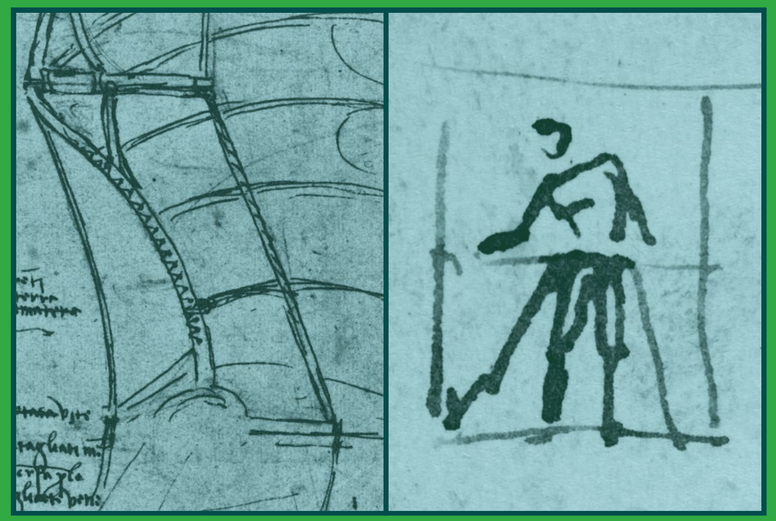


Paris B 88v

# איך לבנות דָאוֹן?

הדאון התלוי בחלל התצוגה מורכב מעץ צפצפה; חִזְרָן (בִּמבּוק); בד פִּשְׁתָּן מצופה בשֶׁלָאק וחוט תפירה. מוֹטַת כנפיו כ - 10 מטרים ומשקלו כ - 45 ק"ג. הוא נבנה בירושלים ב - 2019 על-ידי איתמר מנדס-פלור ונפתלי רדזינר.

הדאון, אשר מְשַׁלֵּב כנף; זנב ועמדת טייס מאיורים שונים של לאונרדו, הורכב על פי מִפְרָט של דאון זהה אשר יוצר באנגליה בשנת 2002. דאון זה, שנבנה עבור תוכנית טלוויזיה בריטית על לאונרדו דה וינצ'י ותועד על-ידיה, המריא לאוויר ב -2003 לכמה דאיות קצרות עם אלופת העולם בדאייה דאז, ג'ודי לידן.



MS B 74r

flight of birds 5r

# יסודות המכונה

נסיבות חייו של לאונרדו דה וינצ'י (1452-1519) וסקרנותו הן שעיצבו את מחקריו בתחומי ההנדסה והמכניקה, כפי שהם משתקפים בדפי מחברותיו. יכולותיו של לאונרדו כמהנדס סיפקו לו מקור הכנסה חשוב ביותר. עם זה, משנות ה-40 לחייו, סקרנותו של לאונרדו בנוגע לעקרונות היסוד המדעיים בתחום המכניקה הובילה אותו להתמקד במחקרים תיאורטיים, ולהמעיט בפרויקטים הנדסיים מעשיים. מאמציהם של החוקרים על אודות לאונרדו אפשרו לִבְנות כרונולוגיה של התפתחותו כמהנדס וכמדען.

לאונרדו הצעיר שהגיע לפירנצה ב-1464 נחשף להישגיהם של מהנדסי הרנסנס המובילים, ובראשם פיליפה ברונלסקי (1337-1446) בעת שעבד בבית המלאכה של אנדריאה דל ורוקיו (1435-1488). לפיכך הרישומים המעטים ששרדו מתקופה זו בחייו כוללים בעיקר תיעוד של מכונות קיימות בתחומי ההנדסה האזרחית והתעשייה, וכמה סקיצות של רעיונות מקוריים שלו עצמו. מַעֲבָרו של לאונרדו למילאנו ב-1482 ומינויו למהנדסו של דוכס מילאנו, לודביקו ספורצה (1452-1508), גרמו ללאונרדו לעסוק רבות בפרויקטים מעשיים, יותר או פחות, בתחומי ההנדסה הצבאית, הארכיטקטורה והתעשייה. בד בבד, בשנים אלה מצא לאונרדו גם זמן להעמיק ולפתח את "חלומותיו הטכנולוגיים" – פרויקטים חסרי היתכנות ממשית שקרמו עור וגידים הודות לדמיונו וליכולת הרישום שלו שהלכה והשתכללה. ניסיונותיו לִבְנות מכונה מעופפת שייכים לתקופה זו.

בעשור האחרון של המאה ה-15 הֵחֵל לאונרדו להתמקד במחקרים פיזיקליים בתחום המכניקה. מחקרים אלה, שהתמקדו בתחילה בזרימת מים, נועדו לספֵק תשתית תיאורטית לעבודתו ההנדסית בתחום ההידראוליקה עבור הדוכסות המילאנזית. אולם כפי שקרה לא מעט פעמים, סקרנותו של לאונרדו הובילה את מחקריו מהתחום היישומי אל עֵבר התיאורטי. בתקופה זו חיבר לאונרדו את מה שמְכֻנֶה כיום קודקס מדריד.

בחיבור זה שאף לְגַשֵר בין הטכנולוגיה היישומית והניסיונית ששימשה את בתי המלאכה של הרנסנס ובין המכניקה התיאורטית כפי שבאה לידי ביטוי בעבודתם של מלומדי העת העתיקה וימי הביניים. מהלך חדשני זה נשען על יכולת הרישום יוצאת הדופן של לאונרדו, שנחשב בעיני רבים לממציא האיור המדעי המודרני. ה"אנטומיה" הגלויה והנסתרת של מכונות שונות מוצגת על-ידי שימוש בנקודות מבט שונות, רצף פעולות וסְכֹמות גיאומטריות. בד בבד, הקודקס מציג רישום של סדרות של מנגנונים ורכיבים מכניים בסיסיים ("יסודות המכונה" - Elementi Macchinali) ובוחן את תכונותיהם הפיזיות וההנדסיות: עמידתם בפני כוחות, ובפרט בפני כוח המשיכה; יכולתם להגביר כוח (יתרון מכני – עקרון המנוף); שינוי קצב וכיוון תנועה; הפיכת תנועה סיבובית לקווית; הפיכת תנועה מחזורית לתנועה בכיוון אחד; הקטנת חיכוך ועוד. "יסודות" אלה היו ועודם אבני הבניין לתכנון אינספור מכונות מסוגים שונים.

שיטת המחקר שלאונרדו פיתח בקודקס מדריד - "פירוק" מנגנון מורכב לגורמים, התבוננות מדוקדקת ותיעוד ויזואלי מפורט - שימשה כמודל למחקרים אחרים שערך. ה"אנטומיה של המכונה", אשר מוצגת בקודקס זה, היוותה השראה ללאונרדו במחקריו האדריכליים, במיוחד במחקריו על אנטומיית האדם, שאת גופו ניתח לאונרדו כמערכת של מנגנונים מכניים מורכבים. שני העשורים האחרונים בחייו של לאונרדו התאפיינו במַעֲבָר תכוף יחסית בין ערים ופטרונים שונים כתוצאה מחוסר היציבות הפוליטית של אותה תקופה ושאיפתו של לאונרדו להקדיש זמן רב יותר למחקריו התיאורטיים. לאונרדו המשיך לתעד מכונות ומבנים חדשים שהכיר במהלך מסעותיו אולם התוכניות ההנדסיות שהגה באותה תקופה נוצרו רק כהיענות לבקשתם של פטרוניו השונים. בשנים אלה העמיק לאונרדו בלימוד הגיאומטריה שסיפקה לו תשתית מתמטית וויזואלית למחקריו התיאורטיים.

**אזור "יסודות המכונה"** בתערוכה מציג נושאים נבחרים מהמכניקה של לאונרדו. הוא כולל, רכיבים מכניים בסיסיים; מנגנונים פשוטים ; אזור מכונות הרמה מסורתיות ואזור העוסק בחיכוך - נושא מדעי שלאונרדו חָקַר רבות והגיע בו לתגליות שהקדימו את זמנו.

## ספר יסודות המכונה

"נדון כאן בטבעם של הבורג והמנוף המניע אותו, וכיצד הוא (הבורג) משמש להרמה ולא להפעלת דחף; כיצד כוחו גדול יותר כאשר הוא פשוט ולא כפול, וכאשר הוא דק ולא עבה, זאת אם מניע אותו מנוף שווה באורכו ובכוחו. נדון בקצרה בדרכים הרבות שאפשר להשתמש בברגים, בסוגים השונים של בורג אינסופי (ז"א בורג חילזון), כיצד משלבים את הבורג האינסופי בגלגלי שיניים ונבחן את טבע האומים שלהם. נדבר גם על תבריגים הפוכים ועל ברגים שבתנועה יחידה דוחפים או מושכים משקולת, ועל ברגים שאם נסובב אותם פעם אחת בלבד יסובבו את האומים יותר מפעם אחת. גם נדון בשיטת הבנייה שלהם, כיצד מפעילים אותם. כל המכשירים האלה יוצגו בדרך כלל ללא עוגנים או מבנים אחרים שעלולים להפריע לחוקר אותם להתבונן בהם. נעסוק גם בהבדלים שבין מנוף הפועל בכוח קבוע, זאת אומרת הגלגל, והמנוף הפועל בכוח שאינו שווה, זאת אומרת מוט ישר, ומדוע הראשון עדיף על האחרון אך האחרון קומפקטי ונוח יותר מהראשון. נדון גם בגלגל קרקש (רָצֶ'ט, מחגר משונן) ובשן התפס שלו, בגלגל התנופה ובתנופת תנועתו, בצירים ובשחיקתם. חבלים וגלגלות, כננות ומכבשים יתוארו גם הם."
(לאונרדו דה וינצ'י, Madrid 82r)

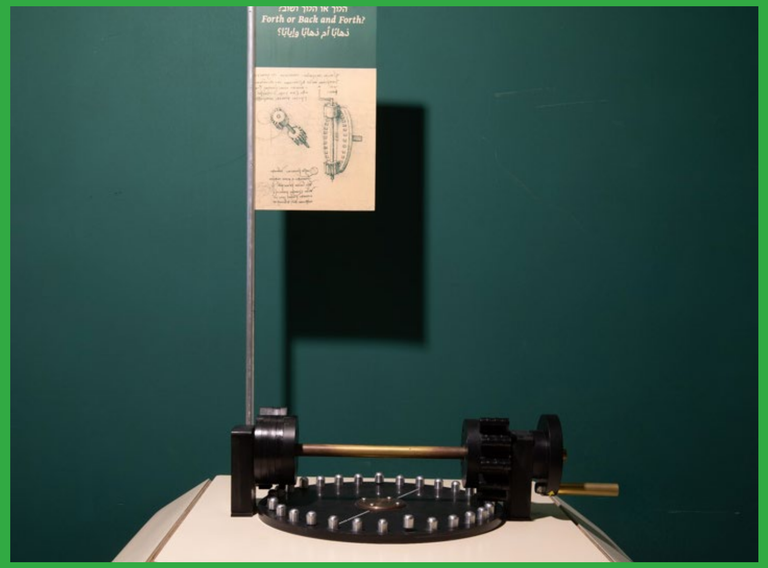
לסרטון הנפשות של מכונות שונות **לחצו כאן**

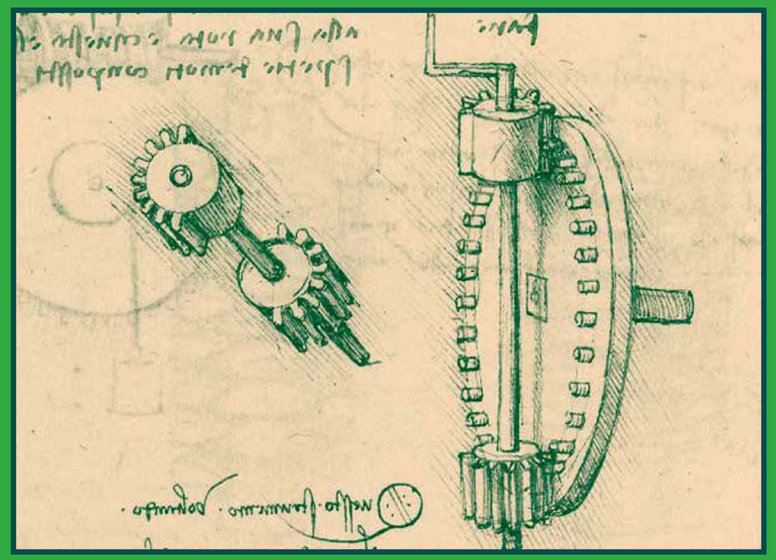
# הלוך או הלוך וחזור?

מסובבים את הידית. לאיזה כיוון מסתובבת הַצַלחַת? מדוע היא משנהָ כיוון? מה השימוש לִמתְקָן כזה?

סיבוב המוט מועבר לצלחת בעזרת גלגלי פינים, שהם גרסה מוקדמת של גלגלי שיניים. בניגוד לתמסוֹרת גלגלי פינים שלמה, שני חצאי הגלגלים מסובבים כל אחד את הצלחת לכיוון אחר, אך רק למשך מחצית סיבוב המוט. מנגנון זה מאפשר להפוך תנועה סיבובית רצופה למשל מגלגל המסתובב מכוח זרם מים, או שַבְשֶבֶת רוח (לתנועה הלוך וחזור הדרושה למכונות תעשייתיות) מכונות אריגה או טוויה למשל. חסרונו של מנגנון זה הוא בגלגלי הפינים עצמם, שהחיכוך שלהם גדול יחסית והם מרעישים ונשחקים.

כיום משתמשים בגלגלי שיניים או תמסורות יעילות אחרות כדי לשנות כיוון סיבוב. כאשר מקור הסיבוב הוא מנוֹע חשמלי אפשר גם לשנות את כיוון תנועתו על-ידי הפיכת כיוון הזרם הזורם דרכּוֹ.



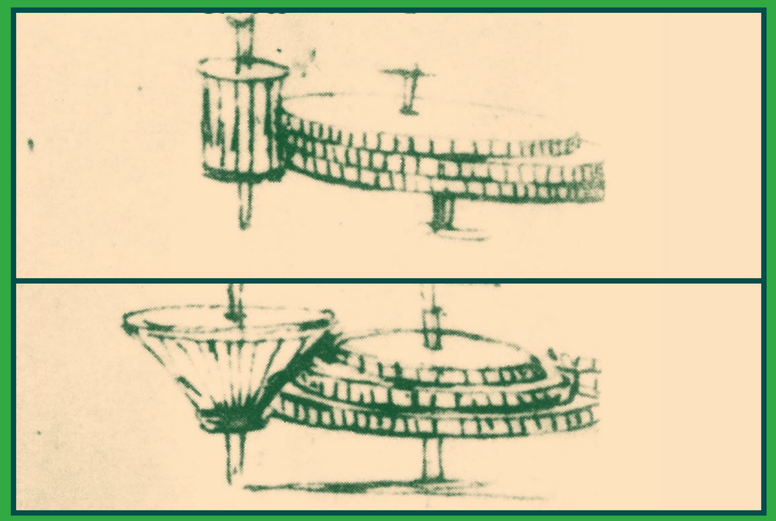



Madrid 14r

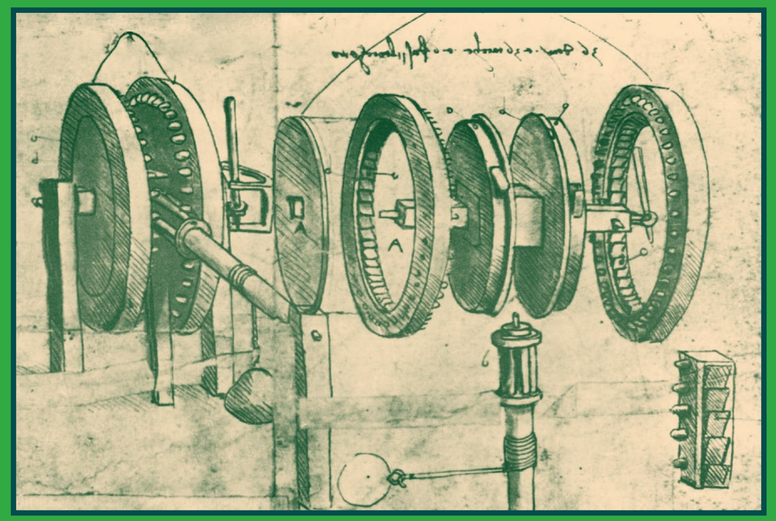
# איך לשנות מהירות?

מסובבים את הידית ורואים כיצד מסתובבים שלושת גלגלי השיניים. כל כמה סיבובים של הגלגל העליון (8 שיניים) נפגש הסימון הלבן עם זה שבגלגל הבינוני (16 שיניים)? כל כמה סיבובים הוא נפגש עם הסימון שבגלגל הגדול (24 שיניים)? כל כמה סיבובים נפגשים כל שלושת הסימנים?

תמסורת גלגלי שיניים, המאפשרת שינוי כיוון וקצב סיבוב, משמשת במכשירים ובמכונות כבר אלפי שנים. הדגם בתערוכה, בו שלושת הגלגלים מונעים על ידי גלגל פינים אחד, ממחיש את הקשר שבין מספר השיניים לקצב הסיבוב.



Atlanticus 27V



Atlanticus 30v

# איך ליצר סיבוב?

בתוך הדיסקיות השחורות נמצא זוג מנגנוני "אל חוזר" (רצ'אט). מנגנונים אלו מאפשרים לידית לסובב כל דסקית רק בכיוון אחד ולחזור באופן חופשי בכיוון השני (תוך השמעת קול נקישה). כאשר מזיזים את הידית הלוך וחזור היא מסובבת דסקית אחת בתנועתה קדימה ואת השנייה בתנועה אחורה, כך שהן נעות בכיוונים מנוגדים, אך מסובבות את גלגל המוטות הנמצא ביניהן בכיוון קבוע. מנגנון האל חזור פותח בעיקר כדי למנוע גלגול חזרה של גלגלת המעלה חפץ כבד (ונפילתו כאשר עוזבים את הידית) אך גם כדי לאפשר הפיכת תנועה הלוך וחזור לתנועה בכיוון אחד. כיום משמשים במנגנונים אלו בכלי עבודה (מפתח בוקסות) במערכות תמסורת (ה"פרילוף" של תמסורת אופניים) ועוד.

# ברגים

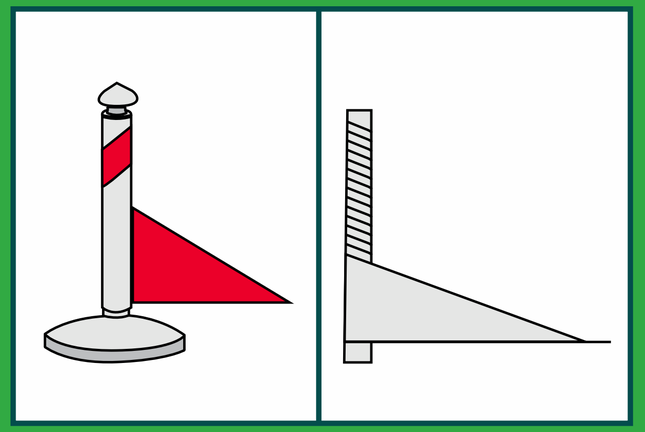
**בורג - הַמַּעֲלֶה הסיבובי.** הבורג, שהומצא כנראה כבר לפני יותר מ-2,500 שנה, הוא אחת מחמש המכוֹנוֹת הפשוטות (מנוף, גלגל, גלגלת, מישור משופע / טריז ובורג) הַמַּקְנוֹת למשתמש בהן יתרון מכני, כלומר יכולת להגביר את כוחו.

זהו למעשה **מישור משופע** אשר "מלופף" על גליל (1). סיבוב הבורג גורם להתקדמות קטנה יחסית, אך יוצר כוח גדול, בדומה לעלייה במישור משופע, בו אנו הולכים הרבה אך עולים מעט. מידת התקדמות הבורג בכל סיבוב, שהיא המרחק בין כריכות הַתַּבְרִיג, מְכֻנָּה **פסיעת הבורג**, וככל שהיא קטנה יותר היתרון המכני גדֵל.

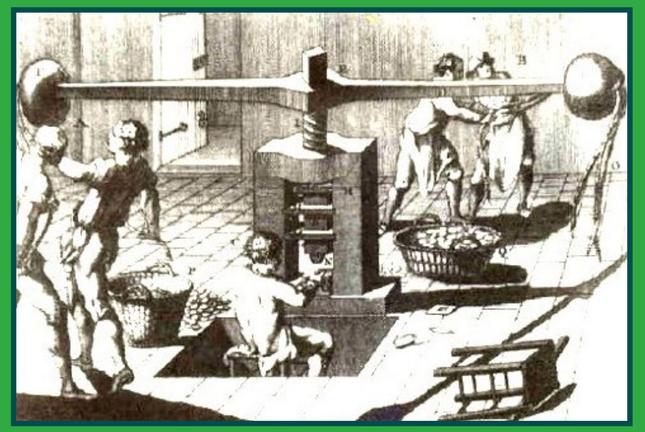
שימוש בזרועות ארוכות לסיבוב הבורג מאפשר להגדיל את היתרון המכני עוד יותר, וליצור כוחות ולחצים עצומים. כפי שנעשה במכבשי זיתים וענבים בשלהי העת העתיקה, במכבשי הדפוס בתקופת הרנסנס ובמכבשים תעשייתיים ומַגְבֵּהַ מכונית (ג'ֶק) בימינו.

דמיון נוסף של הבורג למישור המשופע ולַטְרִיז הוא ה"נעילה העצמית", אשר נובעת מכוח החיכוך ושיפוע התבריג.

1 2



3



7

סיבוב הבורג גורם לתנועה קדימה, אך דחיפה אינה גורמת לסיבובו. הוא נשאר "נעול" במצב שאליו סֻבַּב בניגוד למשל למנוף או לגלגלת הפועלים באופן סימטרי – משיכת צד אחד מעלֶה את הצד השני ולהפך.

נעילה עצמית זו חוסכת את הצורך במעצור או מנגנון אבטחה (בגלגלת, אם נעזוב את החבל המשקל ייפול חזרה למטה), אך חסרונה בכך שהיא מקטינה את נְצִילוּת המכוֹנה פי שניים ויותר. הרמת משקל בעזרת בורג תדרוש מאיתנו עבודה כפולה בהשוואה לשימוש בגלגלת.

מְסיבה זו ברגים פשוטים משמשים כיום בעיקר כאמצעי להידוק ולאבטחה. בתמסוֹרוֹת בורגיוֹת, המשמשות במערכות תנועה (למשל הפיכת תנועה סיבובית לתנועה ישרה), נעשה שימוש בברגים ובאֶומים מיוחדים, בעלי חיכוך נמוך ככל האפשר ואף ממוסבים. אפשר גם להגדיל את פסיעת הבורג כדי שיתקדם יותר בכל סיבוב, ואף לשלֵב כמה כריכות יחד ליצירת **תבריג רב-התחלות**.

הבורג מופיע בעבודתו של לאונרדו במגוון רחב של הֶקְשֵׁרים. כמהנדסים אחרים ברנסנס, מכפלת הכוח של הבורג קסמה ללאונרדו הצעיר, והוא שילב אותו במגוון מנגנוני הרמה ובכלי משחית שונים. לאונרדו, שֶׁאַף תכנן כמה מכונות לייצור ברגים, העמיק בסיווג וניתוח תכונותיו של הבורג ב"קודקס מדריד". האנלוגיה בין הצורה והתנועה הספירלית ורבת-הכוח של התבריג ובין מערבולות המים והאוויר בטבע שאותן חקר לאונרדו, לא חמקה מעיניו וודאי הוסיפה לקסמו.

# הבורג כמדרון

כפי שהאיור המונפש בקישור מדגים, לאונרדו ניתח את **פעולת הבורג כמישור משופע מלופף על גליל**.

בטקסט המלווה את האיור העליון בהנפשה, קובע לאונרדו שהזזת משקולת תאורטית במעלה התבריג שמשמאל, תהיה שקולה להעלאתה במעלה המדרון המשופע שמימין.

בטקסט המלווה את האיור התחתון, שמדגים העלאת משקולות זהות בשני אופנים, משווה לאונרדו בין שיפוע תבריג הבורג שמשאל לשיפוע המדרון המשופע שמימין.

(האיורים מתוך קודקס Madrid I 86v ; הנפשה - יואב לב ארי)

(קישור לסרטון)

# מתי יחליק האום?

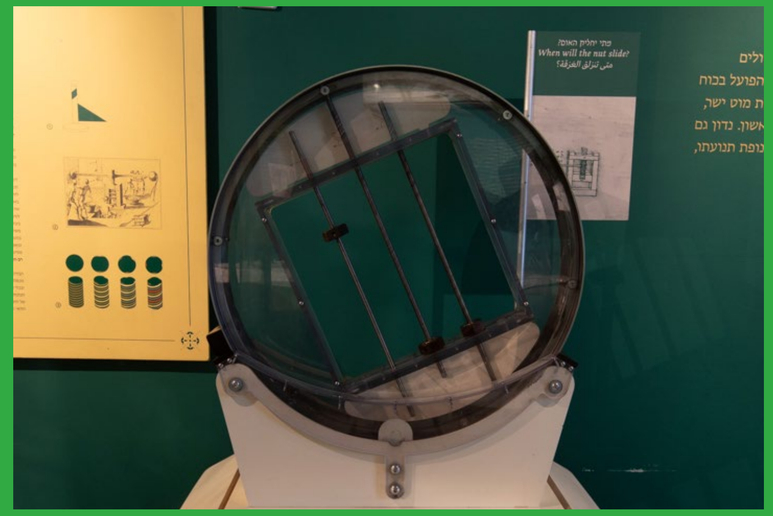
מסובבים את המסגרת כך ששלושת מוטות ההברגה יהיו אנכיים.

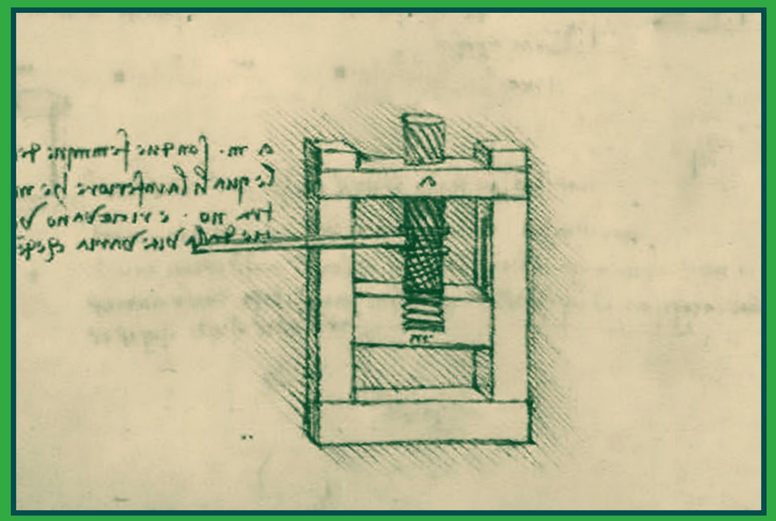
איזה מֵהָאֻמִים יורד למטה? איזה נשאר במקומו? מסובבים את המסגרת לזוויות אחרות – מתי מפסיקים כל האומים לרדת? מסובבים את האומים עצמם. איזה מהם מתקדם למרחק גדול יותר בכל סיבוב?

שלושת מוטות ההברגה נראים דומים, אך לכל אחד תבריג שונה. למוט בו האום מתקדם את המרחק הקטן ביותר תבריג רגיל בעל התחלה* אחת. שני המוטות האחרים הם בעלי כמה התחלות. בכל סיבוב האום מתקדם למרחק גדול יחסית.

ריבוי ההתחלות מאפשר יצירת תבריג בעל שיפוע גדול יחסית. שיפוע זה שקול למישור משופע תלול שדברים המונחים עליו יכולים להחליק למטה. ברגים רבֵּי-התחלות בעלי שיפועים גדולים מְשֻׁמש במקומות שבהם מעוניינים בהתקדמות גדולה בכל סיבוב. למשל תמסורות קוויות במכונות או לחלופין פקקים לבקבוקים שמספיק רבע סיבוב כדי לסגור או לפתוח אותם.

*להסבר על המושג "התחלה" ראו כתובת **"בורג המעלה הסיבובי"**.



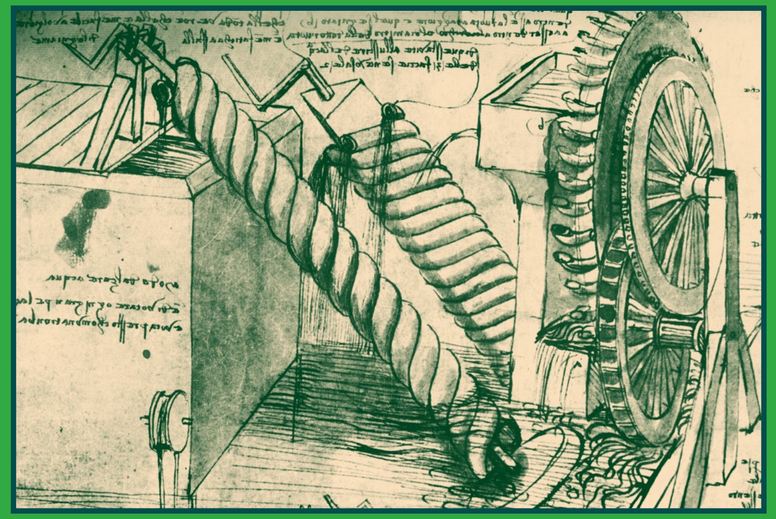



Madrid I 33v

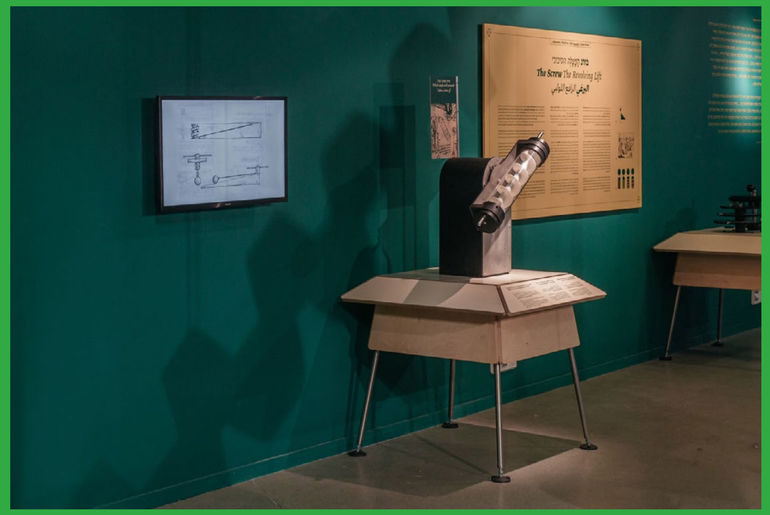
# איך להעלות מים?

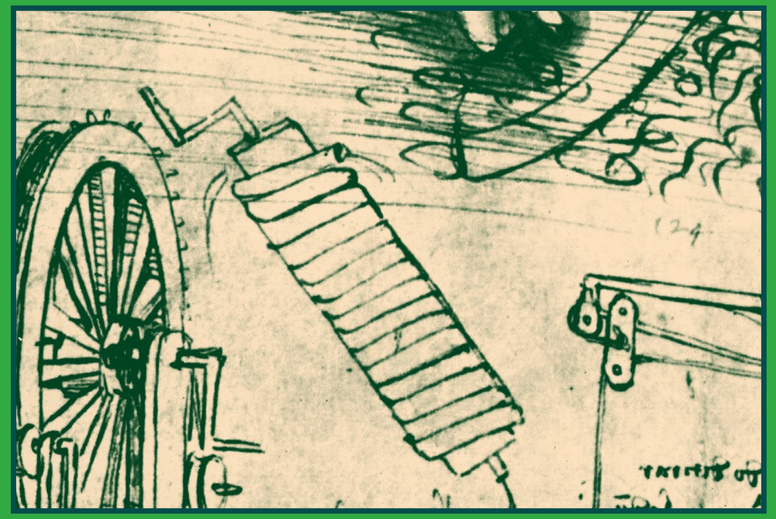
מסובבים את ה"ההגה" בכיוון הסימון ורואים כיצד הכדוריות עולות במַעֲלה הבורג. מערכת זו מְכֻנֶה "בורג ארכימדס" על שם ארכימדס היווני שכנראה המציא אותה לפני יותר מ- 2,000 שנה. היא שימשה אז כמשאבת מים לצורכי השקיה, לריקון מים מספינות ועוד. יתרונה על פני שאיבה בדליים טמון בכך שפעולתה רצופה וללא הפסקה, ואפשר לשאוב איתה לא רק נוזלים אלא גם אבקות, גֶּרֶגִּירִים ואף כדורים. גם כיום, ברגים דומים הַמְכֻנִים "בורג הוֹבלה" מְשֹׁמשִׁים במכשירים ובמכונות המעבירים חומרים באופן רצוף - ממשאבות ביוב ועד מכונות הַזְרָקַת פלסטיק, ואפילו במטחנת בשר ובמִזְרֶקֶת שוקולד.

*להסבר על המושג "התחלה" ראו כתובית **"בורג המעלה הסיבובי"**.



Atlanticus 26v



## איזה שיפוע יְנצַחַ?

מסובבים את אחת הידיות שבקצה הצינור השקוף ומעלים את כדור העץ לאורך הבורג הלבן שבתוכו. מתבוננים ורואים - מה קורה לכדור כשהוא מגיע למעלה?

משנים את **שיפוע** הצינור – באלה **שיפועים של הצינור** הכדור אינו עולה כלל במעלה הבורג? באלה **שיפועים** הוא עולה ונופל, ובאלה שיפועים נשאר במקומו? **האם כיוון הסיבוב הנדרש משתנה כאשר הופכים את הצינור?**

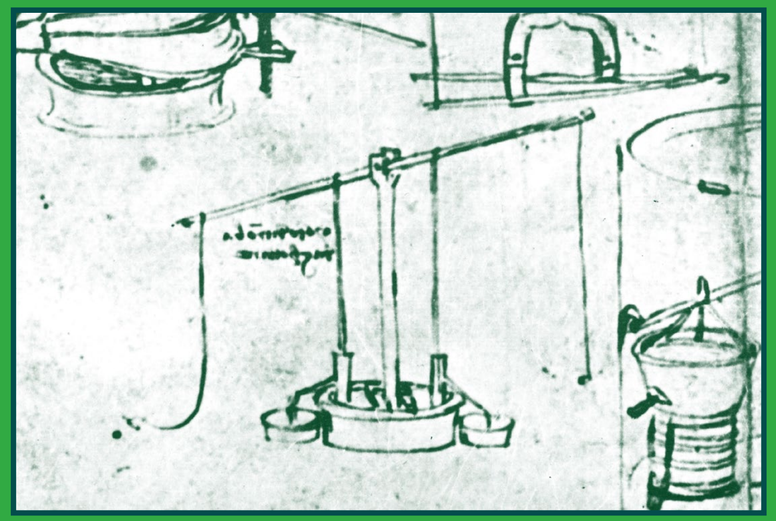
מערכת זו, הַמְּכֻנָּה "בורג ארכימדס" מאפשרת העלאת נוזלים, אבקות ואף חלקיקים וחפצים קטנים לאורך מסלול משופע. יעילותהּ והשיפוע המרבי שבּו היא מצליחה לפעול תלויים בקוטר הבורג; בפסיעת התבריג ובמְקַדֵּם החיכוך שבינו לבין החומר המועלה. ככל שהפסיעה קטנה יותר אפשר להשתמש בבורג בשיפועים גדולים יותר, אך נדרשת כמות רבּה יותר של סיבובים.

# מגנוני הרמה

## איך להרים סוס או ראש סוס?

מושכים בחבלים השונים ומנסים להרים את ראש הסוס שמשקלו 125 ק"ג. באיזה חֶבל קל יותר ובאיזה קשה? איזה חבל נדרש למשוך יותר כדי להרים את ראש הסוס גבוה ככל האפשר?

הַקוֹרָה שאליה קשורים ראש הסוס והחבלים היא מנוף פשוט בעל שתי זרועות וציר הממיר כוח קטן ותנועה ארוכה לכוח גדול ותנועה קצרה. ככל שמרחק החבל מהציר גדול יותר - קל יותר למשוך בחבל, אך מרחק המשיכה צריך להיות גדול יותר.

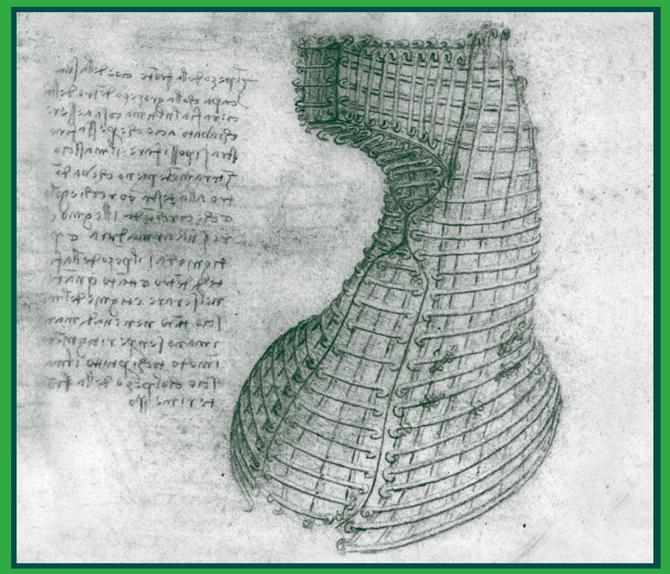


Atlanticus 26r

## למה ראש סוס?

משקולת ראש הסוס הוכנה על-ידי אומן המתכת הירושלמי הלל אביעזר בהשראת איור של לאונרדו המתאר חלק מתבנית ליציקת פסל ארד ענק של סוס (7 מטר גובהו). הפסל תוכנן כאנדרטה לזכר הדוכס פרנצ'סקו ספורצה, אביו של פטרונו של לאונרדו, לודביקו ספורצה דוכס מילאנו. לאונרדו עסק בתכנון הפסל ותהליכי יצירתו בין השנים 1489 ל-1494, ואף יצר דגם חימר בגודל מלא שלו אולם פסל הארד מעולם לא נוצק. משקל ראש הסוס שלפניכם הוא כ-65 קילוגרם ומחוברים לתחתיתו 2 פלטות ברזל השוקלות 30 קילוגרם כל אחת. סה"כ שוקלת המשקולת 120 ק"ג.

הבדלי הפרופורציות בין פסלו של הלל לאיורו של לאונרדו נובעים בין השאר מגודל התבנית שלאונרדו תכנן. האיור מצויר מזווית הסתכלות נמוכה יחסית בעוד שעל הפסל אנו מתבוננים מלמעלה.



Codex Madrid II 157r

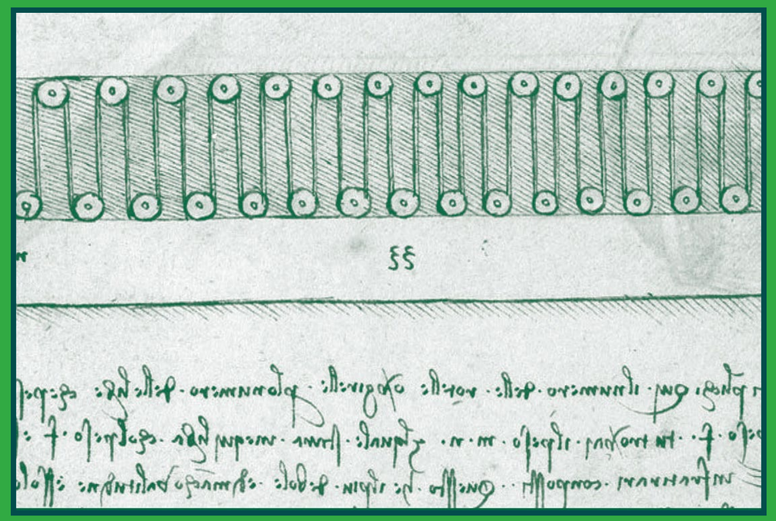
## איך להכפיל כוח?

מושכים בשלושת החבלים ומרימים את המשקולות המחוברות אליהן. איזה חבל קל יותר למשוך? איזה חבל צריך למשוך יותר כדי להרים את המשקולת לאותו גובה?

החבל השמאלי מחובר לגלגלת אחת אשר רק משנה את כיוון הכוח, הכוח בו צריך למשוך בחבל שווה למשקל המשקולת. החבל האמצעי מחובר לזוג גלגלות המכפיל את הכוח פי שניים. במערכת זו צריך למשוך רק בחצי הכוח, אך יש למשוך אורך חבל כפול. החבל הימני מחובר לשלוש גלגלות, מכפיל את כוחכם פי שלוש, אך יש למשוך גם פי שלוש אורך חבל.

גלגלת היא אחת מהמכונות הפשוטות שהומצאו עוד בימי היוונים ושימשו להכפלת כוח, בעיקר כדי להרים חפצים כבדים. אך כמו בכל מכפל כח – הדבר בא על חשבון הדרך – המרחק בו יש למשוך את החבל. זהו למעשה עקרון שימור האנרגיה.

לאונרדו לא הכיר את מושג האנרגיה (שנכנס לשימוש מאות שנה לאחר מכן), אך הכיר וניסח את הקשר שבין הכפלת הכוח מערכת גלגלות לאורך החבל שיש למשוך. הוא תיאר מגוון רחב של מנגנוני הרמה המבוססים על שימוש גלגלות.

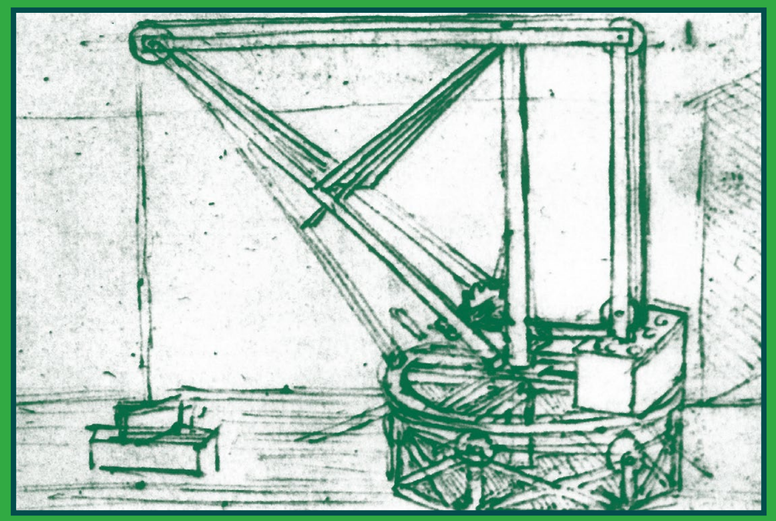


MADRID MS. I F. 36V

# איך לבנות חומה?

הרימו את הקוביות בעזרת הגלגלת והזיזו אותן ממקום למקום על ידי סיבוב המנוף. העבירו קוביות ממנוף למנוף ונסו לבנות בעזרתן קיר או מבנה.

מנופים, המשמשים להרמת משאות, הומצאו על ידי היוונים כבר במאה השישית לפני הספירה ומכיוון שהופעלו רק בעזרת כוח השרירים כללו תמיד מערכות להכפלת כוח, כמו גלגלות, חבלים וברגים. בנוסף, מסב כדורי המותקן מתחת למנוף, מאפשר לסובב את זרועו ולהעביר את המשא ממקום למקום. גם כיום, משמשים מנופים מסתובבים (המכונים עגורני צריח) כמעט בכל מקום בו יש להעביר ולסדר חפצים כבדים, אתרי בניה, נמלים ושדות תעופה, מפעלים ובתי מלאכה.



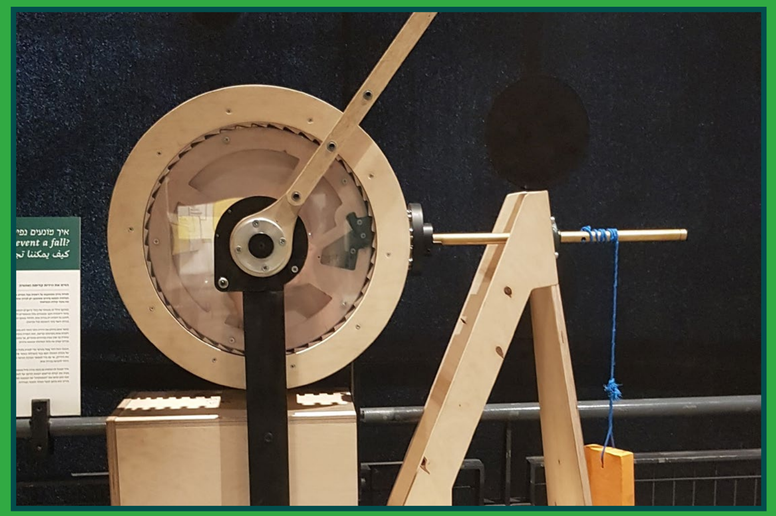
Manuscrip B f.49 r

# איך מונעים נפילה?

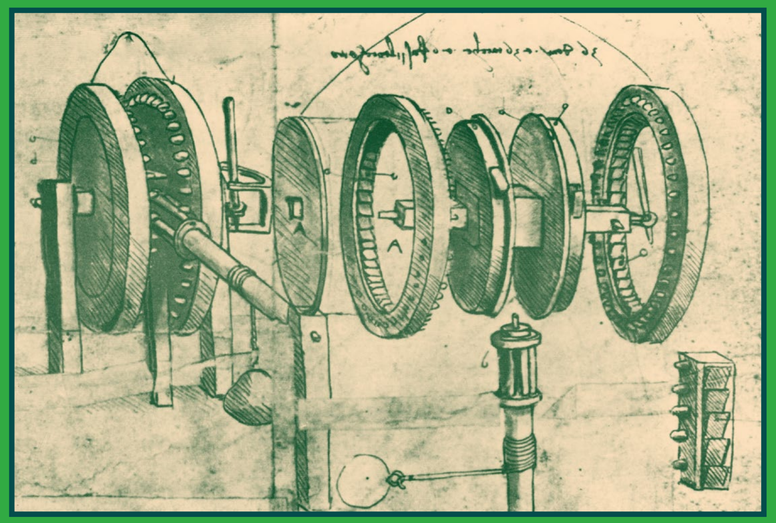
מזיזים את הידית קדימה ואחורה. לאיזה כיוון מסתובבת כל דסקית עץ? מדוע גלגל המוטות הנמצא ביניהן מסתובב רק לכיוון אחד? מה מקור קולות הנקישה?

הַמִּתְקָן כולל זוג מנגנוני אַל-חָזוֹר (ראצֶ'ט) הנמצאים בתוך דיסקיות העץ. מנגנונים אלה מאפשרים לידית לסובב כל דסקית רק בכיוון אחד, ולחזור באופן חופשי בכיוון השני (תוך השמעת קול נקישה). כאשר אתם מזיזים את הידית הלוך וחזור היא מסובבת דסקית אחת בתנועתה קדימה, ואת השנייה בתנועתה אחורה כך שהן נעות בכיוונים מנוגדים, אך מסובבות בכיוון קבוע את גלגל המוֹטוֹת שנמצא ביניהן.

מנגנון האל-חזור פֻּתַח בעיקר כדי למנוע גִלגול חזרה של גלגלת המעלה חפץ כבד (ונפילתו כאשר עוזבים את הידית), אך גם כדי לאפשר הפיכת תנועה הלוך וחזור לתנועה בכיוון אחד. איור מנגנון אל חזור זה מציג את יכולת הרישום יוצאת הדופן של לאונרדו שבו הוא חושף את "האנטומיה" של המנגנון ומדגים מדוע הוא נחשב לאבי האיור הטכני המודרני.




Windsor RCIN 919104



Atlanticus 30v

# חיכוך

## הילד הרע של המכניקה

מבין כל הכוחות שבטבע, כוח החיכוך הוא ה"בעייתי" מכולם. זהו כוח הפועל בין כל שני גופים הנוגעים זה בזה ומתנגד לתנועה היחסית ביניהם, למשל כאשר אנו מנסים לדחוף ארגז על הרצפה. הוא אינו תלוי בשטח המגע, אך תלוי במשקל הגוף ובחומרים מהם הוא והמשטח עליו הוא מחליק עשויים.

התנהגותו של כוח החיכוך אינה צפויה. כאשר מופעל כוח המנסה להזיז חפץ, החיכוך מתנגד לכך בחיכוך המכונה **"חיכוך סטטי" (חיכוך ללא תנועה)** שעצמתו שווה בדיוק לכוח הדחיפה. אך רק עד גבול מסוים.

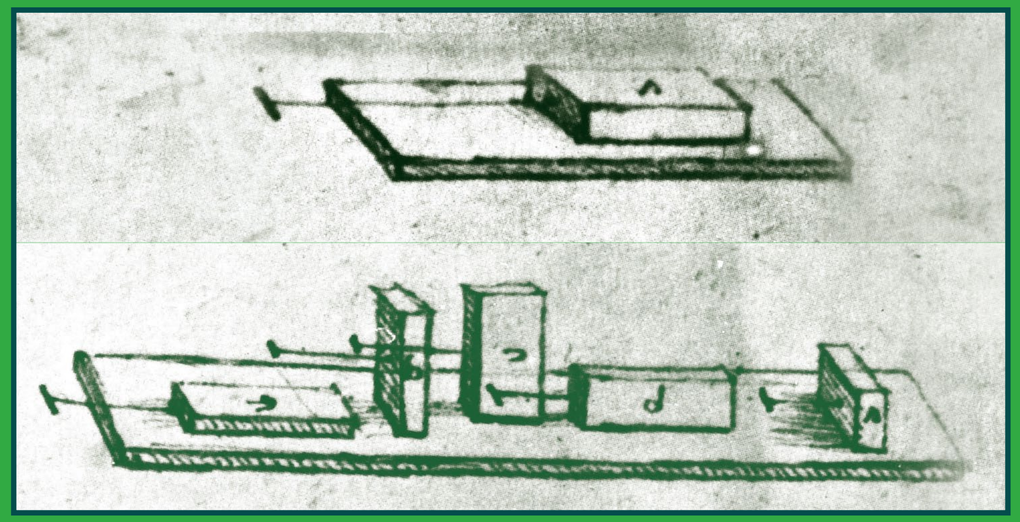
דחיפה חזקה מספיק מתגברת על החיכוך הסטטי, החפץ מתחיל להחליק והחיכוך הופך ל**"חיכוך דינאמי" (חיכוך בזמן תנועה)**. חיכוך שעצמתו קבועה והוא רק מאט את התנועה. לרוע המזל, החיכוך הדינאמי קטן מהסטטי והתוצאה היא שברגע ההחלקה, החפץ מאיץ בפתאומיות ומגביר את מהירותו. זו הסיבה שכאשר מכונית מחליקה בזמן סיבוב, הנהג מאבד את השליטה על הרכב

אך הבעיה העיקרית בכוח החיכוך היא התנגדותו לתנועה. כל שאר הכוחות בטבע לפעמים מתנגדים לתנועה ולפעמים עוזרים לה. כוח הכבידה (כוח המשיכה) למשל, מאט תנועה של כדור שאנו זורקים כלפי מעלה אך מאיץ ומגביר אותה כאשר הכדור נופל חזרה. הכוח בו מותחים קפיץ או גומייה יכול להאט ולעצור תנועת חפצים (בולמי זעזועים במכונית או אופניים) או להעיף אותם למרחק (רוגטקה).

החיכוך לעומת זאת ינסה תמיד להאט ולעצור את התנועה. לפעמים, יש לכך חשיבות - החיכוך בין סוליית הנעל לרצפה מאפשר לנו ללכת מבלי שרגלנו תחליק אחורה, והחיכוך בין הבורג לעץ בתוכו הוא מוברג מונע ממנו להשתחרר. אך כאשר אנו רוצים לבצע עבודה, החיכוך רק מפריע. התנגדותו לתנועה פוגעת בשימור האנרגיה (לכן הוא מכונה גם **"כוח לא משמר"**). כוח המשיכה, המאט את תנועת הכדור שאנו זורקים למעלה, הופך את האנרגיה הקינטית של התנועה לאנרגיה פוטנציאלית של גובה (ולהפך כאשר הכדור נופל חזרה). החיכוך פשוט הופך את אנרגיית התנועה לחום, שלעולם לא נוכל להפוך את כולו חזרה לתנועה או לאנרגיה אחרת. לא במקרה ניסו מהנדסים ומדענים בכל התקופות למצוא דרכים להקטין את כוח החיכוך - החל מהחלקת משטחי המגע ושימוש בחומרי סיכה או חומרים חלקים מטבעם ועד שימוש במסבים כדוריים או גליליים ההופכים את תנועת ההחלקה לתנועת גלגול.

לאונרדו חקר את נושא החיכוך במשך יותר משני עשורים ותובנותיו בנושא הקדימו את זמנם. כמו בכמעט כל תחום בו עסק, החל לאונרדו את מחקריו על חיכוך על מנת לתת מענה לסוגיות ספציפיות כמו תכנון צירי עגלות ותבריגים. בהמשך, העמיק את ידיעותיו התאורטיות בנושא בזכות שורת ניסויים מגוונת ששרתה את עבודתו כמהנדס. לא כל מסקנותיו של לאונרדו היו נכונות אולם הוא השכיל, בין השאר, לזהות שכוח החיכוך בין משטחים מחליקים פרופורציוני לכח המצמיד אותם אחד לשני ושהוא אינו תלוי בשטח המגע ביניהם.

מכיוון שלא פרסם את ממצאיו, תובנות אלו נהיו חלק מנחלת הכלל רק 200 שנים אחר כך בזכות גוליאם אמונטון (GUILLAUME AMONTONS 1663-1705).



Atlanticus 532r

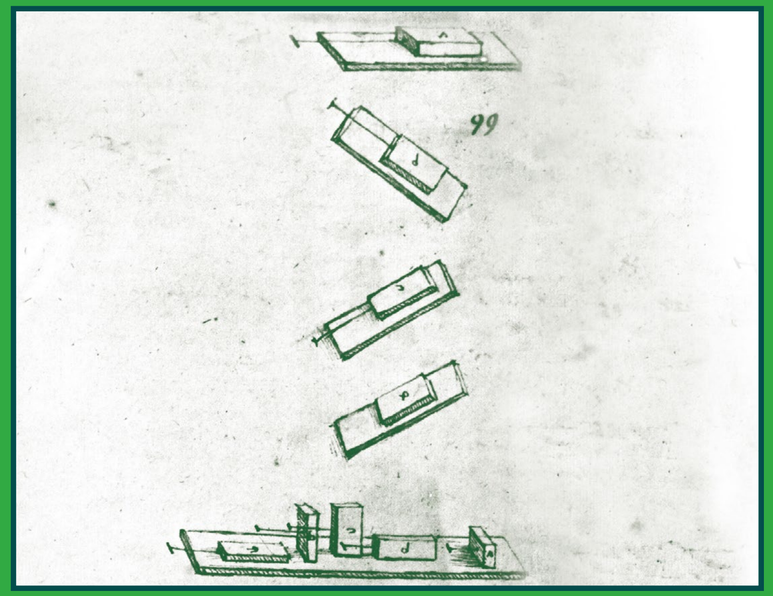
## מי יחליק רחוק יותר?

מניחים קוביות בתחילת המסוע לאט ובזהירות, ומתבוננים כיצד הן מחליקות על "רצועות ההחלקה" ועד היכן הן מגיעות.

על איזו רצועה (הבהירה או הירוקה) הקוביות מגיעות רחוק יותר? איזו מהרצועות מרגישה חלקה ואיזו מחוספסת? האם יש הבדל במרחק שאליו מגיעות הקוביות הקטנות לעומת הגדולות? האם יש הבדל במרחק שאליו מגיעה קובייה אם מניחים אותה על פאה רחבה או על פאה צרה?

כל הקוביות המונחות על המסוע מגיעות "לרצועות ההחלקה" באותה המהירות, ומאטות בגלל החיכוך עימן. המרחק שאליו תגיע הקובייה תלוי במקדם החיכוך, אשר תלוי בחומר שממנו היא עשויה ובחומר שממנו עשויה הרצועה. זוהי תכונה מיקרוסקופית התלויה במולקולות שעל פני השטח. לרצועה הבהירה, למרות שנראית ומרגישה מחוספסת, מקדם חיכוך נמוך מזו של הירוקה, הנראית חלקה. פרט לכך, מקדם החיכוך אינו תלוי בדבר: לא במסת הקוביות, לא בגודלן ובצורתן ולא בשטח הפאה שעליה הן מונחות. באופן תיאורטי לפחות, המרחק שאליו יגיעו קוביות דומות על אותה הרצועה צריך להיות זהה בכל הניסיונות. אך במציאות יש כנראה גורמים נוספים...

בכתביו של לאונרדו בנושא החיכוך מופיעים מקדמי חיכוך שונים הנובעים מהחומרים השונים שאותם חקר. מהערכים שבהם השתמש, משערים שלאונרדו חקר בעיקר מקרים שבהם השתמשו בחומרי סיכה כדי להפחית את החיכוך.



Atlanticus 532r

## מי יחליק ולמה?

מניחים קוביות על מדרונות ורואים אם ומתי הן מחליקות מַטָה. האם שיפוע המדרון משפיע על ההחלקה? מניחים את הקוביות על פֵּאות שונות – האם הדבר משפיע? אם הקובייה אינה זזה דוחפים אותה קלות – באיזה שיפוע היא ממשיכה להחליק ומתי נעצרת מיד?

הכוח אשר גורם לקוביות להחליק הוא כוח המשיכה. כוח זה פועל כלפי מטה, ורק חלק ממנו פועל בכיוון המדרון ומנסה להחליק את הקובייה. ככל שהשיפוע גדול יותר כוח המשיכה גדול יותר. החיכוך מתנגד לתנועה. הוא נוצר גם מכוח המשיכה, אך גדול יותר דווקא כשהשיפוע קטן. הקובייה מתחילה להחליק כאשר "כוח ההחלקה" מתגבר על כוח החיכוך הסטטי (חיכוך בין חפצים שאינם מחליקים). מיד לאחר התנועה החיכוך הופך להיות דינמי וקטֵן, לכן הקובייה ממשיכה להאיץ. זו הסיבה שדחיפה קטנה של הקובייה עוזרת להתחיל את ההחלקה. תופעה זו מתרחשת גם בהחלקת מכונית בכביש ולכן היא כה מסוכנת. הן כוח המשיכה הן כוח החיכוך תלויים במידה שווה במָסַת הקובייה.

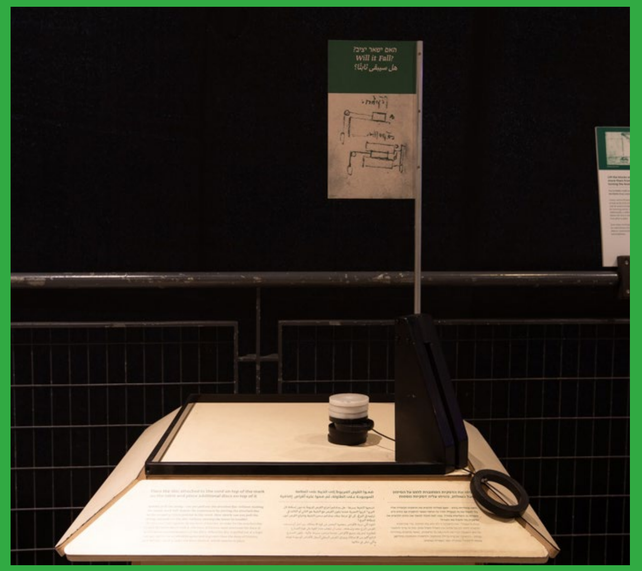
הן כוח המשיכה הן כוח החיכוך תלויים במידה שווה בּמָסַת הקובייה. באופן תיאורטי, קוביות אשר עשויות מאותו חומר ומונחות על אותו המשטח יחליקו (או יעצרו) בלי קשר לגודלן, למסתן ולפאה שעליה הן מונחות.
**האם אתם יכולים להסביר מדוע הדבר אינו כך במוצג? למרות שכּוֹחַ הַחִכּוּךְ תלוי רק בשני גורמים: החומרים של הגופים הבאים במגע ביניהם והַשְׁפָּעַת הכוחות הפועלים על הגופים, קשה מאוד לְצָפּוֹת את "התנהגותו". זאת כיוון שבמציאות האינטראקציה בין שני הגופים המתחככים רגישה לשינויים ולְהַשְׁפָּעַת מִשְׁתַּנִים שקשה להעריכם מראש.**

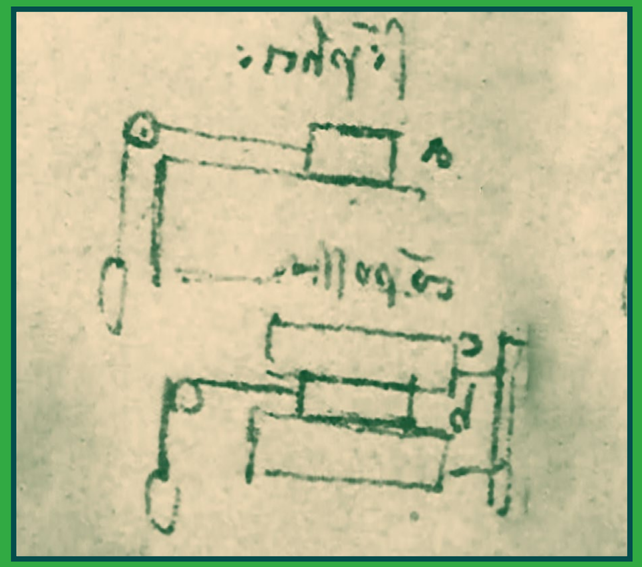
## האם ישאר יציב?

מניחים את הדסקית המחוברת לחוט על הסימון שעל השולחן, ומניחים עליה דסקיות נוספות. מושכים במהירות בחוט – האם אפשר להוציא את הדסקית הקשורה אליו בלי להפיל את כל הַמגְדָל?

חוזרים על הניסוי כאשר הדסקית עם החוט היא השנייה או השלישית במגדל. כמה לאט אפשר למשוך את החוט ולהוציא את הדסקית בלי להפיל את המגדל?

הכוח ה"מצמיד" את הדסקיות זו לזו הוא כוח החיכוך. כדי שהדסקית הקשורה לחוט תמשוך איתה את המגדל ותפיל אותו, כוח זה צריך להתגבר על כוח התאוצה הנדרשת להזיז את כל הדסקיות. כאשר מושכים במהירות גבוהה – התאוצה שנוצרת גדולה מהחיכוך, והדסקית התחתונה מחליקה מתחת לדסקיות שמעליה אשר נשארות במקומן.



PARIS E 35R

# אופטיקה והתבוננות

האופטיקה היוותה בסיס להבנתו של לאונרדו את העולם. בניגוד לרבים בתקופתו, שקידשו את אמיתות כְתְבֵי העולם העתיק או האמינו בעליונות התבונה והאידיאות על פני העולם הפיזי, לאונרדו סָבַר שהמידע החושי הוא הבסיס לַיֶדע האנושי בכלל ולמדע בפרט.

לאונרדו תפס את חוש הראייה כחשוב שבחושים. בהתאם לכך גיבש לעצמו תיאוריה מקיפה, גם אם לא מהפכנית, שכללה את כלל ההיבטים הפיזיקליים והפיזיולוגיים אשר משפיעים על התפיסה הראייתית: האור והתקדמותו במרחב; טִבְעו של הצל (אותו הגדיר לאונרדו כתופעה מקבילה); פעולתן של עדשות ומראות מסוגים שונים; מבנה העין ותפקודה ומיקום התפיסה הראייתית במוח האנושי.

מחקריו האופטיים של לאונרדו החלו בסביבות שנת 1490 בתחום הפרספקטיבה, ונועדו לשכלל את יכולת הציור שלו ולְסַפֵּק תשתית מדעית לאומנות שלו. כפי שקרה בתחומי דעת אחרים, גם בתחום האופטיקה סקרנותו של לאונרדו הובילה אותו להתעמק במדע התיאורטי.

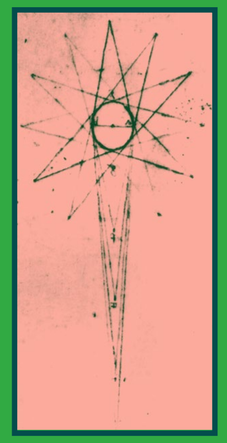
לצד עריכת ניסויים עצמאיים, במחקריו האופטיים נעזר לאונרדו בטקסטים קיימים דוגמת אלה של אבן אל היית'ם (965-1040 לספירה) כדי להעמיק את ידיעותיו. אם בתחילת דרכו שאף לאונרדו לייצג את הטבע בצורה המדויקת ביותר, בכתביו וביצירותיו המאוחרים באה לידי ביטוי ההכרה כי ייצוג נכון של תפיסתנו את העולם חייב לכלול גם את העיוותים, האשליות וחוסר הבהירות אשר נוצָרים בהשפעת האור, תנאי הסביבה ומנגנון הראייה שלנו.

התבוננות מעמיקה הייתה אבן יסוד באופן חשיבתו של לאונרדו. יכולתו להבחין בפרטי פרטים בעולם סביבו אפשרה ללאונרדו לתעד את המִבְנים של מנגנונים טבעיים ומכניים ואופני פעולתם, ליצור אנלוגיות ביניהם וכך להבין אותם.

תהליך ההתבוננות של לאונרדו היה שיטתי. הוא תרגל את יכולת ההתבוננות שלו, תכנן ובחר אובייקטים למחקר שבהם יצפה ויתבונן, ויצר לעצמו את התנאים שיאפשרו לו להתבונן בתופעות שאינן גלויות לעין: הוא הוסיף גרגרים למים כדי לעקוב אחר זרמים; ניתח גופות במטרה להתבונן באנטומיה החבויה של הגוף האנושי ובנה דגמים מכניים כדי לְדַמּוֹת את פעולות הלב והעין.

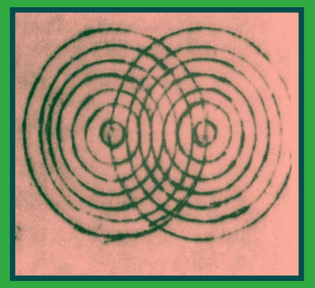
באזור "אופטיקה והתבוננות" שבתערוכה ניתן לְבַקר ב"לשכה אפלה" (קָמרָה אוּבְסְקוּרָה), ללמוד על פרספקטיבה ולתרגל התבוננות, בהשראת לאונרדו דה וינצ'י.

1



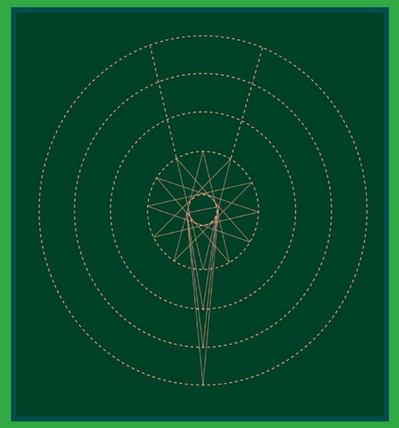
Ashburnham II 6v

2



paris A 61r

3



# קרינת האור

לאונרדו דמיין את קרינת האור באמצעות שתי תבניות גיאומטריות: הפירמידה והעיגול. בעקבות ג'ון פקהם (1230-1292) טען לאונרדו שגופים מאירים משליכים 'פירמידות של אור' לכל הכיוונים (1). האוויר, עפ"י לאונרדו מלא כולו בפירמידות האלה השומרות על שלמותן גם כשהן חוצות זו את זו. הקודקוד של קרני הפירמידות ובבואת הגוף נוצרים בעין המתבונן. כשהוא מזהה את האור כ'כוח', לאונרדו מתאר כיצד עצמים מאירים יוצרים זעזועים המתפשטים במעגלים כמו האדוות הנוצרות כשמשליכים אבן למים. האיור מימין ממחיש את אמונתו של לאונרדו כי, בדומה לפירמידות האור, התבניות האלה אינן מפריעות זו לזו (2). שני התיאורים תואמים זה לזה מפני שניתן לחלק את הזעזועים המעגליים לגזרות של פירמידות וקודקודי הפירמידות יוצרים מעגלים שווי מרחק (3). הרעיונות של לאונרדו נבדלים מתורת האור המודרנית של הפיזיקה. אולם, ראוי לציין שטבעו המורכב של האור מאתגר מונחים מקובלים כדוגמת "גל" או "חלקיק" ובסופו של דבר מחייב את יישומה של תורת הקוונטים להענקת הסבר מקיף.

# פרספקטיבה

מקורה של המילה פרספקטיבה בפועל הלטיני perspicere, שפירושו "לבחון" או "לראות דרך". במאה ה-14 המונח (פרספקטיבה) שימש לתָאֵר את מדעי האופטיקה ככלל, ואֶמַץ לעולם האומנות עם פיתוח ה"פרספקטיבה המלאכותית" או ה"פרספקטיבה לציירים" של אלברטי באמצע המאה ה-15. השימוש במילה פרספקטיבה (perspective) כפי שאנו מכירים אותה כיום נובע מהמונחים שטָבע אלברטי.

על פי מילון קמברידג', פרספקטיבה בעולם האומנות מוגדרת כ"שיטה שבה עצמים מצוירים על משטָח כך שמתקבל הרושם של עומק ומרחק" או "הדרך שבה עצמים מתוארים כקטנים יותר ככל שהם מתרחקים מאיתנו, וגודלם ומיקומם מותאמים לעצמים אחרים בציור".

האקדמיה ללשון העברית מגדירה את המילה "פרספקטיבה" כ"שינוי גודל העצמים בעיני המסתכל ממרחק; יצירת עומק מדומה בציור או בשרטוט דו-ממדי", ומציעה מונח עברי: "תשְקֹפת". בהתייחסו לפרספקטיבה בתחילת דרכו הגדיר אותה לאונרדו כ"הסתכלות (מנקודת מבט של עין אחת) על החלל דרך משטָח זכוכית שקוף, כך שהעצמים שמאחוריו מצוירים על גבו" (Paris A 1v).

בהמשך זיהה לאונרדו מגבלות בשיטה זו, בהן חוסר ההתאמה בין יצירת העומק בפרספקטיבה על-ידי מבט מעין אחת ובין האופן שבו אנו מסתכלים על סביבתנו במציאות עם שתי עינינו.

# טכניקות שונות ליצירת פרספקטיבה ותחושת עמק בציור

עוד לפני שלאונרדו ניסח את הכללים ליצירת הפרספקטיבה האווירית וטכניקת הסְפוּמָטו, אומנים שונים, כבר מימי מִצרים העתיקה, הצליחו ליצור תחושת עומק במִגוון שיטות. איור של חלל התערוכה מדגים כמה מהטכניקות שלאונרדו עצמו השתמש בהן:

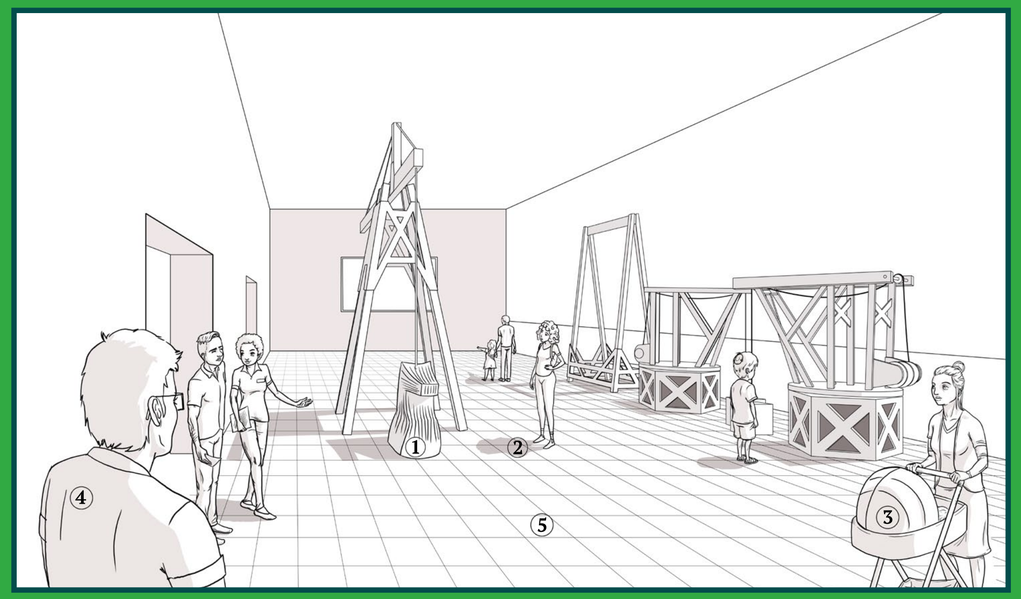
1. הַקְצָרָה (Foreshortening): כאשר דמויות ועצמים מצוירים כך שחזיתָם או כל צד אחר מופנה אל הצופה, הם ייתפסו כקצרים יותר מאשר לו היו מצוירים באופן רגיל. זו שיטת הציור הנועזת ביותר, והיא נועדה ליצור רושם של קִרְבַת דמויות ועצמים אל הצופה.

2. הַצָלָה (Shading): הוספת צל לעצמים ודמויות בציור רומזת על עומק החלל ואפיונו כתלת-ממדי.

3. הַסְתָרָה (Superimposition): תיאור עצמים ודמויות בציור כך שעצם אחד או דמות אחת מסתיר/ה באופן חלקי עצם אחר או דמות אחרת. משתמשים בטכניקה זו כדי ליצור אשליה שהציור כולל יותר ממה שמתואר על פני שטחו.

4. חפץ ייחוס (Repoussoir): הוסָפַת עצם לתיאור בתוך הציור שתפקידו לרמוז על עומק החלל, כמו למשל וילון מוסָת, מסגרת חלון וכדומה; כמו כן, הוסָפַת דמות שנראית מן הגב נועדה לְקָרֵב את הצופה לדמויות מרכזיות.

5. פרספקטיבה "מלאכותית" (ידועה גם כפרספקטיבה "קווית"): שיטה גיאומטרית לבניית החלל באמצעות קווים דמיוניים היוצאים מריצוף משובץ או מרשת כמעט בלתי נראית ומתכנסים בנקודה אחת בציור (נקודת מָגוז). על גבי קווים אלה מצוירים העצמים והדמויות שבמרחב כדי ליצור תחושת עומק ויחסֵי גודל מדויקים ביניהם עצמים ודמויות רחוקים נראים קטנים יותר מאלה שקרובים לצופה.



## לאונרדו דה וינצ'י ופרספקטיבה

לאונרדו דה וינצ'י למד את הכללים הבסיסיים של הפרספקטיבה כאשר הועסק שוּלְיָה בבית המלאכה של אנדריאה דל ורוקיו (1435-1488) שנודע כמומחה בתחום. הפרספקטיבה שהייתה מקובלת על ציירים באותה תקופה התבססה על עקרונות גיאומטריים וכללה שימוש נרחב באלמנטים אדריכליים ומבניים כדי ליצור תחושת עומק.

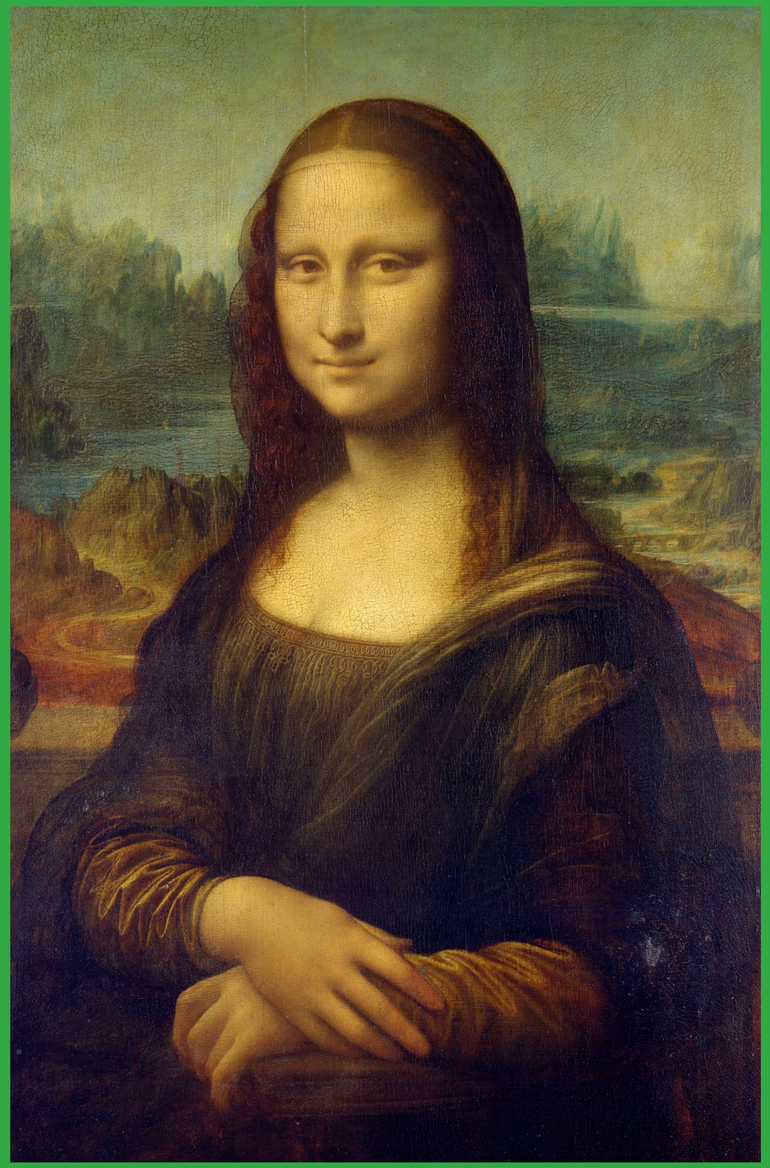
טכניקות פרספקטיבה מסוג זה היו מֻכָּרות לאומנים כבר במאה ה-14, אך הן שוכללו במהלך המאה ה-15 על בסיס ניסוייו של המהנדס והאדריכל הנודע פיליפו ברונלסקי (1377-1446). היה זה לאונה בטיסטה אלברטי (1404-1474) בחיבורו המשפיע שנקרא "על הציור" (1436), אשר ניסח את כלליה של הפרספקטיבה ככלי אומנותי המשתמש ביסודות גיאומטריים לייצוג אסתטי של הטבע.

לאונרדו, שהכיר בחשיבות הפרספקטיבה כיסוד תיאורטי ומעשי חשוב באומנות, זיהה את מגבלותיה בייצוג העולם כפי שנצפה בעינינו. במהלך עבודתו הבחין שבהסתכלות על הסביבה הטבעית לא רק גודלם של עצמים משתנה עם השתנות המרחק אלא גם צבעיהם וצורותיהם, ושתנאי סביבה שונים יוצרים עיוותים בתפיסת המציאות. למשל, אותו נוף יֵרָאה שונה בשעות שונות של היום ובתנאי מזג אוויר שונים. בעקבות אבחנות אלה פיתח לאונרדו את "הפרספקטיבה האווירית" שתכונתה הייחודית הנראית ל"עין התמימה" טמונה בציור גבעות הנמצאות במרחק, ולכן נתפסות בצבעים כחלחלים (בכתביו של לאונרדו צבע תכלת מסמן פסגות של גבעות מרוחקות). בו בזמן, פיתח לאונרדו טכניקה אומנותית חדשה, "ספומטו" (בתרגום מילולי "דהוי") שנועדה לטשטש את קווי הַמִתְאָר הַמְשמשים לרוב בציורים כגבול מלאכותי שאינו קיים בטבע, וכן להפחית את הניגוד בין צדדים מוארים ומוצלים של הדמויות.

בשנים האחרונות של חייו נטש לאונרדו את כללי הפרספקטיבה ששימשו ציירים אחרים בתקופתו, ושילב את הפרספקטיבה האווירית עם הספומטו. בדרך זו היו ציוריו ליצירות עשירות ומורכבות המשקפות דרך האומנות את ההרמוניה הקוסמית שבין הטבע והאֶנושות.

## איך נראית פרספקטיבה אווירית?

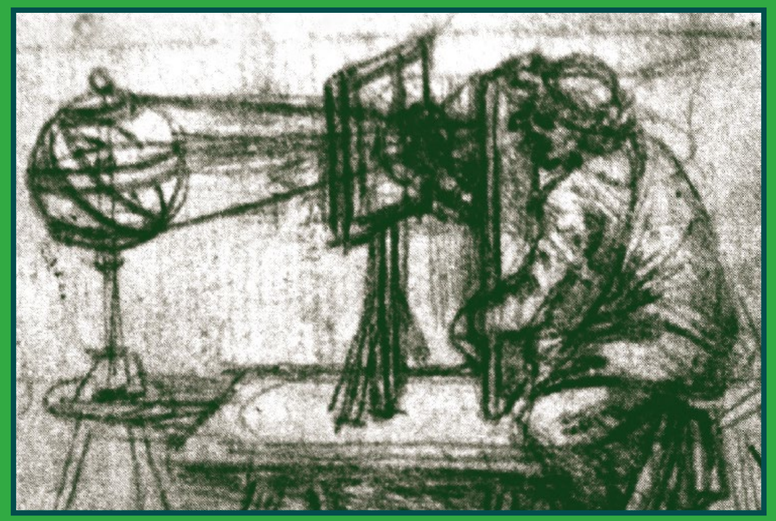
ציורו המפורסם של לאונרדו – "מונה ליזה" (1504-1517) הוא דיוקָן של ליזה ג'ררדיני, אישתו של פרנצ'סקו דל ג'וקונדו, סוחר בדים מפירנצה. הציור מדגים את טכניקות הפרספקטיבה האווירית וה"ספומטו" שאותן פיתח לאונרדו: אפשר להבחין בעקרונות הפרספקטיבה האווירית בנוף המצויר מאחורי הדמות – ככל שעצמים שונים רחוקים יותר מהדמות ומהצופה, הם מתוארים בגווני צבע תכלת. טכניקת הספומטו מודגמת גם היא בציור ה"מונה ליזה": פרטי הנוף כמו גשר ונהר, ופרטי דמות האישה כמו איברי פָניה, ידיה ודוגמת הבד של בגדיה מצוירים באמצעות משיכות מכחול קטנטנות במיוחד כדי להשיג אפקט של מעברי צבע הדרגתיים ועדינים ביותר. כך, אם תביטו מקרוב תבחינו שאין כלל קווי מִתְאָר ברורים אשר מגדירים את הדמות ואת הנוף. אגב, זו אחת הסיבות לכך שנדרש ללאונרדו זמן רב להשלים את ציור הדיוקן; כמו כן ידוע כי היה ברצונו של לאונרדו להשאיר את הציור במצב הנראה לצופים כאילו היצירה ממשיכה להתהוות.



## איך להשתמש בפרספקטוגרף?

מניחים מאחורי זגוגית השקופה חֵפֶץ או שניים שאותם תרצו לצייר. מביטים דרך אחד החורים, ובעזרת טוש מחיק עוברים על קווי הַמִּתְאָר של חפץ ומציירים אותם על הזגוגית כך שתתקבל תמונה החופפת לאָפֶן שבו העין תופסת את החפצים. אפשר גם לנסות לצייר את דמותו של חבר שיושב ממול.

מהמאה ה -16 ואילך הפרספקטוגרף שימש אמנים רבים ליצירת דימויים תלת-ממדיים. בעיצובו של לאונרדו כָּלַל הפרספקטוגרף מִשְׁטָח זכוכית שהוצב לפני תבנית מחוררת. האמן היה מתבונן באמצעות עין אחת דרך אחד החורים, ועוקב עם כלי הרישום אַחַר קווי הַמִּתְאָר של הדימוי שאותו רצה לצייר כפי שנראו על גבי הזכוכית. ברישום של לאונרדו אפשר לראות שימוש בפרספקטוגרף לציור סְפֶרָה ארמילָרִית (Armillary Sphere) מכשיר מעקב והוראה אסטרונומי.



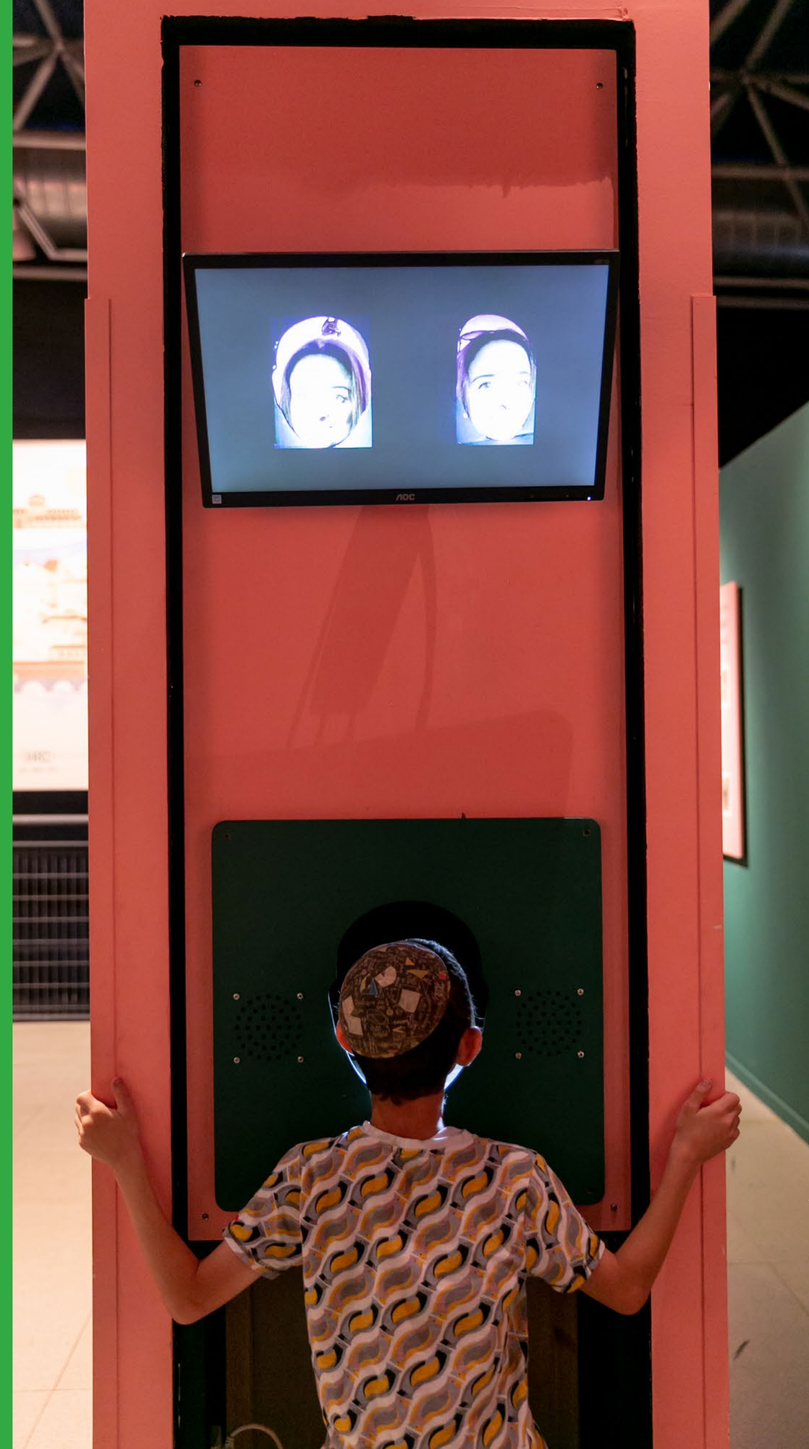
Codex Atlanticus 5r

## למה האף גדול?

מניחים את הסנטר על משענת, לוחצים על לחצן הפעלה ומקשיבים להוראות. אחרי הצילומים מתבוננים בשתי התמונות שעל המסך. מדוע באחת מהן הפנים נראים מעוותים והאף גדול יחסית?

התמונה המעוותת צולמה במצלמה קרובה, וההבדל בין מרחק האף מהמצלמה לבין מרחק האוזניים ממנה גדול יחסית. הבדל זה גורם לאף להיראות גדול יחסית. התמונה השנייה צולמה ממצלמה מרוחקת, כך שההבדל שבין מרחק האף ומרחק האוזניים מהמצלמה קטן מאוד. עיוותים המגדילים את האף או פרטים אחרים הקרובים למצלמה מוכרים לנו מצילומי סלפי שבהם מרחק המצלמה מוגבל לאורך הזרוע. זו גם הסיבה לשימוש במקלות הסלפי המרחיקים את המצלמה.

בתקופת לאונרדו אומנם לא היו מצלמות, אך כדי לצייר ציורים (ובפרט ציורי קיר גדולים) בפרספקטיבה נכונה היה על הצייר לדעת היכן יעמדו הצופים, ולתכנן בהתאם לכך את הגדלים היחסיים של פרטי התמונה. בין השנים 1472-1475 צייר לאונרדו את "בשורת המלאך למרים" שהיה אחד הציורים הראשונים המיוחסים לו. מידותיהם של אלמנטים מסוימים בציור, דוגמת זרועה המושטת של מרים מותאמים להתבוננות מנקודת מבט מסוימת (מצד ימין).



# קָמֶרָה אוֹבְּסְקוּרָה

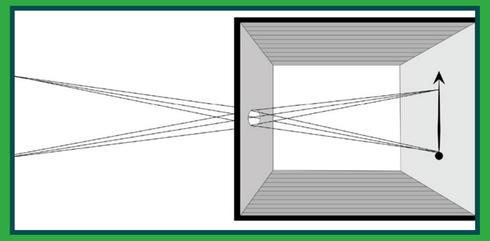
הקמרה אובסקורה ("לִשְׁכָּה אֲפֵלָה") היא מכשיר אופטי שבו חלל סגור אשר באחת מפאותיו נָקֶב. נקב זה מאפשר רק לקרני אור בודדות המוחזרות מֵחֵפֶץ או נוף הנמצאים מולו לעבור ולפגוע בקיר או במסך המוצב בתוך המכשיר. קרניים אלה יוצרות בפועַל דמות מדויקת של אותו החפץ, אך כיוון שקרני האור נעות בקווים ישרים, הדמות שיוצרות הקרניים החודרות מבעד הנקב נראית הפוכה.

לאורך ההיסטוריה שימשו מכשירי קמרה אובסקורה למטרות שונות.

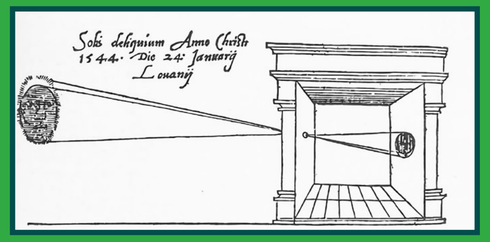
התופעה שבה מַעֲבר אור מבעד נקבים או חריצים יוצר דמות הפוכה מוזכרת כבר בכתבים של חכמי סין ויוון מהמאות הרביעית והחמישית לספירה. מהמאה ה-11 לספירה מכשירים המבוססים על התופעה החלו לְשַׁמֵּשׁ כלֵי מחקר מקובלים בניסויים אופטיים ובתצפיות אסטרונומיות שבהן המכשיר אִפשר לִצְפּוֹת בשמש באופן בטוח על ידי הקרנת דמותהּ על מסך. באמצע המאה ה-16 החלו לִבְנוֹת מכשירי קמרה אובסקורה שבהם הותקנו עדשות במקום נקבים, מה ששיפר משמעותית את איכות הדמות המוקרנת והגביר מאוד את השימוש במכשיר. במאות שלאחר מכן שימשו מכשירי קמרה אובסקורה גדולים לצורך מופעים אופטיים לקהל, או כעזרים לציירים שיכלו לעקוב אחר הדמות שנוצרה בתוך המכשיר ולבסס עליה רישומים.

כאשר פיתחו ג'וזף ניפס (Joseph Nicéphore Niépce, 1833-1765) ולואי דאגר (Louis Jacques Mandé Daguerre, 1851-1787) את תהליך הצילום היציב הראשון בתחילת המאה ה-19, הם השתמשו בקמרה אובסקורה בעלת עדשה מְרַכֶּזֶת כדי להקרין את הנוף על לוח הצילום הכימי שפיתחו.

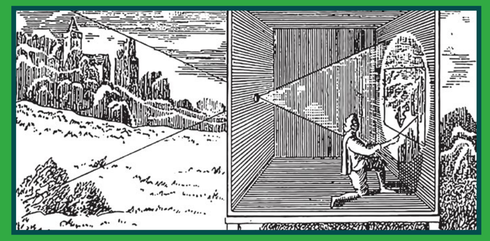
1



2




3



הקמרה אובסקורה הייתה עבור לאונרדו כלי מחקרי ממדרגה ראשונה כפי שיעידו יותר מ-200 (!) הרישומים של המכשיר המופיעים במחברותיו. ייתכן שבעקבות מחקריו של הרלב"ג (רבי לוי בן גרשון, 1288-1344) נִצֵּל בתחילה לאונרדו את הקמרה אובסקורה כאמצעי להתבונן על השמש בצורה בלתי ישירה.

בהמשך, השתמש במכשיר כדי להדגים קשת רחבה של תופעות אופטיות: היפוך דמות; בהירות של אור וצל; הצטלבות קרני אור מכיוונים שונים באופן שאינו מפריע ליצירת כמה דמויות המוקרנות על המסך וכן שימוש במכשיר כמודל, חלקי לפחות, למבנה העין. מה שייחד את שימושו של לאונרדו בקמרה אובסקורה היה השיטתיות שבה בחן פרמטרים שונים במכשיר כגון השפעתם של מספר הנקבים, צורתם וגודלם על הדמויות הנוצרות.

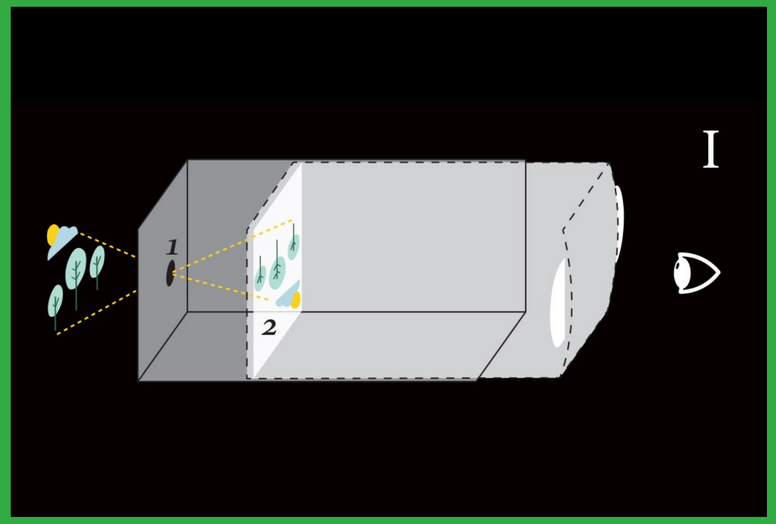
# מדוע מתהפך הנוף?

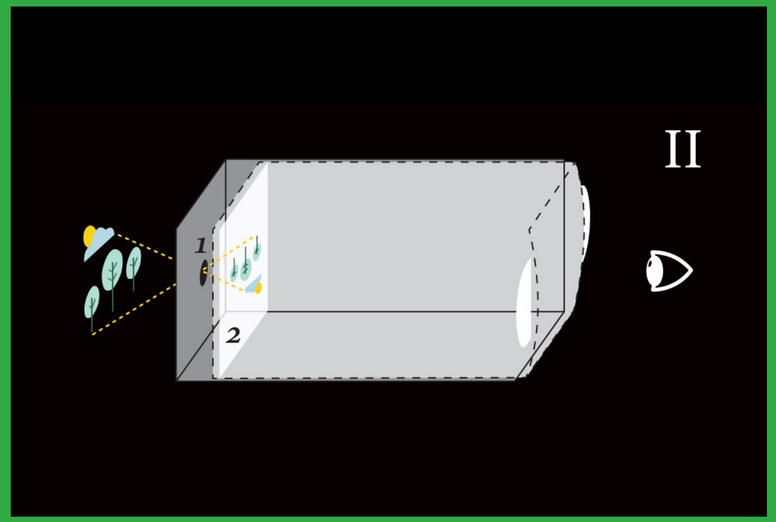
מסתכלים לעומק הַפֶּתַח – ומזהים את "כתמי האור" שעל המסך השקוף לְמֶחֱצָה שבקצהו.

הדמות שעל המסך היא של הנוף הנשקף מחלון הבניין. מזיזים את המסך קדימה ואחורה בעזרת הידיות שבצידי הפתח. מה קורה לגודל התמונה ולבהירותה?

החלון שמעבר למסך מצופֶּה ביריעה שחורה שבמרכזה נקֶב קטן (1). נקב זה מאִפַשֶר רק לקרני אור בודדות המגיעות מהנוף שבחוץ לעבור ולפגוע במסך (2). קרניים אלה, שֶכּל אחת מהן מגיעה רק מנקודה אחת בנוף, יוצרות דמות מדויקת של הנוף, אך כֵּיוָן שהן נעות בקווים ישרים – דמות זו הפוכה. זהו עיקרון הקַמָרָה אוֹבְּסְקוּרָה.

כאשר מושכים את המסך ומרחיקים אותו מהנקב הקרניים מתרחקות זו מזו והדמות שנוצרת גדולה וכהה יותר (I). כאשר הנייר מתקרב לנקֶב הדמות נהיית קטנה ובהירה יותר (II). ראו עמוד 72 "איך נקב יוצר תמונה".

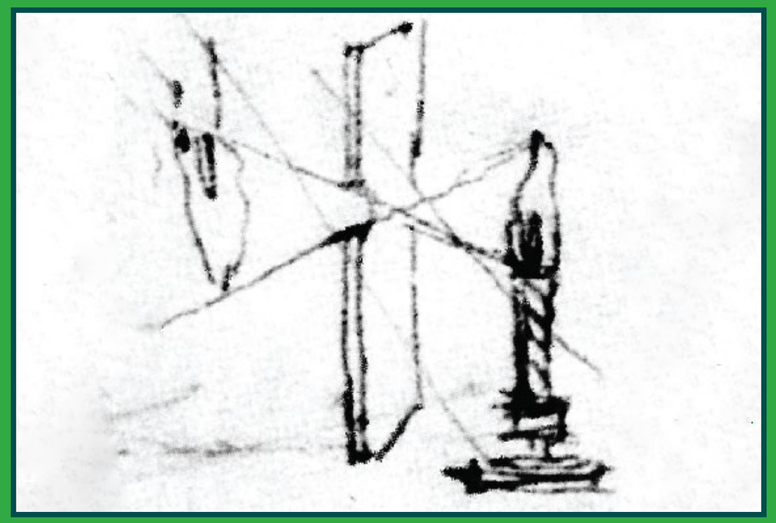


# איך נקב יוצר תמונה?

מסתכלים על התמונה ההפוכה על המשטח החלבי שבעומק הַפתַח. לוחצים על הלחצן הימני ורואים כיצד המשטח החלבי הופך לשקוף – מה נמצא מאחוריו? לוחצים על הלחצן השמאלי כדי להאיר את הפתח ובודקים מה נמצא בתוכו.

חלון המוזיאון שֶׁמֵעֵבֶר לנייר מצופה ביריעה שחורה שבמרכזה נֶקֶב קטן. נקב זה מאפשר רק לקרני אור בודדות המגיעות מהנוף שבחוץ לעבור, לפגוע במשטח וליצור עליו דמות הפוכה. החומר החלבי שבמשטח הוא גביש נוזל ההופך לשקוף כאשר אתם לוחצים על הלחצן ומעבירים אליו חשמל. במצב שקוף זה קרני האור אינן עוצרות בו ואינן יוצרות תמונה, ואפשר לראות דרכו את הנקב שעל החלון.

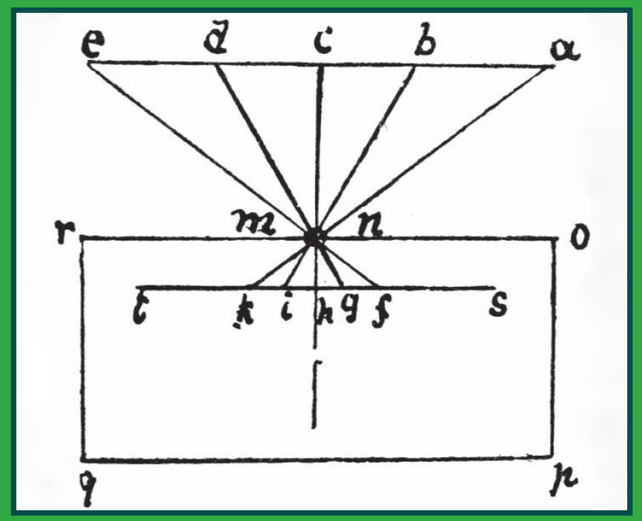


Codex Atlanticus 346v

# כיצד להתבונן בשמש?

מהיכן מגיעות קרני האור היוצרות את המילה "אור" על הרצפה? מסתכלים למעלה, דרך טבעת היריעה הכהה על הפנסים שמעל לתקרת החדר, מדוע מתהפכת תמונתם הנוצרת על הרצפה?

היריעה הכהה שקופה מספיק כדי שעינינו הרגישות לאור יצליחו לראות דרכה את הפנסים, אך קרני האור העוברות אותה אינן חזקות מספיק כדי ליצור דמות. המילה שעל הרצפה נוצרת מהקרניים העוברות דרך הנקב הקטן והשקוף לחלוטין שבמרכז העיגול. אך, מכיוון שקרני האור נעות בקווים ישרים - המילה הנוצרת הפוכה.

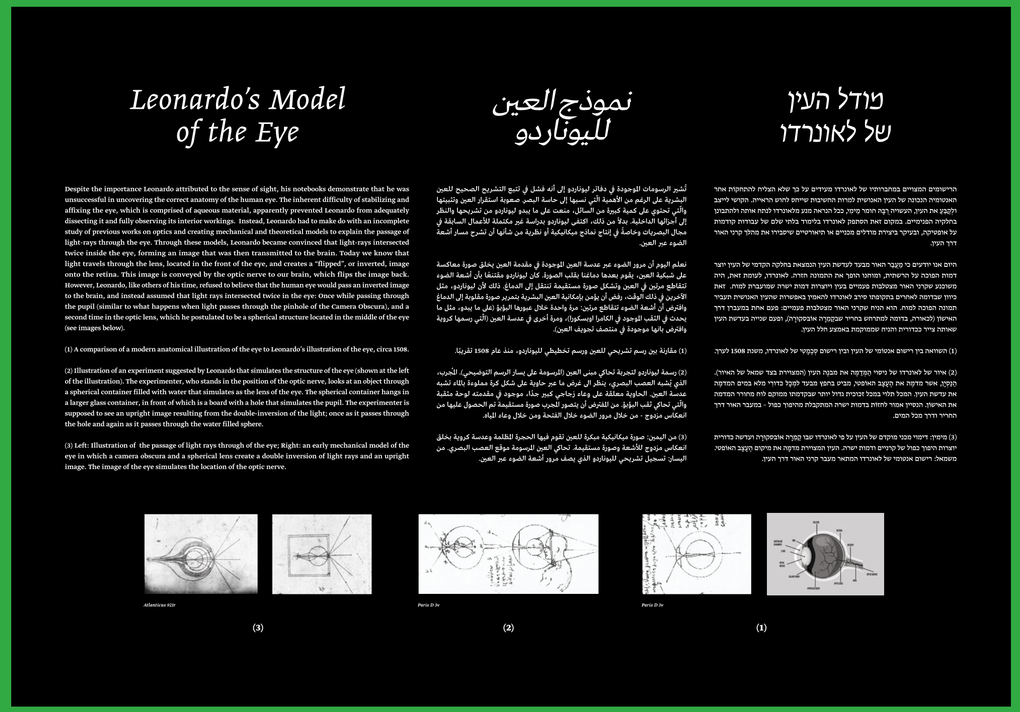



PARIS D SR

# מודל העין של לאונרדו

הרישומים המצויים במחברותיו של לאונרדו מעידים על כך שלא הצליח להתחקות אחר האנטומיה הנכונה של העין האנושית למרות החשיבות שייחס לחוש הראייה. הקושי לייצב ולקבע את העין, העשויה רֶבָה חומר מֵימִי, ככל הנראה מנע מלאונרדו לנתח אותה ולהתבונן בחלקיה הפנימיים. במקום זאת הסתפק לאונרדו בלימוד בלתי שלם של עבודות קודמות על אופטיקה, ובעיקר ביצירת מודלים מכניים או תיאורטיים שיסבירו את מהלך קרני האור דרך העין.

היום אנו יודעים כי מַעֲבַר האור מבעד לעדשת העין הנמצאת בחלקה הקדמי של העין יוצר דמות הפוכה על הרשתית, ומוחנו הופך את התמונה חזרה. לאונרדו, לעומת זאת, היה משוכנע שקרני האור מצטלבות פעמיים בעין ויוצרות דמות ישרה שמועברת למוח כיוון שבדומה לאחרים בתקופתו סירב לאונרדו להאמין באפשרות שהעין האנושית תעביר תמונה הפוכה למוח. הוא הניח שקרני האור מצטלבות פעמיים: פעם אחת במעברן דרך האישון (לכאורה, בדומה למתרחש בחריר שבקַמֶרָה אוּבסקוּרָה), ופעם שנייה בעדשת העין שאותה צייר ככדורית והניח שממוקמת באמצע חלל העין.



## מודל העין של לאונרדו

הרישומים המצויים במחברותיו של לאונרדו מעידים על כך שלא הצליח להתחקות אחר האנטומיה הנכונה של העין האנושית למרות החשיבות שייחס לחוש הראייה. הקושי לייצב ולקבע את העין, העשויה רֶבָה חומר מֵימִי, ככל הנראה מנע מלאונרדו לנתח אותה ולהתבונן בחלקיה הפנימיים. במקום זאת הסתפק לאונרדו בלימוד בלתי שלם של עבודות קודמות על אופטיקה, ובעיקר ביצירת מודלים מכניים או תיאורטיים שיסבירו את מהלך קרני האור דרך העין.

היום אנו יודעים כי מַעֲבַר האור מבעד לעדשת העין הנמצאת בחלקה הקדמי של העין יוצר דמות הפוכה על הרשתית, ומוחנו הופך את התמונה חזרה. לאונרדו, לעומת זאת, היה משוכנע שקרני האור מצטלבות פעמיים בעין ויוצרות דמות ישרה שמועברת למוח. זאת כיוון שבדומה לאחרים בתקופתו סירב לאונרדו להאמין באפשרות שהעין האנושית תעביר תמונה הפוכה למוח. הוא הניח שקרני האור מצטלבות פעמיים: פעם אחת במעברן דרך האישון (לכאורה, בדומה למתרחש בחריר שבקַמֶרָה אוּבסקוּרָה), ופעם שנייה בעדשת העין שאותה צייר ככדורית והניח שממוקמת באמצע חלל העין.

(1) השוואה בין רישום אנטומי של העין ובין רישום סכֵמטי של לאונרדו, משנת 1508 לערך.

(2) איור של לאונרדו של ניסוי המדמה את מבנה העין (המצוירת בצד שמאל של האייר). קוֹסֵם, אשר מדמה את הַקְפֵּר האוּפּטִי, מביט בחפץ מבעד לחָלָל כדורי מלא במים המדמה את עדשת העין. המכל חלוי במכל זכוכית גדול יותר שבקדמתו מסוקם לוח מחריר המדמה את האישון. המסיין אמור לזהות בדמות ישרה המתקבלת מהיפוך כפול - במעבר האור דרך החריר ודרך מכל המים.

(3) משמאל: דיסוי מכני מדמדם של העין על פי לאונרדו שבו מַמְרֵה אובסקוּרָה ועדשה כדוריית יוצרות היפוך כפול של קרניים ודמות ישרה. העין המצוירת מדמה את מיקום הַקְפֵּר האוּפּטִי. משמאל: רישום אנטומי של לאונרדו המראה מעבר קרני האור דרך העין.

## نموذج العين لليوناردو

تُشير الرسومات الموجودة في دفاتر ليوناردو إلى أنه فشل في تتبع التشريح الصحيح للعين البشرية على الرغم من الأهمية التي نسبها إلى حاسة البصر. صعوبة استقرار العين وتثبيتها والتي تحتوي على كمية كبيرة من السائل، منعت على ما يبدو ليوناردو من تشريحها والنظر إلى أجزائها الداخلية. بدلاً من ذلك، اكتفى ليوناردو بدراسة غير مكتملة للأعمال السابقة في مجال البصريات وخاصة في إنتاج نماذج ميكانيكية أو نظرية من شأنها أن تشرح مسار أشعة الضوء عبر العين.

نعلم اليوم أن مرور الضوء عبر عدسة العين الموجودة في مقدمة العين يخلق صورة معاكسة على شبكية العين. يقوم بعدها دماغنا بقلب الصورة. كان ليوناردو مقتنعًا بأن أشعة الضوء تَتقاطع مرتين في العين وتُشكل صورة مستقيمة تنتقل إلى الدماغ. ذلك لأن ليوناردو، مثل الآخرين في ذلك الوقت، رفض أن يؤمن بإمكانية العين البشرية بتمرير صورة مقلوبة إلى الدماغ والفرض أن أشعة الضوء تتقاطع مرتين: مرة واحدة خلال عبورها الثقْبُ (مثل ما يبدو، مثل ما يحدث في الثقب الوحيد في الكاميرا أوبسكورا). ومرة أخرى في عدسة العين التي رسمها كروية والفرض بأنها موجودة في منتصف تجويف العين.

(1) مقارنة بين رسم تشريحي للعين ورسم تخطيطي لليوناردو، منذ عام 1508 تقريبًا.

(2) رسمة ليوناردو لتجربة تحاكي مبنى العين (المرسومة على يسار الرسم التوضيحي). المُجرب، الذي يُشبه العصب البصري، ينظر الى غرض ما عبر حاوية على شكل كرة مملوءة بالماء تشبه عدسة العين. الحاوية معلقة على وعاء زجاجي كبير جدًا، موجود في مقدمته لوحة مثقبة والتي تحاكي ثقب الثقْبُ من المفترض أن يتصور المجرب صورة مستقيمة ثم الحصول عليها من انعكاس مزدوج - من خلال مرور الضوء خلال الفتحة ومن خلال وعاء الماء.

(3) من اليمين: صورة ميكانيكية مبكرة للعين تقوم فيها الحجرة المظلمة وعدسة كروية بخلق انعكاس مزدوج للأشعة وصورة مستقيمة. تحاكي العين المرسومة موقع العصب البصري. من اليسار: تسجيل تشريحي لليوناردو الذي يصف مرور أشعة الضوء عبر العين.



(3) (2) (1)

## Leonardo's Model of the Eye

Despite the importance Leonardo attributed to the sense of sight, his notebooks demonstrate that he was unsuccessful in uncovering the correct anatomy of the human eye. The inherent difficulty of stabilizing and affixing the eye, which is comprised of aqueous material, apparently prevented Leonardo from adequately dissecting it and fully observing its interior workings. Instead, Leonardo had to make do with an incomplete study of previous works on optics and creating mechanical and theoretical models to explain the passage of light-rays through the eye. Through these models, Leonardo became convinced that light-rays intersected twice inside the eye, forming an image that was then transmitted to the brain. Today we know that light travels through the lens, located in the front of the eye, and creates a "flipped", or inverted, image onto the retina. This image is conveyed by the optic nerve to our brain, which flips the image back. However, Leonardo, like others of his time, refused to believe that the human eye would pass an inverted image to the brain, and instead assumed that light rays intersected twice in the eye: Once while passing through the pupil (similar to what happens when light passes through the pinhole of the Camera Obscura), and a second time in the optic lens, which he postulated to be a spherical structure located in the middle of the eye (see images below).

(1) A comparison of a modern anatomical illustration of the eye to Leonardo's illustration of the eye, circa 1508.

(2) Illustration of an experiment suggested by Leonardo that simulates the structure of the eye (shown at the left of the illustration). The experimenter, who stands in the position of the optic nerve, looks at an object through a spherical container filled with water that simulates as the lens of the eye. The spherical container hangs in a larger glass container, in front of which is a board with a hole that simulates the pupil. The experimenter is supposed to see an upright image resulting from the double-inversion of the light; once as it passes through the hole and again as it passes through the water filled sphere.

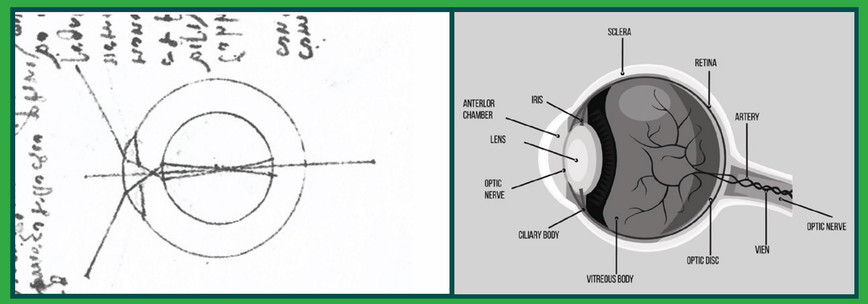
(3) Left: Illustration of the passage of light rays through of the eye; Right: an early mechanical model of the eye in which a camera obscura and a spherical lens create a double inversion of light rays and an upright image. The image of the eye simulates the location of the optic nerve.

1. השוואה בין רישום אנטומי של העין ובין רישום סְכֶמָטִי של לאונרדו, משנת 1508 לערך.

2. ניסוי הַמדַמֶה את מבנֶה העין (המצוירת בצד שמאל של האיור). הַנַסְיָין, אשר מדמֶה את הֶעָצָב האופטי, מביט בחפץ מבעד למְכָל כדורִי מלא במים המדמֶה את עדשת העין. המכל תלוי במכל זכוכית גדול יותר שבקדמתו ממוקם לוח מחורר המדמה את האישון. הנסיין אמור לחזות בדמות ישרה המתקבלת מהיפוך כפול – במעבר האור דרך החריר ודרך מכל המים.

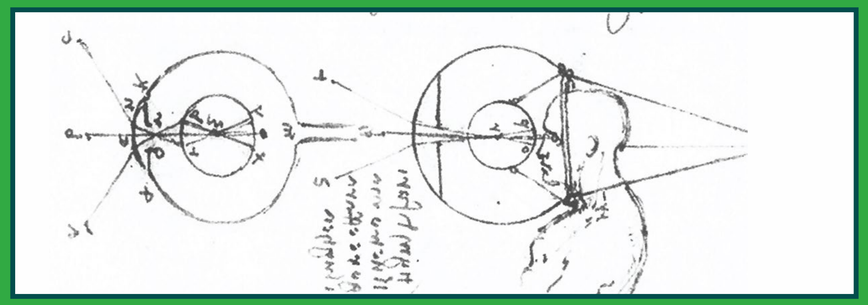
3. מימין: דימוי מכני מוקדם של העין על פי לאונרדו שבקַמֶרָה אוּבסקוּרָה ועדשה כדורית יוצרות היפוך כפול של קרניים ודמות ישרה. העין המצוירת מדמה את מיקום הֶעָצָב האופטי. משמאל: רישום אנטומי של לאונרדו המתאר מעבר קרני האור דרך העין.

1



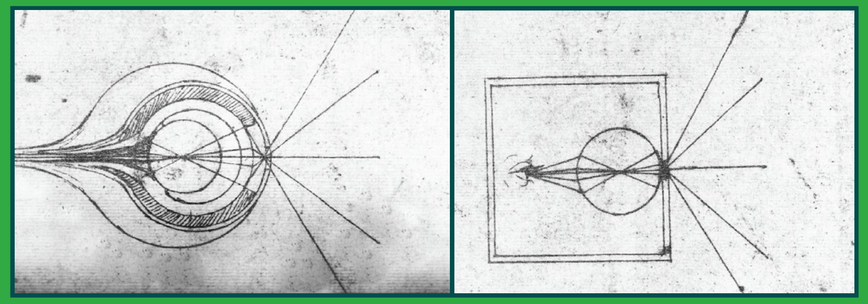

Paris D 3v

2



Paris D 3v

3

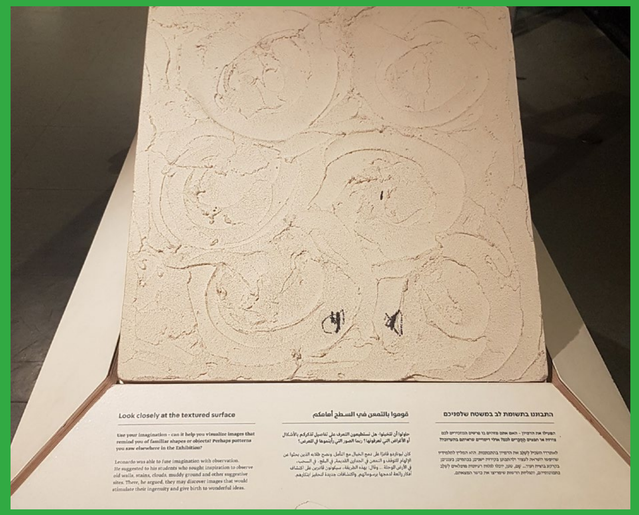


Atlanticus 921r

# איך לפתח את הדמיון?

מתבוננים בתשומת לב במשטח מטויח. מפעילים את הדמיון – האם אפשר לזהות בו פרטים המזכירים צורות או חפצים הַמֻּכָּרִים? אולי דימויים מהתערוכה?

לאונרדו השכיל לשלב את הדמיון בהתבוננות. הוא המליץ לתלמידיו שחיפשו השׂראה לעצור ולהתבונן בקירות ישנים; בכתמים; בעננים; בקרקע בוצית ועוד... שָׁם, טען, יוכלו לגלות רעיונות מופלאים לְשַׁלֵּב בתמונותיהם, ותגליות חדשות שימריצו את כושר המצאתם.



Windsor RCIN 912436

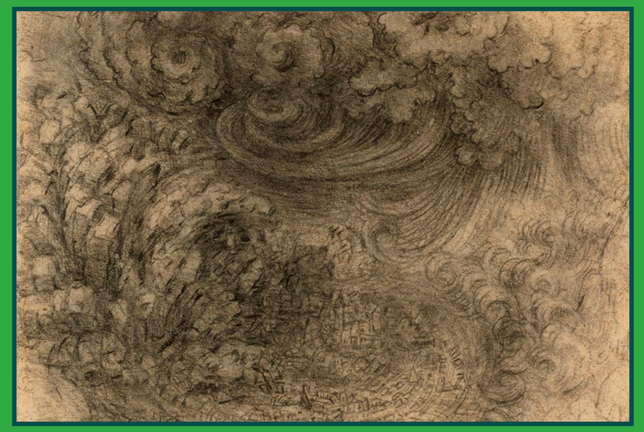
## איך לצייר מבול?

באוסף ווינדזור שבאנגליה, מצויים 11 איורים שלאונרדו צייר בערוב ימיו, המתארים סופות ושיטפונות בקנה מידה אפוקליפטי – כדוגמת המבול המקראי. ההנחה המקובלת היא, שהאיורים, המוצגים כאן בקרוב לגודלם המקורי ושצוירו בטכניקות שונות של גיר ודיו, הן עבודות אישיות שלאונרדו יצר עבור עצמו. רק חלק מהאיורים (איורים X-Y) מהווים סדרה, אך בכולם ניתן לזהות מוטיבים משותפים של מערבולות אוויר ומים, אבק והרס. למרות הדרמטיות של היצירות והאפשרות שהן משקפות איזושהי סערה פנימית של לאונרדו או חזיונות דימיוניים, איורים אלו מצטיינים בתכנון מפורט ונשענים על יכולתו של לאונרדו להתבונן בטבע ולתעדו.

3

Windsor RCIN 912382

2



Windsor RCIN 912378

1

Windsor RCIN 912385

6

Windsor RCIN 912384

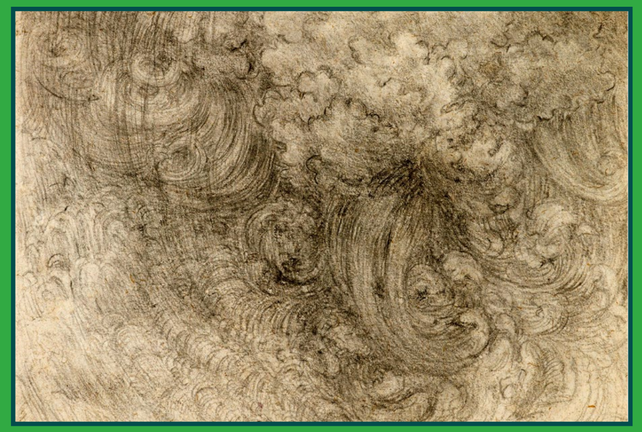
5

Windsor RCIN 912377

4

Windsor RCIN 912386

7



Windsor RCIN 912383

8

Windsor RCIN 912380

הטקסט בחלקו העליון של הרישום, בין
העננים הוא: "על הגשם. תעשה את העוצמות
השונות של הגשם הנופל במרחקים שונים
ובדרגות כהות שונות, כך שהחלק הכהה ביותר
יהיה הקרוב ביותר למחצית עוביו ["אמצעו"]".

9

Windsor RCIN 912379

10

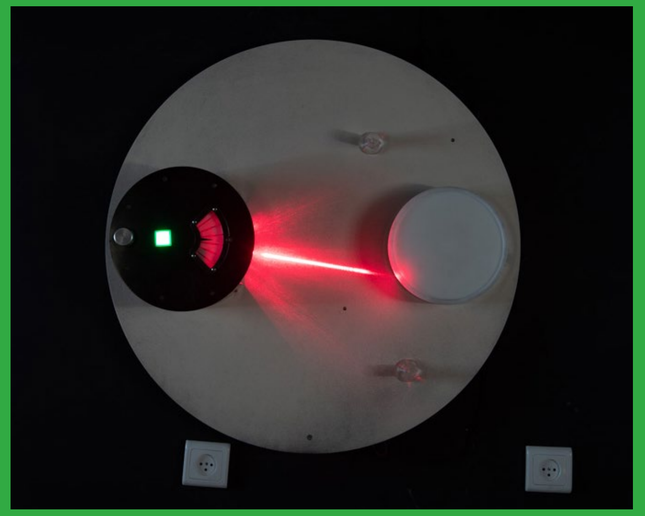
Windsor RCIN 912381

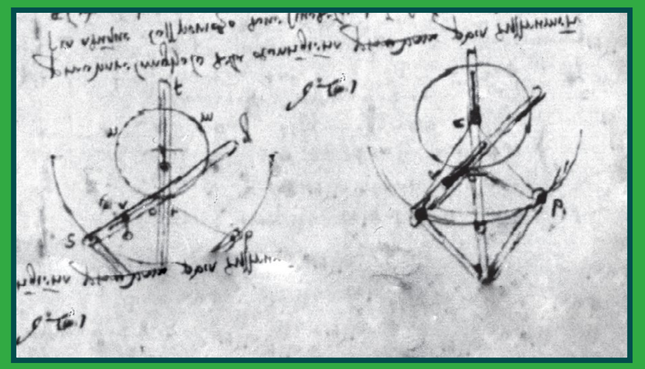
# היכן יפגע האור?

להיכן יש לכוון את האור כך שההחזר מהמראה יפגע באחד מארבעת הסמנים? מכוונים את האור האדום אל נקודה במראה עליה "מהמרים", ממתינים לאור בלחצן ולוחצים עליו.

האם האור הירוק אכן הגיע לסמן? למרות שהיא נראית פשוטה, בעיה זו, מתחום האופטיקה הגיאומטרית, העסיקה חוקרים רבים עוד מימי תַּלְמַי היווני (המאה השנייה לספירה). היא מְכֻנֶּה "בעיית אל-חזן" על שם אבן אל-היית'ם, הפילוסוף והמדען המוסלמי בן המאה העשירית שניסח אותה.

לאונרדו, שהוקסם מהבעיה, תכנן מכשיר המבוסס על מוטות וצירים (ראו איור) שיכל לשמש למציאת המיקום הנדרש לפגיעת האור על בהינתן קוטר המראה, מיקום מקור האור והמטרה.





Paris D 8r

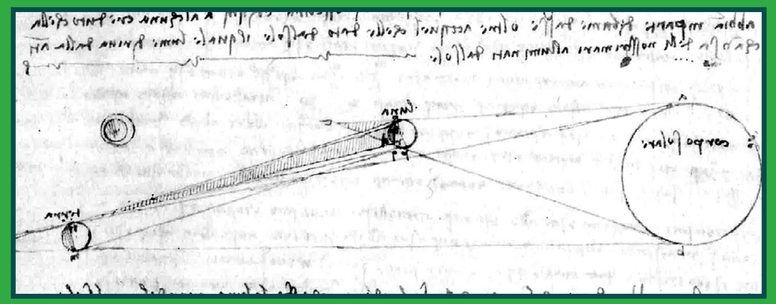
# לאונרדו והירח

לאונרדו התייחס לירח כאל "תְּאוֹמו" של כדור הארץ. הוא האמין כי הירח מורכב מאותם יסודות ושמתקיימים בו אותם חוקי טבע כמו בכדור הארץ. בכך דחה לאונרדו את תפיסת הקוסמולוגיה הקלאסית שראתה בירח כסְפֵרָה (sphere) מושלמת ואֶתֶרִית (עשויה אֶתֶר).

את השערותיו לגבי הירח כפי שהתגבשו במהלך חייו ביסס לאונרדו על תצפיות ארציות, ידיעותיו באופטיקה, פרספקטיבה ודדוקציה (איור 1). בגיל מאוחר כתב לאונרדו כי שאיפתו היא לִבְנוֹת מִשְׁקֶפֶת שתסייע לו להתבונן בצורה מיטבית בירח, אולם תוכנית זו לא יצאה ככל הנראה לפועל.

לאונרדו העלה השערות מקוריות, גם אם מוטעות, בנוגע לקשר שבין מבנה הירח להחזר אור השמש ממנו. הוא דחה את התפיסה העתיקה של ירח בעל פני שטח חלקים המחזירים את אור השמש. לאונרדו טען שאילו זה היה המקרה, הייתה מופיעה על הירח דמותה של השמש כפי שקורה בכדורי מתכת חלקים ומלוטשים. בכדורים מסוג זה, כפי שהכיר, נשקפת דמותו של מקור האור הַמְּכֻוָּן אליהם.

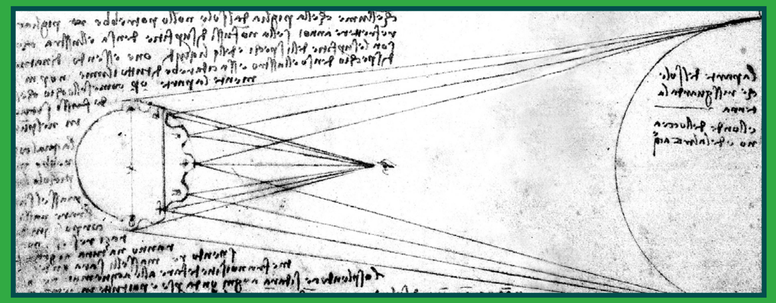
1



Leicester 2r

תלות טריאנגולציה של שמש, ירח, כדור הארץ

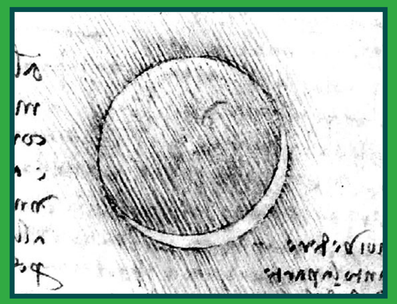
2



Leicester 1r

"הירח הַגַּלִּי" דמוי פרי הפטל

3



Leicester 2r

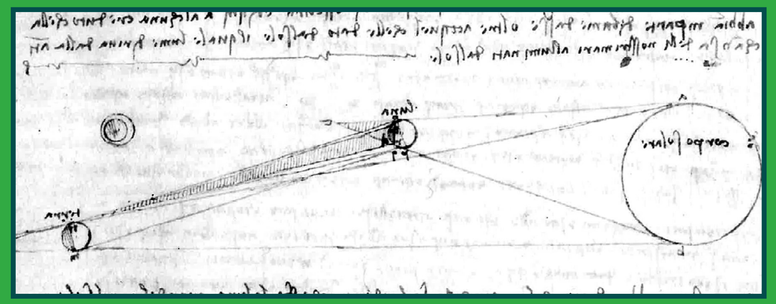
איורו של לאונרדו לתופעת "הָאֲרַת הארץ" שבו החזר אור שמש מכדור הארץ (מאיר) מעט את חלקו של הירח שאינו מואר ישירות על ידי השמש

לאונרדו, שהניח בשגגה כי החזר האור מהירח נובע מכך שיש עליו מִקְווֵי מים, הסיק כי כדי שאור השמש המוחזר מהירח יתפזר, על המים שעל הירח להיות גליים (איור 2). כמו כן, הניח לאונרדו שהאזורים הכהים על הירח הם גושי יבשה. שילוב זה של מים גליים ואיים יבשתיים הִקְנהָ לירח, על פי דימויו יוצא הדופן של לאונרדו, תבליט הדומה לפרי הפטל אשר מורכב מגרגירים רבים (ראו דגם). במציאות, כפי שאנו יודעים היום, החלקים הבהירים של הירח הם רמות מוגבהות, והחלקים הכהים הם מישורי בזלת.

חלק מהשערותיו הייחודיות של לאונרדו על אודות הירח התבררו כנכונות. הוא היה כנראה הראשון שתיאר והסביר את תופעת הֶאָרַת הארץ "Earthshine" שבה אור שמש המוחזר מכדור הארץ מאיר חלקית את האזור בירח שאינו גלוי לשמש (איור 3) . תופעה זו בולטת במיוחד לפני מולַדַ הירח או לאחריו.

לאונרדו גם צפה שכפי שהירח נגלה לנו מואר מכדור הארץ, כך מי שיעמוד על הירח יזכה לראות את כדור הארץ מואר ברקיע. עדותם וצילומיהם של האסטרונאוטים מתוכנית "אפולו" איששו השערה זו.

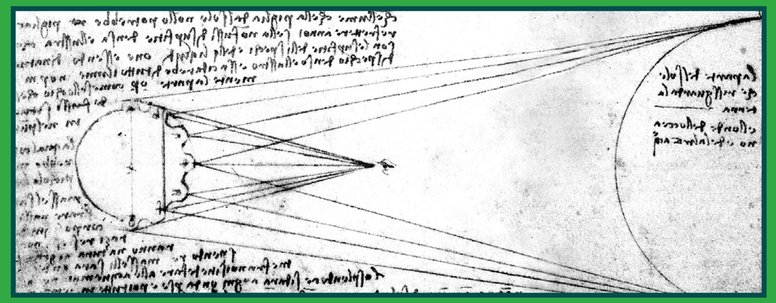
1



Leicester 2r

תלות טריאנגולציה של שמש ירח כדור הארץ

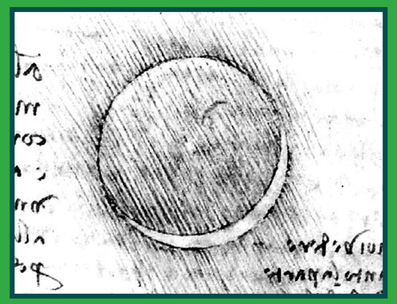
2



Leicester 1r

"הירח הַגַלִי" דמוי פרי הפטל

3



Leicester 2r

איורו של לאונרדו לתופעת "הֶאָרַת הארץ" שבו החזר אור שמש מכדור הארץ (מאיר) מעט את חלקו של הירח שאינו מואר ישירות על ידי השמש

# ציר זמן - חייו של לאונרדו

[1452] וינצ'י | *Vinci* | פֵינְשִׁי

[1464] פִּירֶנְצֶה | *Florence* | פלורנסה

[1482] מִילָנוֹ | *Milan* | מילאנו

[1500] פִּירֶנְצֶה | *Florence* | פלורנסה

[1506] מִילָנוֹ | *Milan* | מילאנו

[1513] רוֹמָא | *Rome* | רומא

[1516] צָרְפַת | *France* | צרפת

[...1519]

# ציר זמן - חייו של לאונרדו

### 1 התחלה וזיכרון ילדות ראשון

לאונרדו נולד בעיירה וינצ'י שבטוסקנה ב-15 לאפריל 1452, לפיירו דה וינצ'י וקתרינה ליפי. לאונרדו נזכר בכתביו, שכשהיה תינוק נחתה ציפור על עריסתו ופתחה את פיו בזנבה. זיכרון זה היווה ללאונרדו אות וסימן לעיסוקו הנרחב בציפורים ותעופה.

### 2 זיכרון ילדות שני ורמז לסקרנות

בילדותו נהג לאונרדו לשוטט לבדו בטבע שסביב וינצ'י בה גדל. בכתביו הוא מתאר שבאחד משיטוטיו הגיע לפתח מערה, ולמרות שחשש להיכנס לבדו למקום החשוך והלא מוכר, בזכות סקרנותו , אזר אומץ להיכנס ולבדוק מה צפון בה. בתוכה גילה מאובן של דג גדול.

### 3 מַעֲבָר לפִּירֶנְצֶה

בגיל 12 עבר לאונרדו לגור בפירנצה עם אביו פיירו שהיה נוטריון מכובד. כיוון שהוריו לא היו נשואים נמנעה מלאונרדו קבלה למוסדות חינוך מתקדמים, ובגיל 14 נהיה שׁוּלְיָה בבית המלאכה של אנדראה דל וורוקיו. שם שָׁקַד על כישוריו בתחומי הציור, ההנדסה ומלאכות נוספות.

### 4 אומן בבית המלאכה של וורוקיו

לבית המלאכה של אנדראה דל וורוקיו, כמו לבתי מלאכה אחרים בתקופת הרנסנס, היו יכולות טכניות מגוונות. במסגרת עבודתו בבית המלאכה השתתף לאונרדו בהתקנת כדור מתכתי מוזהב שמעטר עד היום את כיפת הקתדרלה בפירנצה. ההתקנה בשנת 1469 הייתה מאתגרת, שֶׁכֵּן היה צריך להרים את הכדור לגובה של יותר ממאה מטרים.

### 5 ציור "הבשׂורה"

בין השנים 1472-1475 צייר לאונרדו את "בשׂורת המלאך למרים", שהיה אחד הציורים הראשונים המיוחסים לו. כיום מוצג הציור בגלריה אוּפִיצִי שבפירנצה. מידותיהם של אלמנטים מסוימים בציור מותאמות להתבוננות מנקודת מבט מסוימת (מצד ימין) כפי שניתן ללמוד במוצג "למה האף גדול?".

### 6 "ציור נוף"

ב-5 באוגוסט 1473 סיים לאונרדו רישום דיו של נוף טוסקני בסביבת נהר האַרְנוֹ שלידו גדל. העתק גדול ממדים של הרישום, עם הסבר מפורט לגביו, מצוי בתערוכה באזור "אנלוגיות בטבע".

# ציר זמן - חייו של לאונרדו

### 7 לאונרדו המוזיקאי

נוסף על כישוריו האחרים לאונרדו הצטיין כנגן Lirra da Braccio – כלי מיתר הדומה מעט לכינור של ימינו. הוא אף תכנן ובנה לעצמו גרסאות מיוחדות של כלי נגינה זה. בזכות כישוריו המוזיקליים הגיע לאונרדו למילאנו ב-1482 עם משלחת מפירנצה, ונהיה חלק מחצרו של דוכס מילאנו, לודביקו ספוֹרצָה.

### 8 השלמת השכלה

בתקופתו במילאנו החל לאונרדו להשלים את השכלתו הכללית וידיעותיו, התחיל ללמוד לטינית וקרא טקסטים "קלאסיים" מהעת העתיקה. במהלך חייו נעזר לאונרדו במורים מומחים מהם למד ואיתם שיתף פעולה, וגיבש ספרייה מרשימה של יותר מ-100 ספרים בנושאים מגוונים.

### 9 מכונות מעופפות

בשנותיו במילאנו עסק לאונרדו רבות בתכנון מכונות מעופפות שהתבססו על צפיותיו בציפורים ונסמכו על כישוריו ההנדסיים. איננו יודעים אם לאונרדו אכן ערך ניסוי ממשי כלשהו בתחום תעופת האדם.

### 10 תכנון פסל סוס ענק (1489-1494)

בשנת 1493 הציג לאונרדו דגם חימר בגודל מלא (כ-7 מטרים) של פסל שיועד לזיכרו של פרנצ'סקו ספורצה, אביו של דוכס מילאן. הפסל הסופי, מארד, מעולם לא נוצק עקב פלישת צרפת לדוכסות. משקולת ראש הסוס שמאחוריכם מבוססת על רישום של לאונרדו לקראת יציקת פסל הארד.

### 11 רישום "האדם הוויטרובי" (1492)

ויטרוביוס, האדריכל הרומאי, טען שאדם בעל פרופורציות מושלמות אפשר לשרטט בו בזמן בתוך מעגל שמרכזו יושב על טבורו של האדם, ובתוך ריבוע. לאונרדו פתר את החידה הקדומה בכך שהוסיף זוג ידיים וזוג רגליים הַמְּשַׁקְּפִים את תפיסתו של האדם כיצור דינמי ומלא חיוּת.

### 12 איורים ל"פרופורציה האלוהית" (1496-1498)

ב-1496 הגיע למילאנו הנזיר הפרנציסקני והמתמטיקאי הידוע לוּקה פצ'יולי. הוא ולאונרדו התחברו, ולאונרדו אייר את ספרו של פצ'יולי "הפרופורציה האלוהית", לרבוּת סדרה מפורסמת של איורי פְּאוֹנִים משוכללים. ההיכרות בין השניים הובילה את לאונרדו להתעמק בגיאומטריה, אותה חָקַר כל חייו.

# ציר זמן - חייו של לאונרדו

### 13 קודקס מדריד

הַמַּחְבָּרוֹת הַמְּכֻנּוֹת כיום קודקס מדריד I וקודקס מדריד II, אותן החל לאונרדו בתקופתו במילאנו, התמקדו בחֵקֶר רכיבים מכאניים בסיסיים ואיור מנגנונים חדשניים.

### 14 "הסעודה האחרונה"

בין השנים 1495-1498 צייר לאונרדו בחדר האוכל במנזר שבמילאנו את סצינת "הסעודה האחרונה" המפורסמת. ציור הקיר הוזמן על-ידי הדוכס ספורצה, אשר גילה חוסר סבלנות נוכח איטיות מלאכתו של לאונרדו. קסמו של הציור נובע משימוש חכם בחוקי הפרספקטיבה, ומאופן הצבת הדמויות עם מחוות מותאמות לאופי של כל אחת מהן.

### 15 "מהנדס צבאי" (חורף 1502 - 1503)

כמחווה של שלטונות פירנצה נשלח לאונרדו לסייע, כמהנדס צבאי, לסזאר בורג'יה הערמומי והאכזר שעמד בראש צבאות האפיפיור במסעות הכיבוש שלו. לאונרדו תכנן עבורו בין השאר גשר מאולתר מקורות עץ.

### 16 לאונרדו ומקיאוולי

בזמן ששירת את סזאר בורג'יה (חורף 1502 - 1503), לאונרדו שיתף פעולה עם המדינאי והסופר המפורסם ניקולו מקיאוולי שהתלווה גם הוא לבורג'יה כנציג העיר פירנצה. בין השאר תכננו השניים להטות את נהר הארנו סביב העיר פיזה, יריבתה של פירנצה.

### 17 ה"מונה ליזה"

במהלך 1504 התחיל לאונרדו לצייר את ה"מונה ליזה", פורטרט של ליזה ג'ררדיני, אישתו של פרנצ'סקו דל ג'וקונדו, סוחר בדים מפירנצה. לאונרדו המשיך לעבוד על ציור זה עד ערוב ימיו.

### 18 לאונרדו ומיכאלאנג'לו (1504)

בפירנצה, הוזמנו לאונרדו ומיכאלאנג'לו, שהיה צעיר ממנו ב-20 שנה, לצייר שני קרבות מתולדות העיר. הציורים לא שרדו, אבל עותקים מהם מציגים את הבדלי הסגנונות בין שני האומנים. לאונרדו גם היה שותף בדיון שעסק במיקום פְּסָלוֹ המפורסם של מיכאלאנג'לו – דָּוִד.

# ציר זמן - חייו של לאונרדו

### 19 הקודקס על תעופת ציפורים

חוסר היציבות הפוליטית במילאנו הניע את לאונרדו לחזור לפירנצה בשנת 1500. בין השנים 1503-1506 חיבר לאונרדו קודקס המתאר את תובנותיו בנושא תעופת הציפורים ותכנון של רכיבים לבניית מכונה מעופפת.

### 20 קודקס לסטר

בעשור הראשון של המאה ה-16 (1502-1508) חיבר לאונרדו קודקס קצר הַמֻכָּר כיום כקודקס לסטר. קודקס זה מתמקד בזרימת מים וגיאולוגיה, ואף בהשערותיו של לאונרדו בנוגע לאור הירח!

### 21 אריה מכאני ראשון (1509)

ממקורות מתקופתו של לאונרדו ואחריה אנו למדים שלאונרדו תכנן וגם בנה במרוצת השנים שלושה אריות מכאניים שונים לכבוד מופעים חגיגיים. לצערנו, רישומיו של לאונרדו לאריות לא שרדו. האריה הראשון נבנה לכבוד כניסתו של המלך הצרפתי לואי ה-XII לעיר מילאנו, אליה שב לאונרדו ב-1506.

### 22 מחקרים אנטומיים מאוחרים

לאונרדו חזר וחקר אנטומיה בכלל, ואת האנטומיה האנושית בפרט, בתקופות שונות בחייו. בין השנים 1508-1513 הגיע לאונרדו להישגיו הגדולים ביותר בתחום זה, במיוחד בחֵקֶר הלב.

### 23 "מראות ומתחים" (1514-1515)

בתקופתו ברומא, כששירת את ג'וליאנו דה מדיצ'י, אחיו של האפיפיור ליאו ה-X, חקר לאונרדו את האופטיקה של מראות וטכניקות של ייצורן. כתביו מאותה תקופה מְסַפְּרִים על מתיחות וסכסוכים בינו ובין אחד מעוזריו, וכן בינו ובין בונה מראות מתחרה בשם Giovanni degli Specchi.

### 24 מכונת ליטוש מראות

בתקופתו ברומא תכנן לאונרדו מכונות שונות ללטוש מראות קעורות. מראות אלו, היכולות לרכז אור וחום בנקודה מסוימת, עניינו את לאונרדו שקיווה להשתמש בהם כמנגנון חימום לשימושים תעשייתיים וצבאיים.

# ציר זמן - חייו של לאונרדו

### 25 אריה מכני שני

ב1515 בנה לאונרדו אריה מכני שני, עבור קבלת פנים שהעיר ליון ערכה למלך צרפת החדש פרנסואה ה I. על פי עדויות, ה"אריה" הילך, התיישב ובפתח בחזה שלו הופיעו פרחים. באותה שנה הציע פרנסואה ללאונרדו קצבה נדיבה לעבור לצרפת ולשמש כיועצו.

### 26 ציורי ה"מבול"

בקיץ 1516 חצו לאונרדו ומלוויו את הרי האלפים כדי להיענות להזמנתו של מלך צרפת, פרנסואה ה-I, להצטרף לחצרו. בצרפת יצר לאונרדו סדרת רישומים של שיטפונות בקנה מידה אפוקליפטי. במוצג "איך לצייר מבול?" ניתן להביט ברישומים אלה מקרוב.

### 27 פטרוֹן אחרון

פטרונו האחרון של לאונרדו, פרנסואה ה-I, שיכן אותו ב-Châteaux de Cloux שבסמוך לארמונו ב-Amboise שבעמק הלואר. את שנותיו האחרונות העביר לאונרדו יחד עם בני לווייתו בנוֹחוּת רבה הודות לנדיבותו של פרנסואה שהעריך מאוד את ידיעותיו וכישוריו של לאונרדו.

### 28 ממשיך לשאול

למרות שבריאותו הלכה והידרדרה לא חדל לאונרדו לחקור וללמוד, גם בשנותיו האחרונות. בתחתיתו של מה שהוא אולי אחד מדפי מחברתו האחרונים, שבו חקר את שטחו של משולש ישר זווית, מופיע המשפט "בגלל שהמרק מתקרר" בו מסביר לאונרדו מדוע עליו לקום וללכת...

### 29 מחברות אבודות

לאונרדו הוריש את כתביו לתלמידו פרנצ'סקו מלצי. אחרי מותו של לאונרדו ב-2 באפריל 1519, שב מלצי עם מחברותיו של לאונרדו לאיטליה, שָׁם שמר עליהן אך לא פרסם אותן. כשמלצי עצמו נפטר ב-1570 הוא הוריש את המחברות לבנו, שלא הכיר בערכן. הבן חילק את המחברות ומכר אותן, כך שהתפזרו ברחבי אירופה.

# התיאטרון של לאונרדו

## האם זה ימריא?

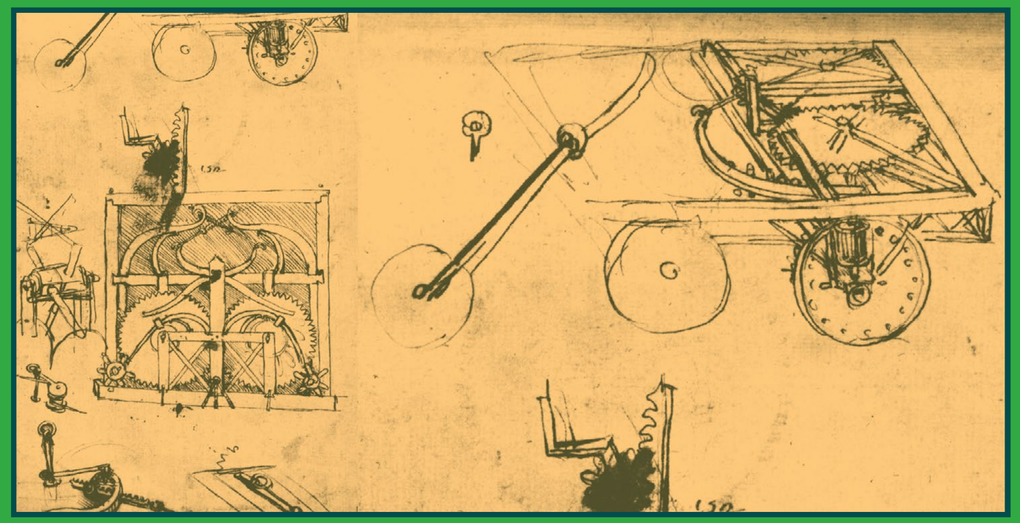
מְמַדָּיו של "בורג האוויר" שבתאטרון לאונרדו הם מעט יותר ממחצית המידות שאותן ציין לאונרדו בטקסט הנלווה לאיורו המפורסם. לאונרדו השתעשע ברעיון ש"תבריג גדול' הבנוי במידות "הנכונות" ומהחומרים הנכונים יוכל בסיבובו "לחדור את האוויר" ולהתרומם מַעְלָה. לאונרדו אף הציע לִבְנוֹת דגם קטן מנייר שיוּנע בקפיץ כדי לבדוק את הִתָּכְנות הרעיון. ייתכן שקיבל השׂראה לרעיון מעלי מייפל שנחיתתם מואטת כתוצאה מסיבוב, מצעצועי ילדים עם מדחפים שהיו קיימים באותה תקופה או פשוט מהצורה שבּה בורג מתקדם עם סיבובו בחומר בעל התנגדות מַסְפֶּקֶת. בכל מקרה, איורו של לאונרדו לא מעיד מה אמור להיות הכוח המניע שיגרום לסיבוב הַמִּתְקָן, והמתקן ודאי כבד מדי כדי להמריא. אין עדות לכך שבורג האוויר קָרַם עור וגידים (או עץ ובד...), וישנם חוקרים הסבורים שלאונרדו ייעד אותו כתפאורה ייחודית לאחד מהמופעים שתכנן. לכן הצבנו אותו אנחנו ב"תיאטרון לאונרדו".

Paris B 83 V

# איך להניע עגלה?

בקודקס אטלנטיקוס שבספריית אמבּרוֹזיאנה במילאנו מופיע איור של לאונרדו לעגלה מֶכָנִית. לאיור לא נלווים דברי הסבר, והַנחָת החוקרים היא שמדובר בסקיצה לאביזר תפאורה בעל מערכת הנעה עצמית שתוכנן להשתלב במופע תיאטרלי.

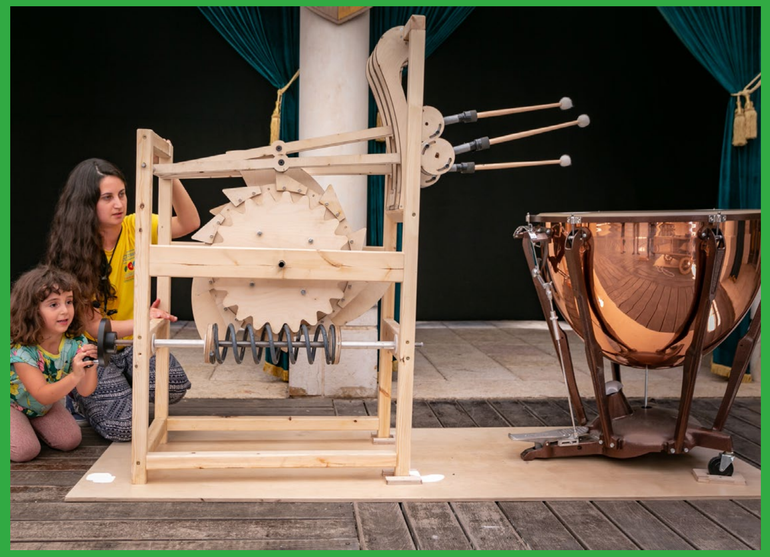
האיור מעיד על כך שלאונרדו השכיל לְשַׁלֵּב מערכות מכניוֹת שונות דוגמת קפיצים, גלגלי שיניים ומעצורים במכלול מכני אחד, אולם הוא אינו מהווה תכנון מפורט לייצור. מוזיאונים שונים בעולם מציגים דגמים המבוססים על איור זה של לאונרדו, אך העגלה המוצגת, שעוצבה ונבנתה כאן במוזיאון, היא מהיחידוֹת שאכן נוסעות בעצמן!

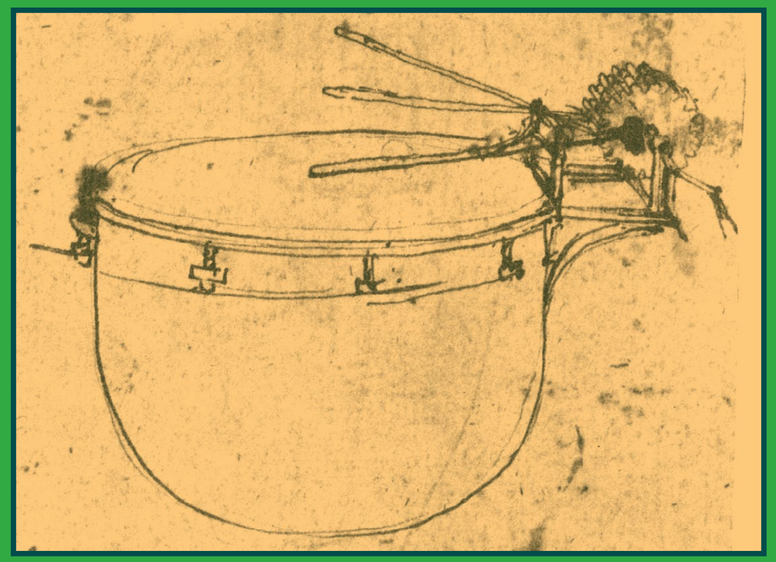


Atlanticus 812r

## איך למכן תיפוף?

לאונרדו התעניין מאוד בתכנון תופים ומערכות תופים. באיורים שונים בכתביו הציע ארגון של תופים בגדלים שונים על מנת ליצור סולמות ובאחרים שיטות למתיחה יעילה של עור התוף או באפשרות לייצר צלילים שונים מאותו תוף. כמו כן, תכנן לאונרדו מספר מנגנונים מכאניים לתיפוף. במכונת התיפוף שבנינו בהשראתו של לאונרדו, קפיץ, המתפקד כבורג חלזוני, מסובב מערך של גלגל שיניים ו 3 דיסקיות עם בליטות בחתכים שונים היוצרים, יחד עם תוף הטימפני הצמוד, מעין מקצב המשתנה בהתאם למהירות סיבוב גלגל השיניים.





Codex Atlanticus 355

# קרדיטים

אוצר משותף: דמאון פישר שוסטרמן

אוצר משותף ומפתח מוצגים: ד"ר אמיר בן שלום

מנהל הצוות הטכני: אורי סיני

מעצב המוצגים האינטראקטיביים: איל פוגל

מעצב התערוכה: פרופ' חנן דה לנגה

מעצב גראפי ראשי: עידן ועקנין

צילום התערוכה: יעל אילן ועידן ועקנין

מעצבת גרפית: נועה בלוך

עריכת וידאו: נעמה מרינברג

אנימציה: יואב לב ארי ועובדיה בנישו

ליווי מוזיקלי לאנימציה: דרור שליט

סרט תעופת ציפורים: יובל דקס

פיתוח תוכנות: ארד אייזן ועידן קימל

תכנון, בניית מוצגים, בניה והפקה: צוות בית המלאכה של המוזיאון:
שמוליק אוליאל | ברוך אונגר | סאמר אסלה | רונן בן זאב
גנאדי למליאנוב | נועם מלמוד | דימיטרי פולנסקי | יעקב רוזנברג
דני שלם | אורי קאופמן

עוזרי פיתוח מוצגים: יוסי אנטקוליץ ומיכל רבינוביץ

תרגום מדעי: ד"ר יכין אונא

תרגום ועריכה לשונית: רוני בן חורין-ברוק, שרי רובין, ערין עוואוודיה
וחנה ג'ינטילי

מעצב התפאורה: זוהר שואף

אומנים: איתמר מנדס-פלור, נפתלי רדזינר והלל אביעזר

מנהלת פרויקט: רוני בן חיים

מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem

## יעוץ:

פרופ' ליובה פרידמן | החוג לתולדות האומנות האוניברסיטה העברית

ד"ר מני נוימן | הגן בוטני הר הצופים

פרופ' אהובה בלקין | הפקולטה לאומנויות, אוניברסיטת תל אביב

פרופ' זאב לוי | המכון הגיאולוגי לישראל

ד"ר יעל אדלמן - פרסטנברג | המכון הגיאולוגי לישראל

ד"ר יאיר בן חיים | המחלקה למדעי הטבע והחיים האוניברסיטה הפתוחה

פרופ' דן גילון | מרכז רפואי הדסה האוניברסיטה העברית

## יעוץ מוזיקלי:

פרופ' גבי שפלר | אמיר לביא | ריקה בר סלע


## תודות

מרינה שניידרמן ספריית הר הצופים למדעי הרוח והחברה ע"ש בלומפילד

המכון הגאולוגי לישראל

מכון מיו

פרופ' פול יאזו אוניברסיטת מיניסוטה

השגרירות האיטלקית בישראל

מכון איטליה לתרבות ישראל

תעבורה אחזקות בע"מ


מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem