

?

WHY
المباني

DON'T
تسقط

נופלים?
BUILDINGS
לماذا لا

לא
FALL

בניינים
DOWN?

למה

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים



למה בניינים לא נופלים

מרבית הבניינים מתוכננים לעמוד בתנאים הכרחיים של יציבות וחוזק. אולם, ישנם מצבים שבהם בניינים נופלים, למשל ברעידת אדמה. בעת התרחשות רעידת אדמה עובר גל הלם דרך קרום כדור הארץ ויוצר זעזועים במבנים שבאזור הרעידה. באזורים שבהם יש סיכויים רבים להתרחשות רעידות אדמה, כמו באזורנו מפאת השבר הסורי-אפריקני, קיימים תקני בנייה מיוחדים.

יציבות מבנית

יציבות מבנית היא תכונה גיאומטרית של המבנה, ותלויה בצורת המבנה ולא בסוג החומרים שמהם הוא בנוי. בעת תכנון בניין מובאים בחשבון העומסים המיוחדים שבהם יעמוד הבניין, בשקלול משתנים דוגמת מספר הקומות; השימוש המיועד; תנאי האקלים והרוח ותנאי הקרקע במקום.

מרכז כובד

כוח הכבידה של כדור הארץ הוא אחד הכוחות המייצבים את המבנה, אך בד בבד הוא עלול למוטט אותו. מקומו של מרכז הכובד משפיע על מידת היציבות: גוף שמרכז הכובד שלו חורג מחוץ לשטח הבסיס שעליו הוא נשען, יצא ממצב של שיווי משקל ויתהפך.

חוזק

חוזק הוא תכונה פיזיקלית של מבנה. ישנן דרגות שונות של חוזק. הדרישה לחוזק חלה על המכלול ועל כל חלק בנפרד, לפי תנאי העומס הצפויים.

לחוזק של מבנה יש מדדים תקינים – תקן בנייה. התקן מתיר תזוזה של המבנה כולו ושל כל אחד מחלקיו, אך התזוזה המותרת היא זעירה ביחס לגודל המבנה. למשל, לפי התקן לקיר של מבנה משרדים גבוה (כ־100 קומות) מותר לזוז בקצהו העליון 1.5 ס"מ בלבד.

מקדם ביטחון

בעת תכנון מבנה חשוב תמיד להביא בחשבון מקדם ביטחון, כלומר לתכנן את המבנה כך שיעמוד בעומס רב יותר מהצפוי.



מבנה בונים מחומר ויֵדֶע

משחר ימי התרבות הגדיר האדם חלל מוגן לעצמו, למשפחתו ולבעלי החיים שלו. בתחילה עשה זאת בניצול של חללים טבעיים, ובהמשך יישם את היֵדֶע שצבר לטובת שימוש בחומרים זמינים. במהלך השנים האדם למד לְעֵבֵד אלמנטים וחומרים, ולהשתמש בהם בצורה יעילה יותר.

כיום, בבניית מבנים משמש אותנו מגוון רחב של חומרים: אבן; בטון; עץ; פלדה; אלומיניום; פלסטיק ועוד.

גמישות (אלסטיות) של חומרים

גמישות היא היכולת של חומר לשנות את צורתו בעת הפעלת עומס עליו, שינוי שנעלם עם הפסקת הפעלת העומס. כל החומרים הם גמישים, והשאלה היא מהי מידת גמישותם – קרי מהו גבול השינוי שלא ייצור בהם עיוותים קבועים.

מידת החוזק של חומרים

חומרים מסוימים הם בעלי חוזק ועמידות במאמצי מתיחה, ואחרים במאמצי לחיצה. אבן, לדוגמה, עמידה בכוחות לחיצה. יריעת בד היא חומר עמיד בכוחות מתיחה, ותשנה את צורתה אם נפעיל עליה כוחות לחיצה. חוזק של חומר נמדד ביחידות של לחץ ומשקל ליחידת שטח. למשל, קילוגרם כוח לסמ"ר, או ניוטון למ"ר.

פיתוח חומרי בנייה על בסיס ידע ומחקר

פלדה היא סגסוגת מעשה ידי אדם. חוזקה הרב מאפשר לבנות ממנה מבנים גבוהים וגשרים ארוכים. מרכיבי הפלדה הם בעיקר ברזל ופחמן, ואיכותה נקבעת לפי היחס ביניהם. הוספת חומרים אחרים עשויה להקנות לפלדה תכונות נוספות כמו אל־חלד. בטון מזוין הוא שילוב של מוטות פלדה, העמידים בכוחות מתיחה, משולבים ביציקה של בטון, העמיד בכוחות לחיצה.

לראות את המאמץ

במוצג זה אנחנו עושים שימוש בחומרים פלסטיים בהם ניתן לראות את התפשטות המאמצים המכניים כאשר מתבוננים בהם דרך יריעת מקטב.

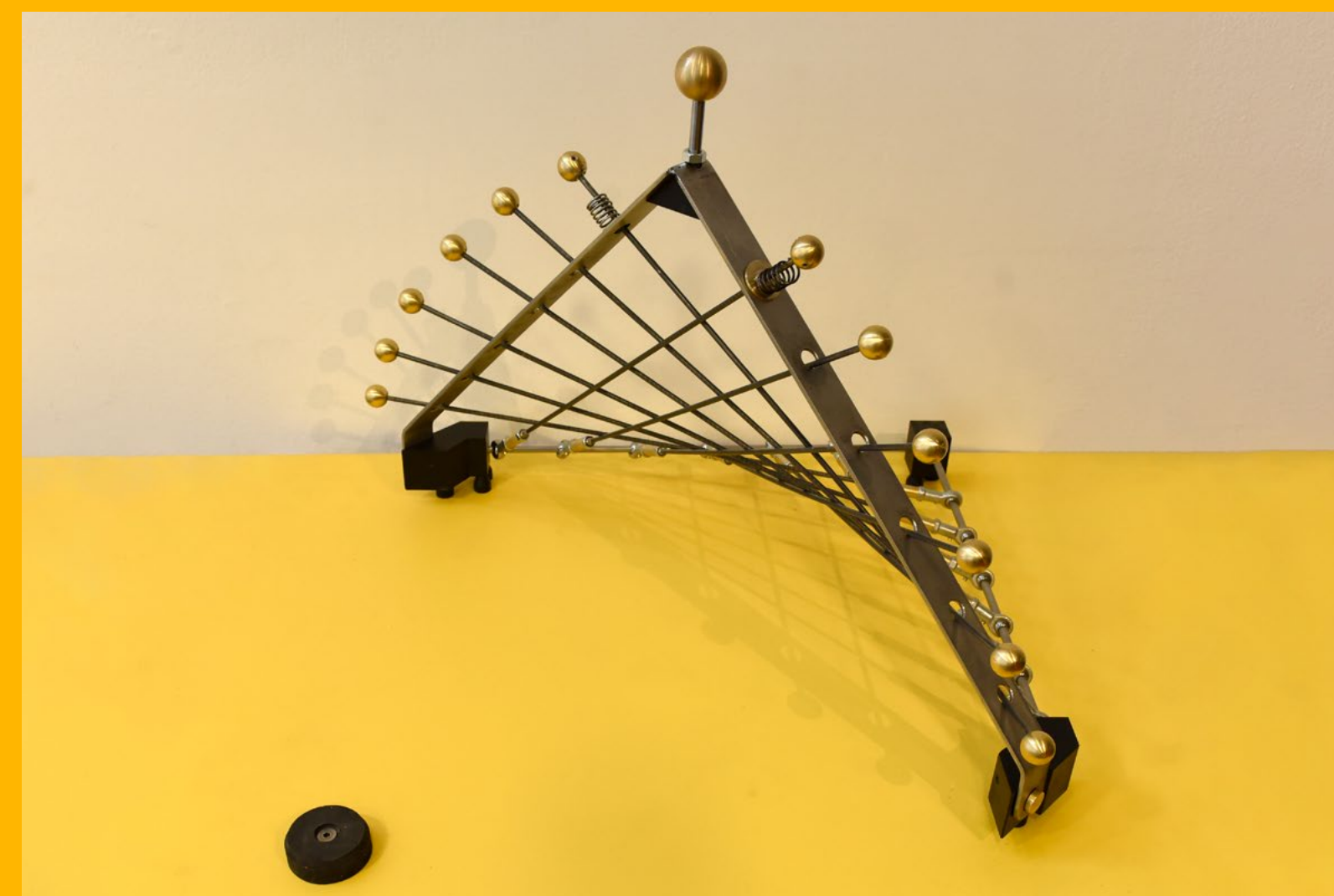
הפסים הצבעוניים המופיעים מסמנים את המקומות בחומר בהם נוצרים מאמצים מכניים. ככל שהפסים צפופים יותר – עוצמת המאמצים גדולה יותר. ככל שמתפתחים בחלק פחות מאמצים עמידותו גדולה יותר והסיכוי שישבר קטן יותר.

משתמשים בשיטה זו, המבוססת על סיבוב הקיטוב של האור, כדי לבחון את עמידותם של חלקי מכונות ומבנים בפני כוחות מכניים הפועלים עליהם.



עקום הוא קשיח – משטחים עקומים מקוים ישרים

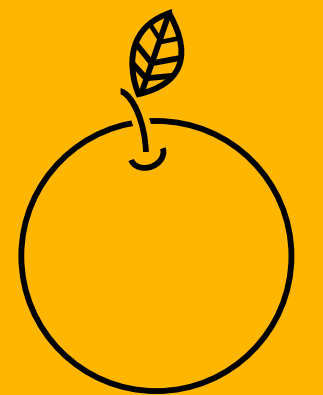
המתמטיקאי הגרמני קרל גאוס חלק את כל המשטחים העקומים ל-3 קבוצות: תואמי כיפה, תואמי גליל ותואמי אוכף. צורה גיאומטרית מרחבית מהסוג של תואמי אוכף היא היפרבולואיד פרבולי המכונה בקצרה – היפאר. צורה בעלת עקמומיות כפולה, בכיוון אחד החתכים שלה הם פרבולות ובכיוון השני - היפרבולות. מה שמפליא במיוחד הוא שהיא נוצרת מקוים ישרים בלבד. צורה זו חזקה במיוחד ולכן היא שימושית במבנים מרחביים קלים וגדולים.



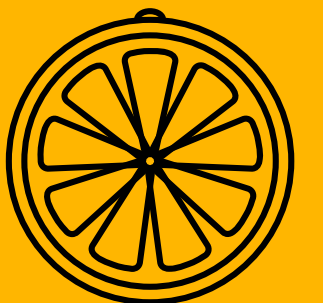
על תכנון מבנים

בתהליך התכנון האדריכלים והמהנדסים מתארים את המבנה באמצעות שפת התכנון – **שרטוט**.

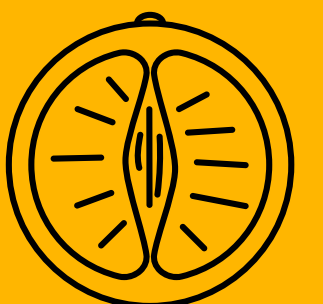
בשפה זו ישנם סימנים מוסכמים ודרכים מקובלות לביטוי:



חזית היא הצגת גוף/מבנה במבט מהצד.



תכנית היא הצגת גוף/מבנה חתוך באופן אופקי, במבט מלמעלה.



חֶתֶךְ הוא הצגת גוף/מבנה חתוך באופן אנכי, במבט מהצד.

שימוש בדגמים

אדריכלים ומתכנני ערים מְרַבֵּים להשתמש בדגמים (מודלים) כדי להמחיש ולהציג את המבנה בצורה תלת־ממדית, ולבדוק את התאמת גובה המבנה לסביבתו. הדגמים יכולים להיות הדִּמְיוֹת ממוחשבות, או דגמים פיזיים. גם מהנדסים משתמשים בדגמים ממוחשבים כדי לבדוק עמידות במצבי קיצון.

אינטואיציה היא תוצאה של תהליך המשלב הבנה וניסיון. אחת הדרכים לפתח אותה היא בהתמודדות עם אתגרים תוך התנסות בבנייה של דגמים, ובאיתור הכוחות הפועלים על חומרים.

היכרות עם כמה עקרונות מדעיים בסיסיים מאפשרת לפתח אינטואיציה ראשונית לפתרון בעיות יומיומיות: כיצד להעמיד סולם? מהו עובי החֶבֶל הנדרש כדי לשאת את משקל הדלי בִּבְאָר? כיצד להשתמש ביריעה, ביתדות ובחבלים כדי לבנות אוהל על שפת הים?

כנסיה גותית

צורת הקשתות בכנסיה גותית דומה מאד לצורה שמקבלת שרשרת התלויה בשני קצותיה – צורה הקרויה קשת קטנרית. ("קטנה" היא המילה הלטינית ל"שרשרת").

בשל הצורה הדומה של הקשת ושל השרשרת, אפשר לבנות מודל הפוך של מבנה קשתות ולהתבונן בו מבעד למראה. מתקבל מבט מלמעלה על "שלד" של כנסיה.



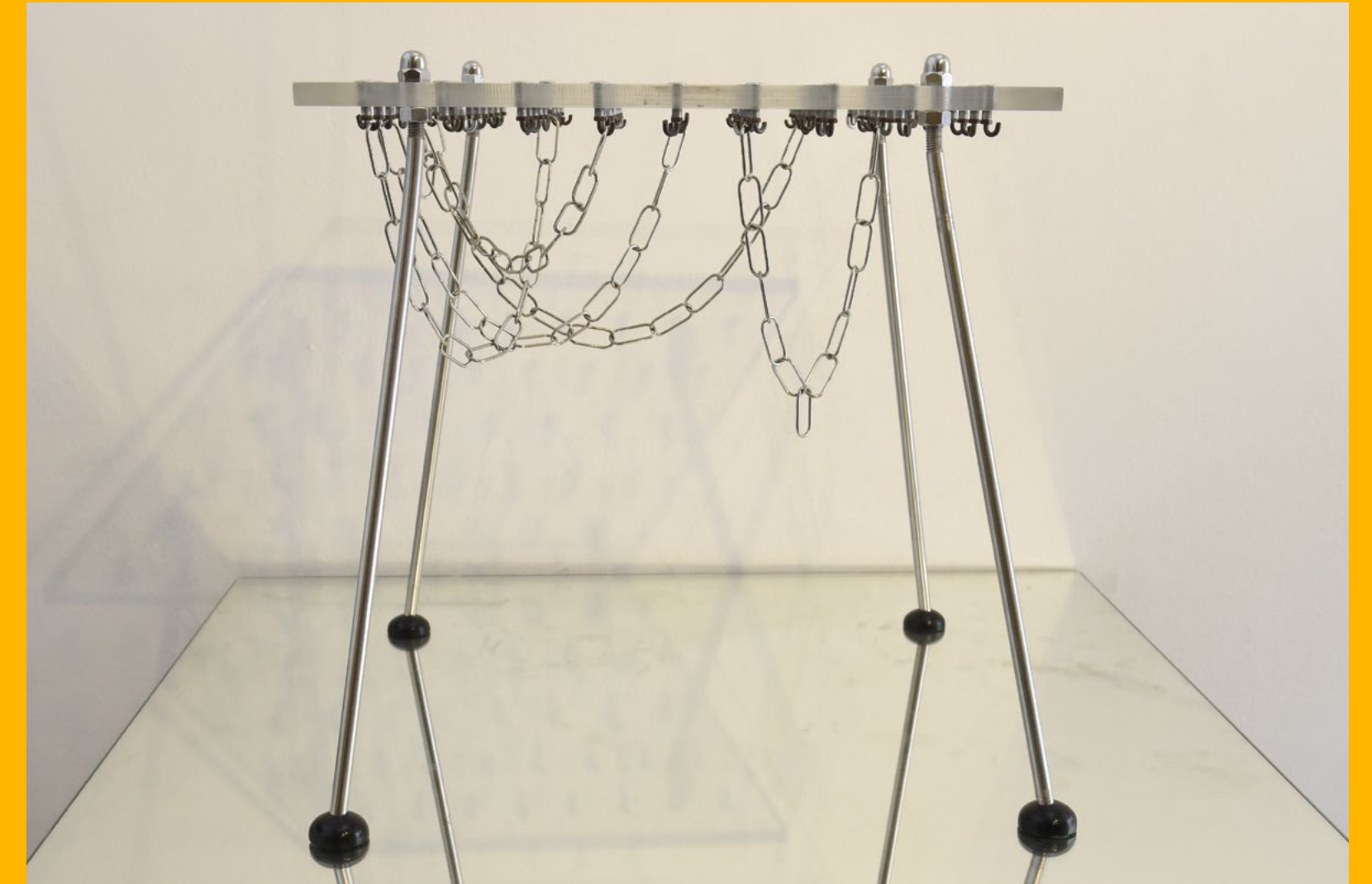
קשתות מרחפות

כנסיות בסגנון גותי מתקופת ימי הביניים הן בעלות מבנה גבוה ותמיר במיוחד. לאחר שמספר פעמים נפלו מבנים והתמוטטו בשל חוסר יציבותם, הוסיפו לקשתות הגבוהות קשתות תומכות הנקראות קשתות מרחפות. משקלן מאזן את הכוחות במבנה ומייצב אותו.



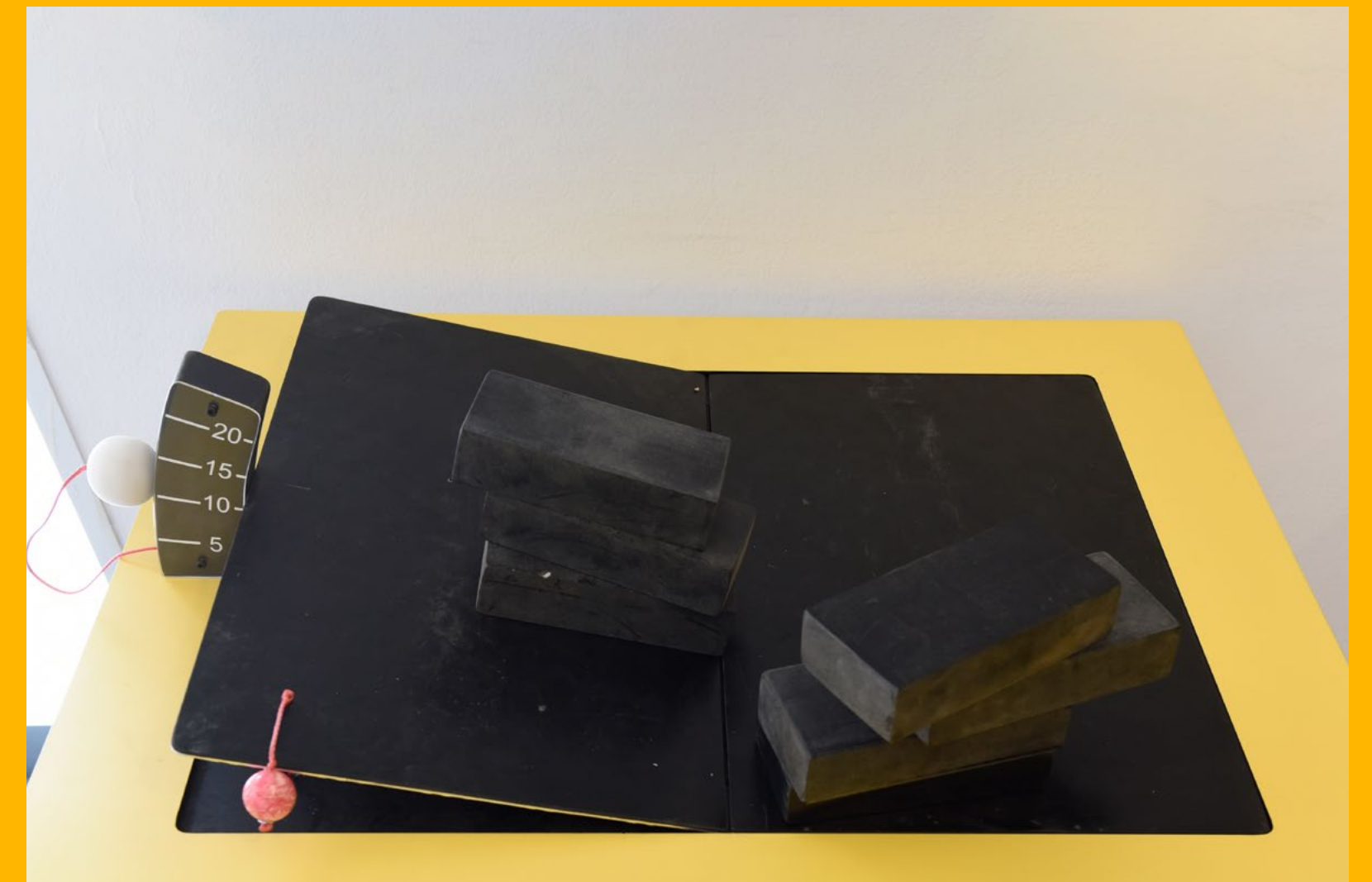
שרשראות וקשתות

כבלים ושרשרות הינם אלמנטים גמישים המקבלים את צורתם בהתאם לעומסים התלויים עליהם. שרשרת התלויה בשני קצותיה מקבלת צורה גיאומטרית של קשת קטנרית. משקולת התלויה במרכז השרשרת תיצור ממנה צורת משולש שווה שוקיים. מספר משקולות יצרו מצולע.



למה מגדל פיזה עדיין לא נפל?

הכל בגלל כוח הכובד. הוא אחד הכוחות המייצבים מבנים אך יכול גם לגרום להתמוטטותם. קו היורד במאונך ממרכז הכובד של המבנה צריך לעבור דרך בסיס המבנה, כדי שהמבנה לא יצא ממצב של שיווי משקל ויתהפך. במבנה נטוי ניתן להוסיף משקל בצד השני, לשנות את מיקומו של מרכז הכובד וליצב את המערכת. אם מרכז הכובד של מבנה נמצא עדיין מעל לבסיסו, כמו במקרה של מגדל פיזה – המבנה יציב.



על צורות יציבות

משולש הינו הצורה הסגורה המינימלית היציבה במישור. אי אפשר לשנות את צורת המשולש בלי למתוח לפחות צלע אחת שלו או לכווצה. כדי לקבל מבנה יציב ניתן לחלק צורה לרצף של משולשים או לחלופין לבנות צורות שונות בעזרת משולשים בלבד. כוורות בצורת משפחה הן דוגמה לכך.

כדור הוא הצורה בעלת שטח המעטפת הקטן ביותר ביחס לנפח הגוף. המינימליות והעקמומיות המאפיינים את הצורה הכדורית מקנים לה מבנה בעל קשיחות. לפיכך הצורה הכדורית מצויה בשימוש נרחב בטבע, החל בצורת הגולגולת האנושית, עבור בקליפות אגוזים, פירות וטיפות מים וכלה בצורת כדוריות הדם.

כיפה היא צורה עקמומית פתוחה אשר לה חלק מתכונותיו של הכדור, בתנאי שנגביל את אפשרותה להתפרש בעזרת טבעת המקיפה את בסיסה. שריונו של הצב הוא דוגמה נפלאה למבנה של בית-כיפה בטבע.

מכיפת השמיים עד לכיפות של מבנים

כיפה נוצרת על-ידי סיבוב של חלק מעיגול או של קו עקום אחר סביב צירו.

חוזקה של הכיפה נובע מצורתה – מצורת ארגון החומר. הכוחות המופעלים על הכיפה עוברים דרך החומר אל בסיסה – אל הקרקע. העומס הפועל על הכיפה גורם לה להימתח בהיקפה. כאשר מניחים טבעת סגורה מסביב לבסיס היא מאזנת את כוחות המתיחה ולכן הכיפה יציבה.



טנסגריטי

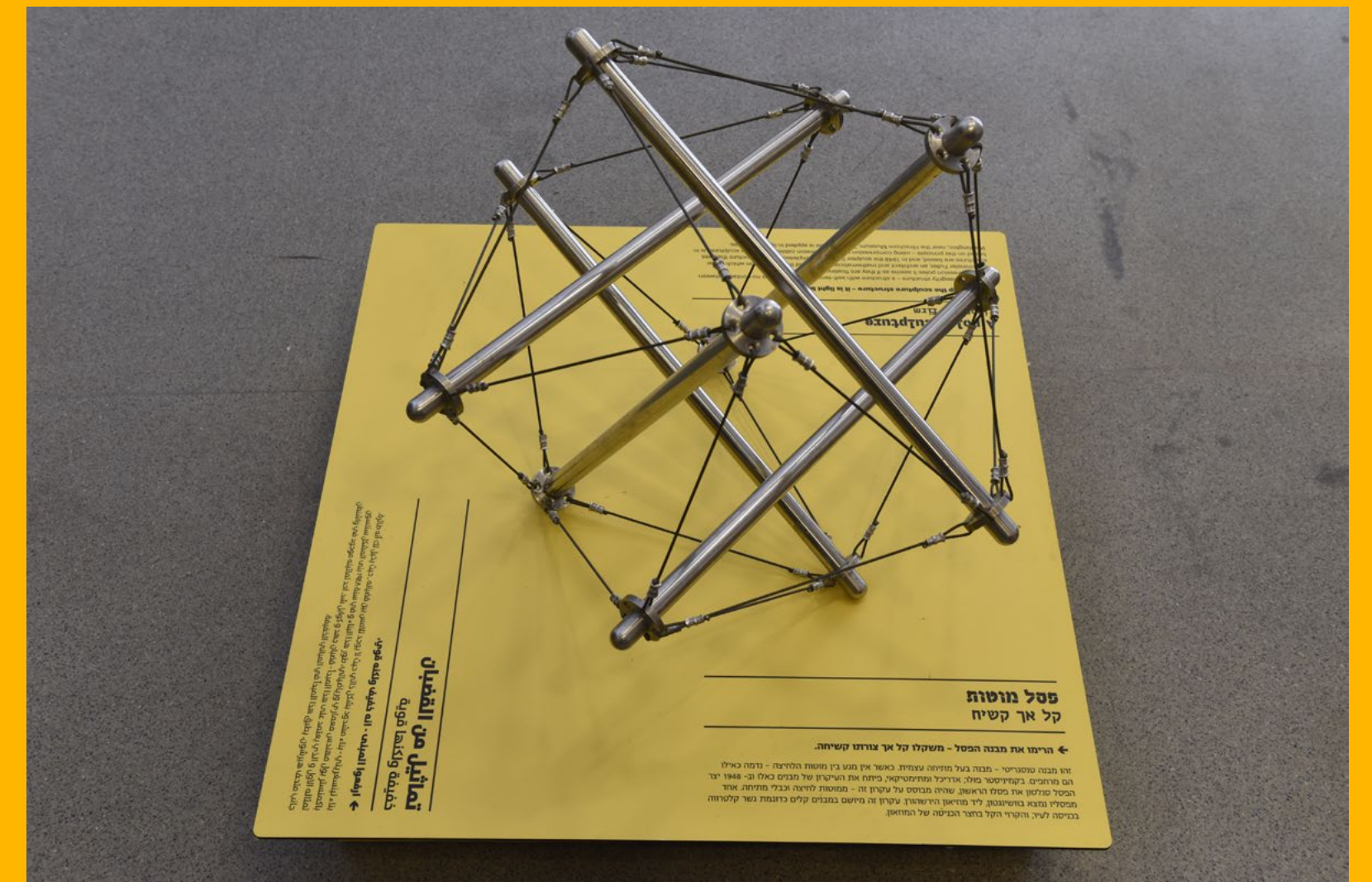
גם הקירוי הקל של חצר המוזיאון עשוי ממבנה טנסגריטי – מבנה המורכב ממוטות, כבלים וכמובן גם יריעת כיסוי. זהו מבנה קל ויציב העומד באופן עצמאי ואינו זקוק לחיבורים אל נקודות חיצוניות כדי ליצבו.

עקרון זה מצוי גם במבנה החישוק של גלגל אופניים. שתי מערכות החישורים (ה"שפיצים") נמצאות במתיחה כנגד חישוק חיצוני המצוי בלחיצה.



פסל מוטות קל אך קשיח

זהו מבנה טנסגריטי – מבנה בעל מתיחה עצמית. כאשר אין מגע בין מוטות הלחיצה – נדמה כאילו הם מרחפים בקמיניסטר פולה, אדריכל ומתמטיקאי, פיתח את העיקרון של מבנים כאלו וב-1948 יצר הפסל סנלסון את פסלו הראשון, שהיה מבוסס על עקרון זה – ממוטות לחיצה וכבלי מתיחה. אחד מפסליו נמצא בושינגטון, ליד מוזיאון הירשהורן. עקרון זה מיושם במבנים קלים כדוגמת גשר קלטרווה בכניסה לעיר, והקירוי הקל בחצר הכניסה של המוזיאון.



גשרים

גשרים נבנים בשלוש צורות בסיסיות: קוֹרָה, קשת ושרשרת (גשר תלוי). בתקופות קדומות פותחו טכניקות לבניית גשרים, כנראה מתוך התבוננות בתופעות טבע שונות: גזע עץ שנפל ואפשר לחצות נהר; צמחים מטפסים ושורשי עצים שיצרו גשרים תלויים טבעיים; מפולות אבנים שיצרו קשתות טבעיות.

סוגי גשרים

סוגי הגשרים השונים נבדלים זה מזה באופן שבו מועבר העומס אל נקודות הֶסְמָךְ ואל הקרקע:

- בגשרי קוֹרָה העומסים מְכַנְנִים בקצות הגשר ישירות למטה.
- בגשרי קשת העומסים מְכַנְנִים בקצות הגשר מטה וכלפי חוץ.
- בגשרים תלויים העומסים מְכַנְנִים בקצות הגשר מטה וכלפי פנים.

גשרי קוֹרָה

בגשרי קוֹרָה, הפעלת כוח על הקורה גורמת לכיפופה. ככל שהכפיפה גדולה יותר נוצרים בקורה כוחות מתיחה, כוחות לחיצה וכוחות גזירה גדולים יותר. בסביבתנו אפשר למצוא קורות בספסלים, בשולחנות, במדרגות ובמבנים רבים.

גשרי קשתות

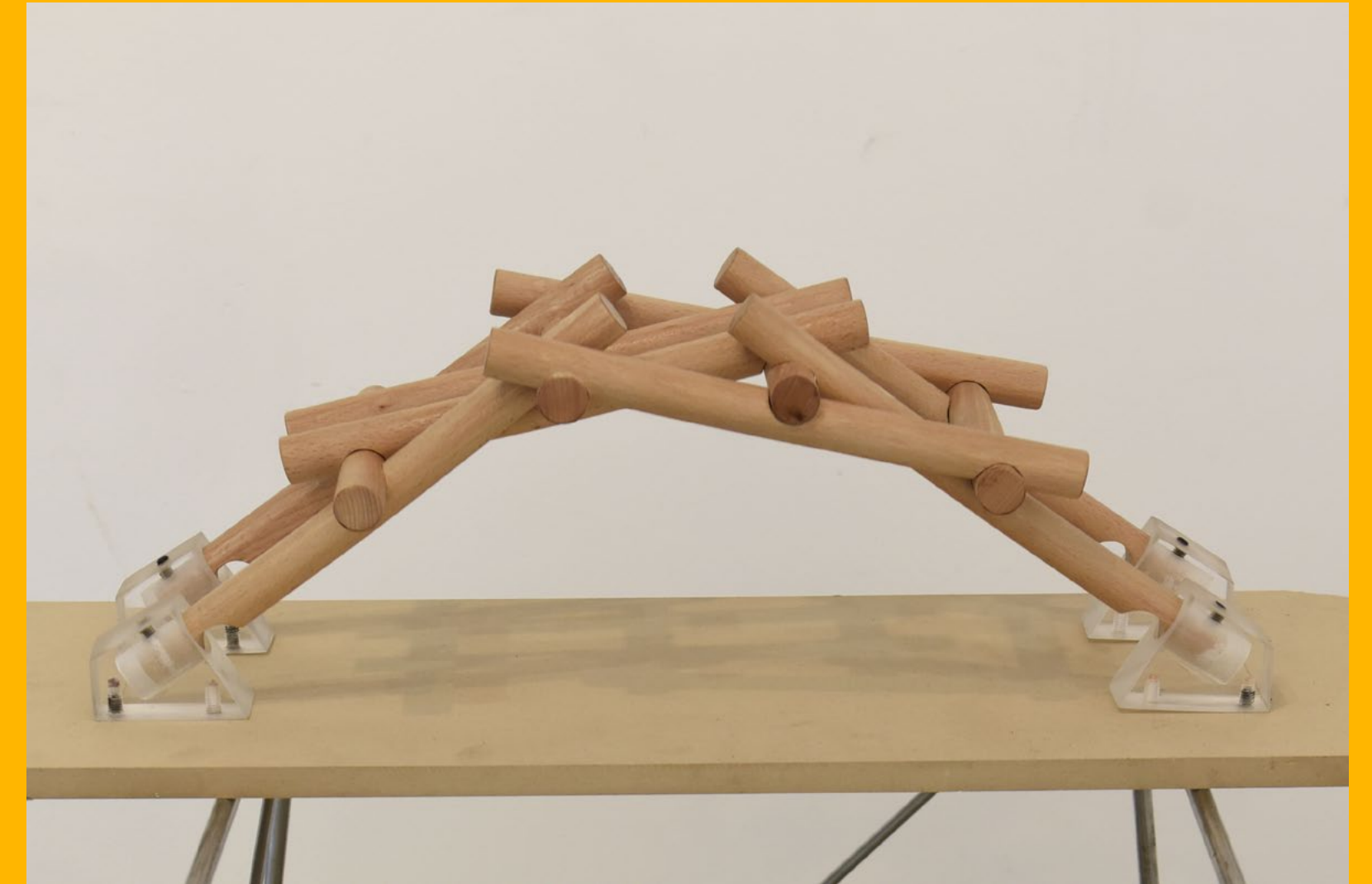
בגשרי קשתות נוצרים בעיקר כוחות לחיצה, לכן יש להשתמש בחומרים העמידים בפני כוחות מסוג זה כגון אבן. דוגמאות למבני קשתות אפשר למצוא במסגרות של חלונות; קשתות של כלי נגינה ועצמות שלד של בעלי חיים שונים.

גשרים תלויים

בגשרים תלויים נוצרים בעיקר כוחות מתיחה. גשרים אלה מצטיינים במשקל עצמי נמוך לעומת שאר סוגי הגשרים, וביעילות מבנית רבה. לפיכך הגשרים הארוכים בעולם הם גשרים תלויים. בטבע אפשר למצוא גשרים תלויים ברשת שטווה עכביש, ובסביבתנו הקרובה הם מצויים בחבלי כביסה ובערסל התלוי בין שני עצים.

גשר ליאונרדו

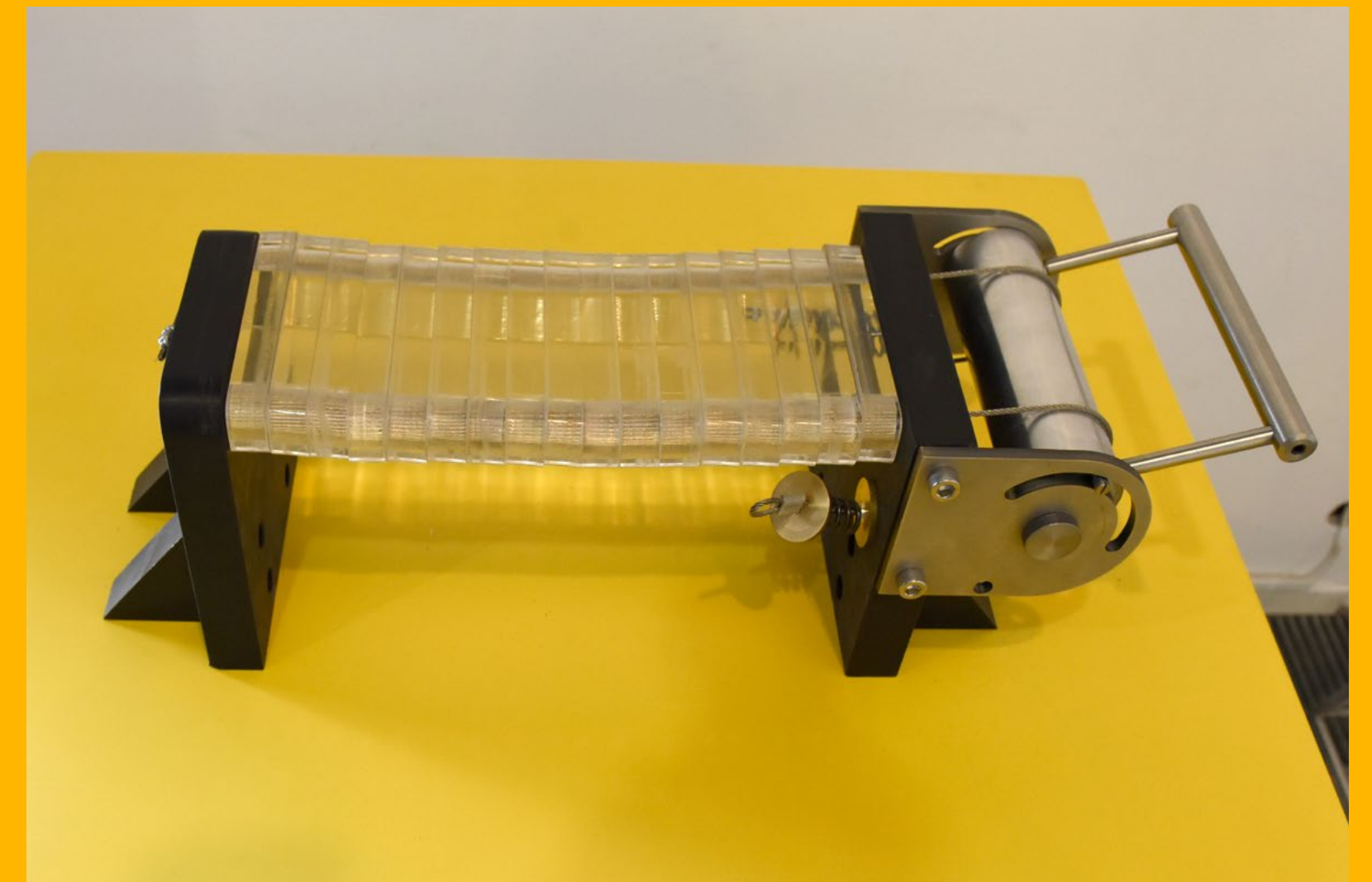
פתרון הנדסי לבעיה זו נתן ליאונרדו דה־וינצ'י (1452–1519). דה וינצ'י היה אחד הראשונים שעסקו בפתרון בעיות הנדסיות בכלל, ובתכנון של מבנים בפרט. הוא תכנן בין היתר גשר מחבר מִפְּרָה (PERA) לאיסטנבול, שאורכו היה 350 מ' והמיפתח בין העמודים שלו - 240 מ'.



קורה דרוכה

מתיחת כבלים מכונה "דריכה". על ידי מתיחת (דריכת) מוטות הברזל העוברים דרך הקורה יוצרים בה מאמץ המתנגד למאמץ הכפיפה של העומס. כך מחזקים את הקורה ומונעים ממנה לקרוס.

זהו העקרון בבסיסו של בטון מזויין. פיתוחו של הבטון המזויין הוביל למהפיכה בתחום שיטות הבנייה: שילוב מוטות הברזל (העמידים בכוחות מתיחה) בתוך יציקה של בטון (שעמיד בכוחות לחיצה) כאשר שניהם מתארכים במידה שווה בעת עליית טמפרטורה.



קשת מאבנים

אין כל דבק או חיבור אחר בין חלקי הקשת – רק כוחות לחיצה. כשאתם עומדים על הקשת, משקלכם הלוחץ כלפי מטה עובר בלחיצה מחלק לחלק, מאבן לאבן.

שתי האבנים התחתונות קבועות למקומן, כדי שהקשת לא תתפסק לצדדים ותקרוס.

אבן היא חומר חזק במיוחד כנגד כוחות לחיצה, ולכן היא חומר מתאים היטב לבנייה של קשתות. הרומאים בנו קשתות כבר לפני אלפי שנים. צורת הקשת הרומית חושבה כך שתוכל לשאת עומס רב בנוסף למשקל העצמי שלה.

קשתות הן צורה נפוצה לקירוי פתחים (חלונות ודלתות) בבנייה באבן בירושלים.



כיצד נתכנן קורה

חוזקה של קורה תלוי בצורת ארגון החומר שלה ולא רק בכמותו. קורה "עומדת" חזקה יותר מקורה "שוכבת"; קורה בצורת האות I חזקה יותר מקורה בצורת I.

המימד האנכי של קורה נקרא גובה הקורה. בחישוב מהיר נוהגים לקבוע את גובה הקורה כ-1/10 מגודל המיפתח, כלומר מאורכה.



מה קורה בקורה, מי מתכופף, כמה, איך ולמה?

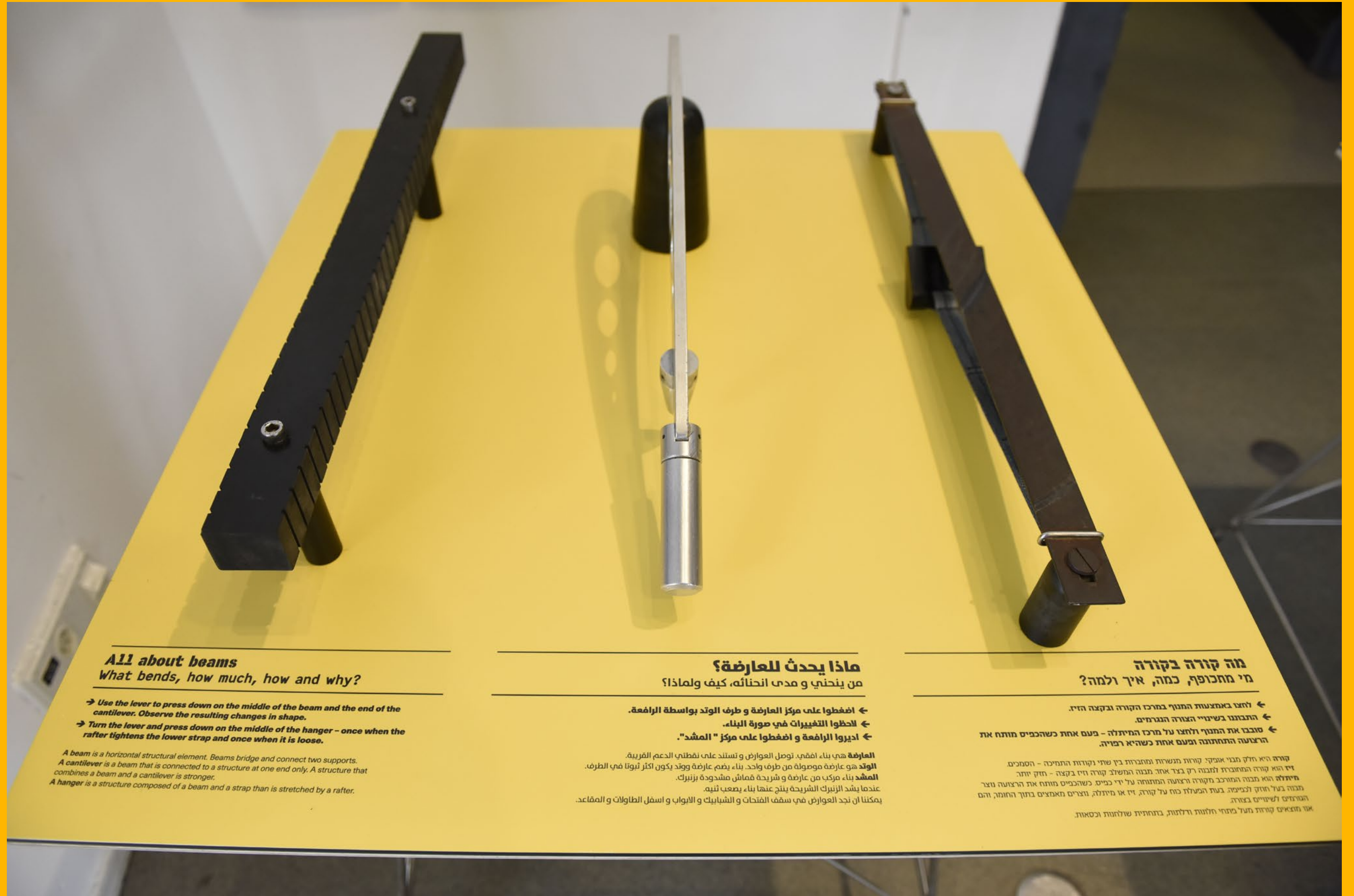
קורה היא חלק מבני אופקי. קורות מגשרות ומחברות בין שתי נקודות התמיכה – הסמכים.

זיז הוא קורה המחוברת למבנה רק בצד אחד. מבנה המשלב קורה וזיז בקצה – חזק יותר.

מיתלה הוא מבנה המורכב מקורה ורצועה המתוחה על ידי כפיס. כשהכפיס מותח את הרצועה נוצר מבנה בעל חוזק לכפיפה. בעת הפעלת כוח על קורה, זיז או מיתלה, נוצרים מאמצים בתוך החומר, והם הגורמים לשינויים בצורה.

אנו מוצאים קורות מעל פתחי חלונות ודלתות, בתחתית שולחנות וכסאות.

נסו למצוא קורות במבנים שונים בסביבתכם.



כולנו ביחד או כל אחד לחוד – הדגמת כוחו של משטח לוחות מהודק

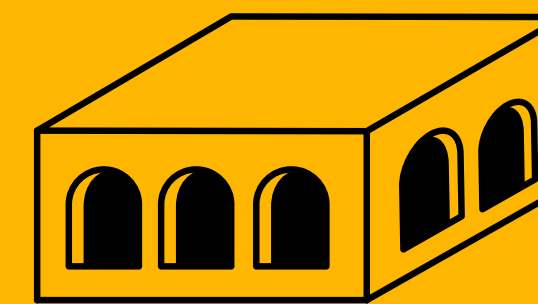
בעת כפיפה נמתח החלק העליון של
הזיז ומתארך ואילו חלקו התחתון
נלחץ ומתקצר.

חיבור הלוחות ליחידה אחת מונע את
ההתקצרות וההתארכות החופשית של
השכבות, שאינן יכולות עוד להחליק
בחופשיות זו ביחס לזו, ולכן חיבורן
יחד "מפריע" לכפיפה. מסיבה זו לוח
לבוד של עץ (כדוגמת הלוח ממנו
עשוי שולחן זה) עשוי שכבות־שכבות,
המודבקות זו לזו.

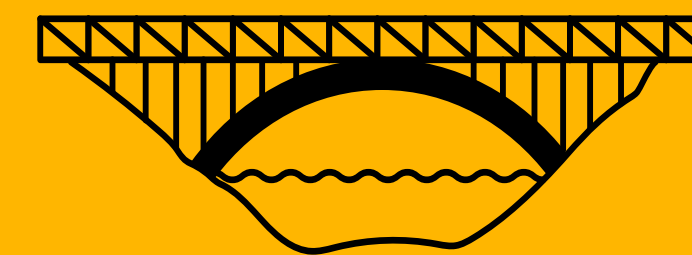


מילון מונחים

אנשים בונים מבנים מסוגים שונים למטרות שונות:



בניינים כדי להגדיר חלל;



גשרים כדי לחבר בין נקודות;

מאגרים כדי לתחום חומרים.

תפקידו ההנדסי של המבנה הוא להעביר כוחות כמו משקל עצמי, עומס שימושי, רוח ועוד, דרך חלקיו אל הקרקע, מבלי לשנות את צורתו.

על המבנה פועלים **עומסים שונים**. חלקם **עומסים קבועים** כמו משקל הרצפה והקירות, וחלקם **עומסים משתנים** דוגמת רוח פתאומית או מכוניות נוסעות על גשר. משקל המבנה נקרא **עומס עצמי**. כל הכוחות האחרים הפועלים על המבנה נקראים **עומס שימושי**.



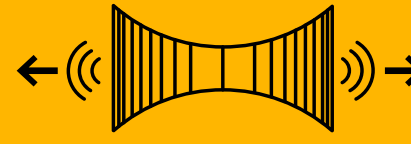

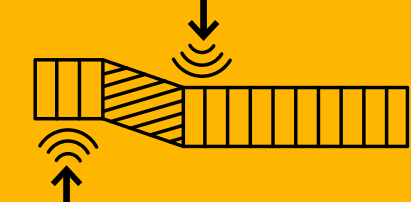
סמך הוא נקודה יציבה המשמשת להשענה של המבנה. המרחק בין נקודות הסמך נקרא **מפתח**.

מילון מונחים

מבנים בנויים מחלקים (אלמנטים) הנדסיים:

- מוט**  תפקידו לשמור על מרחק קבוע בין שתי נקודות (כלומר למנוע שיתקרבו זו לזו, או ירחקו זו מזו).
- כָּבֵל**  תפקידו למנוע התרחקות של שתי נקודות זו מזו.
- קוֹרָה וזיז**  תפקידם להתנגד לכפיפה.
- יריעה**  חומר דק מאוד, אשר יכול לעמוד בכוחות מתיחה בלבד.
- קליפה**  עובייה דק, בעלת מבנה שאינו יכול להתנגד לכפיפה, אך מסוגל לעמוד בעומסי לחיצה ומתיחה.
- קשת**  מבנה המעביר לבסיס כוחות הפועלים במקביל לו.

בעת הפעלת עומס על חלק הנדסי פועלים בתוך אותו חלק כוחות פנימיים. כלל העומסים השונים יכולים ליצור שלושה סוגים בלבד של כוחות/מאמצים בחומר:

- מאמצי מתיחה**  חלקיקי החומר "שואפים" להתרחק זה מזה.
- מאמצי לחיצה**  חלקיקי החומר "שואפים" להתקרב זה לזה.
- מאמצי גְזִירָה**  חלקיקי החומר "שואפים" להחליק זה על גבי זה.

קרדיטים

אוצרים : ד"ר אלי קנט ומיה הלוי

מעצב : פרופ' חנן דה לנגה

עיצוב גרפי : עידן ועקנין

בנייה : צוות בית המלאכה של המוזיאון

Bloomfield
Science Museum
Jerusalem

متحف العلوم
على اسم بلومفيلد
القدس

מוזיאון המדע
ע"ש בלומפילד
ירושלים

