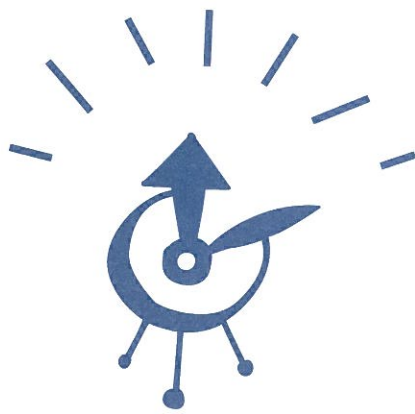




תכנים

השבירה



המוצר הבא עשוי לפתור את בעיית האיחורים לעבודה: שעון מעורר, שאם לא מפסיקים את הצלצול שלו, הוא מתחזק והופך למחריש אוזניים – ההשכמה מובטחת.

ועוד מוצר: מברשת שיניים שמחליפה צבעים. כאשר מצחצחים בה את השיניים די זמן, צבעה משתנה, למשל מירוק לאדום. שינוי הצבע מאותת לנו שצחצחנו את השיניים כהלכה. השינוי בצבע נובע מאופי החומר שממנו עשויה המברשת ותלוי בשינוי בטמפרטורה: ב-20 מעלות, צבע הידית ירוק ואילו ב-30 מעלות צבעה הופך אדום. הטמפרטורה של המברשת עולה כאשר היא נמצאת זמן מספיק במגע עם חום הגוף.

הדוגמה הבאה מוכרת לכול. לא אחת אנחנו נתקלים בנהגים חסרי סבלנות, התקועים בפקק תנועה וצופרים כמשוגעים, למרות שברור שהדבר לא יעזור להם להתקדם ולו במטר אחד. הרשויות מנסות להילחם במטרד באמצעות איסור להשתמש בצופר באזורים מסוימים, אך הבעיה לא נפתרת.

אפשר להילחם בתופעה על ידי קביעת תקן לצופר מסוג מסוים שיותקן במכוניות. עוצמתו של הצופר תלך ותיחלש ככל שצופרים בו יותר, עד שלבסוף יצטרכו להחליף אותו בצופר חדש. במבחן הרישוי השנתי יצטרך הנהג לצפור בעוצמה הנדרשת. נהג שלא ייגמל ממנהגו, ייאלץ להחליף את הצופר במכוניתו בתדירות גבוהה, דבר שיגרום לו טרחה רבה והוצאה כספית מיותרת.*

המשותף לכל הדוגמאות הוא שבכולן יוצרים קשר בין שני משתנים שלא היו קשורים קודם לכן.

בדוגמה של מברשת השיניים יוצרים תלות בין צבע לטמפרטורה, במקרה של השעון המעורר יוצרים תלות בין עוצמת הצלצול לזמן שעובר מתחילתו, ובדוגמת הצופר יוצרים תלות בין מספר הצפירות לבין עוצמתו.

יצירת קשר חדש בין שני משתנים שהיו בלתי תלויים זה בזה הוא העיקרון העומד בבסיסו של התכסיס הרביעי – תכסיס שבירת הסימטריה.**

תכסיס שבירת הסימטריה יוצרים קשר חדש בין שני משתנים במערכת או בסביבתה.

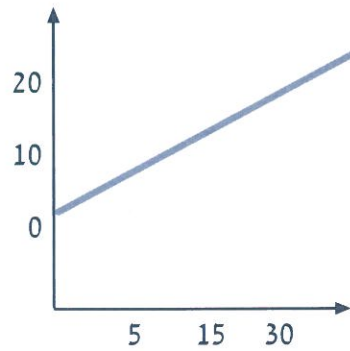
תכסיס שבירת הסימטריה אומר בעצם כך: רוצים לפתור את הבעיה? שנו את המערכת. השינוי כאן מתבטא ביצירת קשרים חדשים בין משתנים, שבמקרים רבים לא היה ביניהם כל קשר. המשתנים שביניהם יוצרים תלות יכולים להיות כל תכונה השייכת למערכת, למרכיביה או לסביבתה. לדוגמה: טמפרטורה, משקל, צבע, אורך, צורה וכו'. ניתן לתאר את הקשר בין שני משתנים בעזרת מערכת צירים (X, Y) :

בציר Y רושמים את המשתנה התלוי, שערכיו משתנים כתלות בערכי המשתנה שבציר X . בדוגמת השעון המעורר, המשתנה התלוי הוא עוצמת הצלצול. בציר X רושמים את המשתנה הבלתי תלוי, במקרה זה – הזמן.

* ראו אדוארד דה-בוננו, **יצירתיות רצינית**, הוצאת מכון ברגמן וייס לטיפוח החשיבה, ירושלים, 1995.

** סימטריה גיאומטרית מלמדת על יחסים והתאמה בין צורות. סימטריה במובן הרחב היא יחס הרמוני או התאמה בין שני גדלים או משתנים. כאשר גדל האחד, גדל באופן דומה גם האחר שסימטרי לו. כשמפעילים את תכסיס שבירת הסימטריה, משנים את היחס הקבוע שהיה בין שני משתנים. כלומר, שוברים את הסימטריה שהיתה ביניהם.

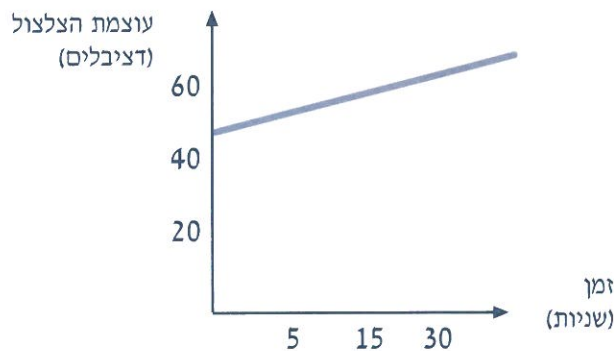
ציר Y:
משתנה תלוי (עוצמת הצלצול)



ציר X:
משתנה בלתי תלוי (זמן)

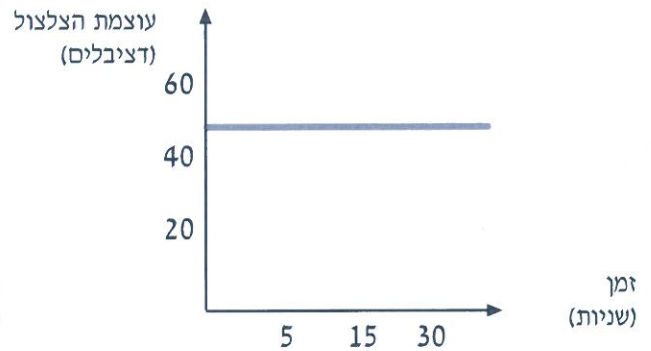
נציג שני גרפים נוספים – לפני יצירת התלות ואחריה:

השעון החדש (אחרי)



עוצמת הצלצול גדלה עם הזמן.
יש תלות בין המשתנים.

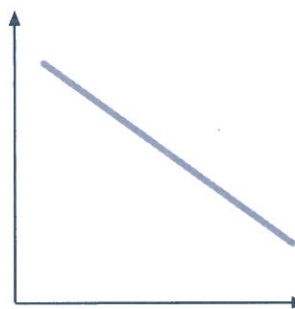
שעון מעורר רגיל (לפני)



עוצמת הצלצול לא משתנה עם הזמן.
אין תלות בין המשתנים.

ייתכנו סוגים שונים של תלות בין משתנים: האחת, תלות מהסוג שתואר בגרף, שבה ערך המשתנה התלוי גדל ככל שגדל ערכו של המשתנה הבלתי תלוי. אפשרית גם תלות הפוכה, שבה קטן המשתנה האחד, ככל שערכו של המשתנה השני גדל, כמו בדוגמת הצופר.

עוצמת הצופר



מספר הצפופים

צריך לצלצל פעמיים?

כולנו לוקים בתסמונת הלחיצה על כפתור הקריאה למעלית, גם כאשר לחצו עליו לפנינו. מספר הלחיצות משמש לכן כאינדיקציה למספר הממתנים.

יצרני מעליות לבניינים גורדי שחקים החליטו לשפר את יעילותן ויצרו קשר בין מספר האנשים הממתנים למעלית לבין מהירות הגעתה. הם תכננו מעליות המגיעות מהר יותר למקום שבו נרשמו יותר לחיצות, כלומר לקומה שבה ממתנים יותר אנשים.

כיצד עוזרת תלות זו לפתור בעיות? בדומה לתכסיס החלוקה, גם תכסיס שבירת הסימטריה, שלצורך הנוחות נקצר ונקרא לו תכסיס השבירה, יוצר דרגות חופש נוספות במערכת. אך הפעם, דרגות החופש מתקבלות לא כתוצאה של חלוקת מרכיבים, אלא עקב יצירת קשרים בין משתנים, שלכאורה נראה שלא ניתן ליצור קשר הגיוני ביניהם. הקשרים החדשים מאפשרים ליצור סוגים שונים של השפעות של משתנים במערכת זה על זה, ועל ידי כך לשנות ולארגן אותה מחדש כדי לפתור בעיה כלשהי.

העובדה שיוצרים קשרים חדשים בין משתנים אינה מבטיחה תוצאות יצירתיות. פתרונות רבים מבוססים על יצירת תלות כזו. למשל, במערכות השקיה חדישות יצרו תלות בין משך השקיית השדה לבין מידת לחות הקרקע כדי לחסוך במים. תלות זו מאפשרת להשקות את השדה בדיוק בכמות המים הדרושה.

דוגמה נוספת: מערכות החיישנים המותקנות בצמתים. כדי ליעל את התנועה בכבישים, מערכות אלה עוקבות אחר מספר המכוניות בכל ציר תנועה בצומת ומאפשרות לשנות את קצב התחלפות אור הרמזור לפי עומס התנועה.

למרות שגם בפתרונות אלה ישנה תלות בין שני משתנים, לא ברור אם הם אינם נכללים בקטגוריה של פתרונות המצאתיים, כיוון שכבר בהגדרת הבעיה ברור שיש ליצור קשר בין שני המשתנים. הקושי בפתרונות אלה הוא במימוש הקשר ולא בעצם החשיבה עליו.

לעומת זאת, בפתרון היצירתי, גם בשלב הגדרת הבעיה אין עדיין כל רמז לכך שניתן לפתור אותה על ידי יצירת קשר בין המשתנים. רק לאחר יצירת התלות נחשפת התועלת שהיא יכולה להביא. למשל, בדוגמת צופר המכונית, הגישה המקובלת היא יצירת תלות בין חומרת העבירה (מספר הצפצופים) לגובה הקנס. לעומת זאת, יצירת תלות בין מספר הצפצופים לבין אורך החיים של הצפצפה הוא רעיון מקורי, שלא מיד הייתם חושבים עליו, שכן יוצרים כאן קשר בין שני משתנים שלא מקובל לקשור ביניהם.

שלבי תכסיס השבירה

תהליך פתרון בעיה בעזרת תכסיס השבירה מורכב יותר מהתהליך בתכסיסים אחרים. הסיבה היא שהפעם יש להתייחס בנוסף למרכיבי המערכת והסביבה, גם למשתנים שלהם. התכסיס מתבצע בחמישה שלבים:

בשלב הראשון מכינים רשימה של מרכיבי המערכת.

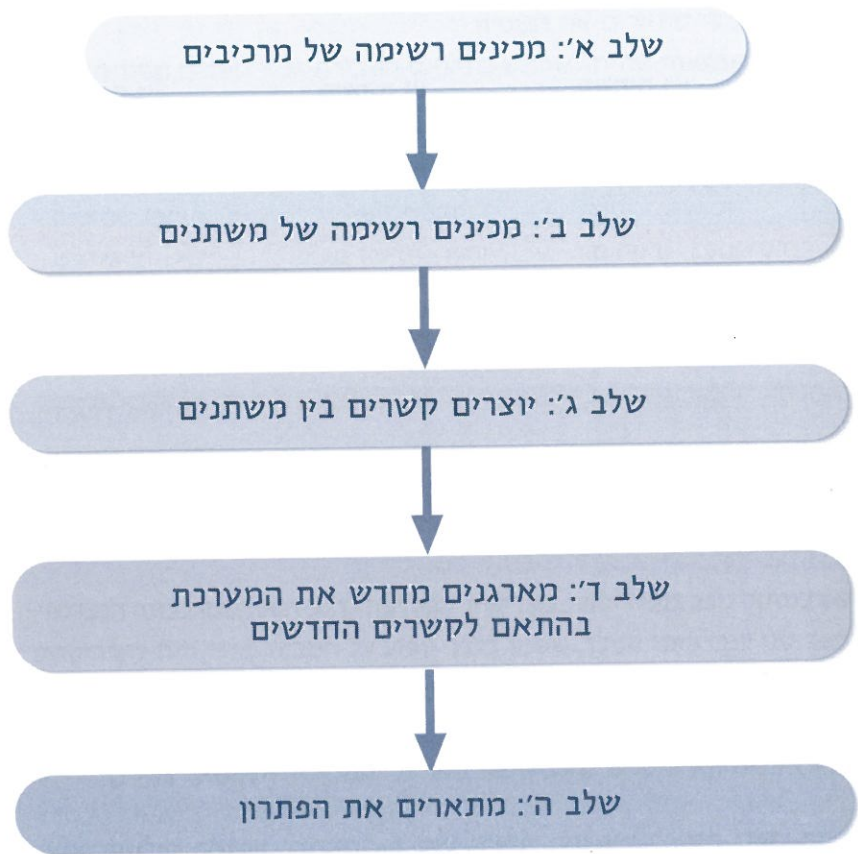
בדוגמה של מברשת השיניים המרכיבים הם אדם, מברשת, משחת שיניים.

בשלב השני בוחנים את המערכת, את מרכיביה, ואת הסביבה, ומזהים את המשתנים השונים.



טבעות סבתא

"אינני מבינה", אומרת הכלה הצעירה לסבתה, "מדוע בזמנך יצרו טבעות נישואין עבות, ואילו טבעת הנישואין שלי כה דקה?" "את שוכחת נכדתי", משיבה הסבתא, "שבזמני יצרו טבעות נישואין שתחזקנה מעמד לכל החיים".



במערכות רבות אפשר לדבר על משתני המערכת: משקל, כמות, צורה, צבע, נפח, מיקום, אורך, רוחב, גובה, עובי, טמפרטורה. משתני סביבה נפוצים: עוצמת רוח, לחות, טמפרטורה, עוצמת קרינה, זמן, לחץ. בדוגמה של מברשת השיניים יהיו משתנים כגון זמן, טמפרטורה, צבע, משקל, אורך.

בשלב השלישי יוצרים קשר בין זוגות משתנים, שבמצבם המקורי אינם תלויים זה בזה. באופן תיאורטי, ניתן ליצור קשר בין כל זוג משתנים.

הטבלה הבאה מדגימה קשרים אפשריים בין משתנים בדוגמה של מברשת השיניים.

משתנה א': משקל	משתנה ב': צבע	משתנה ג': אורך	משתנה ד': טמפרטורה
משתנה א': משקל	---	המשקל משתנה עם השינוי בצבע	המשקל משתנה עם השינוי בטמפרטורה
משתנה ב': צבע	הצבע משתנה עם השינוי במשקל	---	הצבע משתנה עם השינוי באורך
משתנה ג': אורך	האורך משתנה עם השינוי במשקל	---	האורך משתנה עם השינוי בטמפרטורה
משתנה ד': טמפרטורה	הטמפרטורה משתנה עם השינוי במשקל	הטמפרטורה משתנה עם השינוי בצבע	---

הערות לטבלה:

- המשתנים הרשומים בטור הימני ביותר הם המשתנים התלויים.
- המשתנים הרשומים בשורה העליונה הם משתנים בלתי תלויים.

לאחר השלמת הטבלה, בוחנים את האפשרויות החדשות ליצירת קשרי תלות מסוגים שונים בין כל שני משתנים (דרגות חופש). לכאורה יש סתירה בין יצירת תלות להגדלת דרגות החופש, כלומר בין התלות המגבילה כביכול שיצרנו, לבין האפשרויות הקיימות במערכת. המיוחד בתכסיס הוא שדווקא התלות מכוונת את החשיבה לנסות ולשנות את המערכת בצורות שונות שלא היו עולות על דעתנו. השינוי נעשה בעזרת משחקים שונים בערכים של משתנים לאחר שיצרנו תלות בינם לבין המשתנים האחרים. בהכנת הטבלה יש להתייחס לכל הקשרים האפשריים, גם אם לא יודעים כיצד לממש אותם או שאין כלל אפשרות לקשר בין שני המשתנים.

בשלב הרביעי עוברים על זוגות המשתנים, ובודקים כיצד ניתן לארגן את המערכת מחדש, כך שנצל את הקשר שיצרנו כדי לפתור את הבעיה.

במקרים מסוימים, התועלת שמפיקים מהקשר החדש גלויה וברורה. למשל, מרגע שיצרנו את הקשר בין עוצמת הצלצול של השעון המעורר לזמן הצלצול, קל לראות כיצד הקשר עוזר להשכים אנשים שמתקשים להתעורר. במקרים אחרים דרושה בחינה יסודית של הקשר שיצרנו, כדי לראות אם וכיצד הוא מועיל לפתרון הבעיה. לדוגמה, במברשת השיניים, לא די ביצירת קשר בין הטמפרטורה לצבע, יש צורך למצוא דרך לנצל אותו לתועלתנו.

בשלב החמישי מתארים את הפתרון.
נציג כעת דוגמאות שונות לשימוש בתכסיס השבירה. נכיר קשרים מסוגים שונים ונלמד כיצד הם עוזרים לפתרון בעיות.

המלך והארכיטקט

לאורך ההיסטוריה נהגו שליטים להאדיר את שמם באמצעות מפעלים רבי רושם. תלמי מלך מצרים, שחי במאה השלישית לפני הספירה, בחר להקים מבנה גדול, שישרוד שנים רבות אחרי מותו. הוא ציווה על הארכיטקט סוסטרטוס לתכנן מגדלור על חוף ימה של אלכסנדריה. הארכיטקט שקד על המלאכה זמן רב והקים מבנה מיוחד במראהו (המגדלור נמנה מאוחר יותר עם שבעת פלאי העולם העתיק).

בימים ההם היה מקובל שהמלך הוא שזוכה בתהילה על יצירה שהזמין ולא היוצר-המתכנן שלה. וכך, עם סיום הבנייה ציווה תלמי על סוסטרטוס לחרוט את השם המלכותי על לוח ולהצמידו למגדלור.

הארכיטקט ניצב בפני דילמה: מצד אחד הוא רצה להנציח את שמו כבונה המגדלור, ומצד שני עמד ציווי המלך, ששמו בלבד יופיע על המבנה. ברור היה לארכיטקט שכל ניסיון להבליט את שמו שלו עלול לעלות לו בחייו.

כיצד הצליח הארכיטקט להנציח את שמו על המגדלור ולהישאר בחיים.

שוברים ופותרים: המלך והארכיטקט

בשלב ראשון מפרטים את רשימת המרכיבים: לוח, מגדלור.

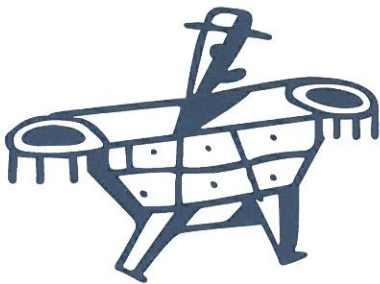
בשלב שני רושמים את המשתנים.

משתני הסביבה: זמן, רוח וטמפרטורה.

משתני המגדלור: צבע, גובה, טמפרטורה וזמן.

משתני הלוח: רוחב, צבע, גובה, עובי, סוג החומר וכמובן השם שבחרים לכתוב.

בשלב שלישי יוצרים קשרים חדשים בין זוגות המשתנים השונים. לא כולם הגיוניים, כפי שניתן ללמוד מהטבלה שלהלן.



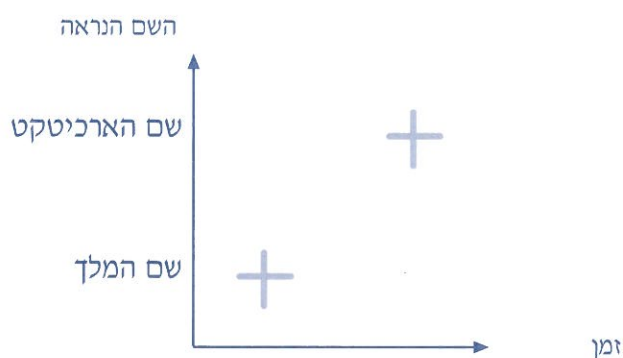
זמן	גובה	צבע	טמפרטורה
זמן	--	הזמן משתנה עם השינוי בצבע	הזמן משתנה עם השינוי בטמפרטורה
גובה	הגובה משתנה עם הזמן	--	הגובה משתנה עם השינוי בטמפרטורה
צבע	הצבע משתנה עם הזמן	--	הצבע משתנה עם השינוי בטמפרטורה
טמפרטורה	הטמפרטורה משתנה עם הזמן	הטמפרטורה משתנה עם השינוי בצבע	--

בשלב רביעי בודקים כיצד ניתן לנצל את הקשרים שיצרנו לפתרון הבעיה.

הפתרון שמצא הארכיטקט גם הביא לו תהילת עולם וגם השאיר אותו בחיים: הוא חרט את שם המלך על לוח גבס. מתחתיו, על לוח אבן קשה, חרט את שמו שלו.

בפתרון זה מתקיימת תלות בין השם החרוט על הלוח למשתנה הזמן. בשנים הראשונות ייראה שם המלך. כעבור שנים, לאחר מות המלך, יישחק לוח הגבס, וייחשף שם הארכיטקט.

הנה תאור גרפי של הפתרון:



ולפני שנמשיך, חשבו פעם נוספת. האם אפשר להגיע לפתרון גם בעזרת תכסיסים נוספים?

כן, בעזרת תכסיס ההכפלה. מכפילים את הלוח. משנים את העותק ויוצרים אותו מחומר קשה יותר. זהו פתרון דומה, שהגענו אליו מכיוון חשיבה שונה.

נחזור כעת לבעיית האנטנה שהוצגה בפרק המבוא, ונראה כיצד אפשר להגיע לפתרון שהוצג שם, ואולי לפתרונות נוספים, בעזרת תכסיס השבירה.

אנטנה מכוסה קרח [2]

כזכור, עסקה הדוגמה באנטנה שיש להציבה מאחורי קווי האויב, באזור קר ומושלג. החיילים הולכים ברגל ליעד, ולכן חשוב שהאנטנה תהיה קלה לנשיאה. עוד מתברר שבלילות קרים מאוד מצטבר על האנטנה קרח שגורם לקריסתה. יצרנית האנטנה הציעה להחליף את המוט הרגיל שאליו מחובר המכשיר במוט עבה וחזק יותר, אלא שהחיילים היו מתקשים לשאת אותו במסע רגלי ממושך.

שוברים ופותרים: אנטנה מכוסה קרח

המרכיבים הקשורים למערכת: אנטנה ומוט.

משתני המרכיבים: צבע, גובה וקוטר המוט, משקל האנטנה, היקף האנטנה, צורתה.

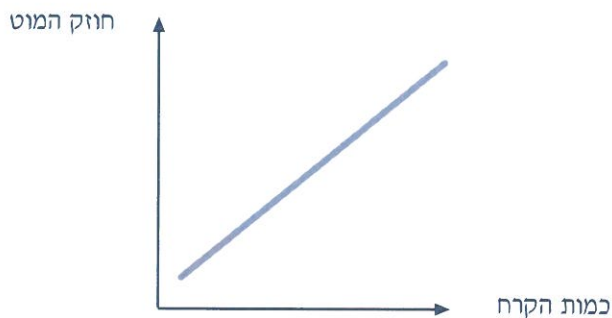
משתני הסביבה: טמפרטורה, רוח, לחות, זמן, כמות הקרח.

פתרון אפשרי אחד הוא יצירת תלות בין קוטר המוט לגובהו. במקום מוט שקוטרו אחיד, משתמשים במוט שקוטרו גדול בבסיסו, וצר בחלקו העליון, כך שהוא חזק בהרבה למרות שמשקלו זהה למשקלו של מוט בקוטר אחיד.

אפשרות אחרת היא ליצור תלות בין גובה המוט למשקל שעליו לשאת. כאשר המסה גדלה, בגלל קרח שהצטבר על המוט בלילות קרים, המוט מתכווץ עד שהאנטנה נתמכת בקרקע (ניתן לממש את הרעיון בעזרת מערכת קפיצים שמתכווצת תחת לחץ). מאוחר יותר, הקרח מפשיר, והאנטנה מזדקפת למלוא גובהה. חסרונו של פתרון זה שהאנטנה לא יכולה לקלוט ולשדר כאשר המוט מכווץ, אך אם מדובר בימים מעטים בלבד בשנה, הניק לא גדול.

בפתרון המוצג במבוא יוצרים תלות בין חוזק המוט לכמות הקרח המצטברת עליו. על ידי חספוס פני השטח של המוט, גורמים לכך שהקרח המצטבר מחזק אותו.

הדוגמאות מראות שניתן להגיע לכמה פתרונות כאשר יוצרים סוגים שונים של תלות בין משתנים שונים. תלות בין קוטר המוט וגובהו מכוונת לפתרון אחד ואילו תלות בין הקוטר וכמות הקרח מכוונת לפתרון אחר.



בפרק המבוא הגענו לפתרון האחרון באמצעות תכסיס האיחוד: מגדירים פעולה עקרונית של חיזוק המוט, בוחנים את מרכיבי המערכת ומרכיבי הסביבה, ומשתמשים במרכיב סביבה – הקרח – כדי לבצע את הפעולה. דוגמה זו מראה כיצד תכסיסים שונים עשויים לשמש למציאת פתרון זהה לבעיה. בדוגמה הבאה נראה כיצד שימוש בתכסיסים שונים מוביל לפתרונות שונים לאותה בעיה.

קרניים בתנועה

בפרק השלישי, שעסק בתכסיס החלוקה, הראינו כיצד משמידים גידול סרטני, מבלי שהקרינה המכוונת אליו תפגע ברקמות הבריאות שסביבו.

הפתרון שהצענו כלל חלוקה של עוצמת מכשיר הקרנה אחד לכמה מכשירים. לפי חלוקה זו, מציבים כמה מכשירי הקרנה סביב החולה ותוקפים את הגידול מזוויות שונות. (מחד גיסא, שיטה זו מאפשרת להפעיל את המכשירים בעוצמה נמוכה כך שהרקמות הבריאות לא תיפגענה, ומאידך גיסא, הקרניים מצטלבות באזור הגידול בעוצמת קרינה חזקה כנדרש).

כיצד פותרים בעיה זאת באמצעות תכסיס השבירה?

שוברים ופותרים: קרניים בתנועה

מרכיבי הבעיה: חולה, גידול, קרן, מכשיר.

משתני המרכיבים: משקל המכשיר, מקום המכשיר ביחס לחולה, גובה המכשיר, עוצמת הקרן וכד'.

משתני הסביבה: זמן וטמפרטורה.

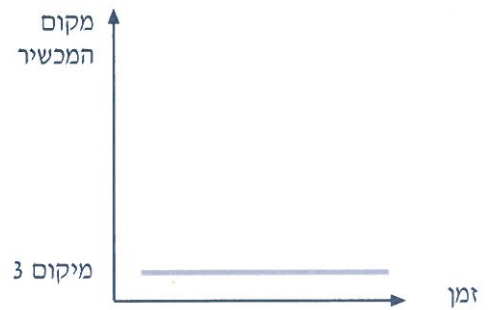
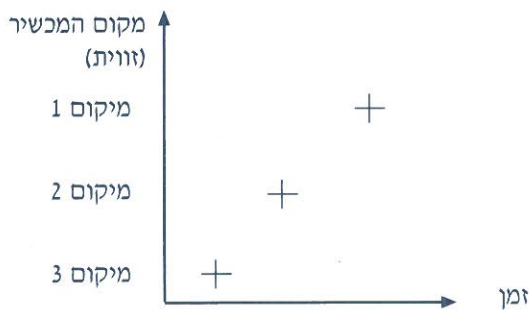
לו יכולנו ליצור תלות בין עוצמת הקרן למרחק שלה ממקור ההקרנה, היינו משנים את עוצמת הקרינה כך שבאזור הגידול היא תהיה מקסימלית ואילו במקומות אחרים תהיה הקרינה חלשה. מאחר שאיננו יודעים כיצד לעשות זאת, נחפש קשר אחר.

יצירת קשר בין מיקום המכשיר לבין הזמן מובילה לפתרון הבעיה. קשר זה מאפשר לארגן את המערכת מחדש: מזיזים את המכשיר סביב החולה ומקרינים על הגידול מזווית שונת (איורים 1-3).



תיאור הפתרון: כאשר מקרינים על רקמה חיה שוב ושוב, השפעת הקרינה מצטברת. כאשר מקרינים על הגידול מזוויות שונות, הקריניים עוברות דרך רקמות אחרות בכל פעם, וכך סופגות הרקמות מעט קרינה באופן יחסי. לעומת זאת, הגידול סופג את כל הקריניים ונהרס.

בתי חולים נוהגים להשתמש בפתרון זה. בטיפול בסרטן הערמונית, למשל, מסובבים את המכשיר סביב החולה ומקרינים על הגידול משישה כיוונים שונים.



תכסיס נוסף, פתרון נוסף

מה היתרון בפתרון שהגענו אליו בעזרת תכסיס השבירה? בתכסיס החלוקה היה צורך בכמה מכשירים כדי לפתור את הבעיה, ואילו הפתרון שהצגנו כאן מאפשר להסתפק במכשיר אחד בלבד.

המסקנה היא שגם אם פתרנו בעיה בעזרת תכסיס מסוים, כדאי לנסות להגיע לפתרונות נוספים בעזרת תכסיסים אחרים. הפתרונות הנוספים עשויים להיות טובים יותר.

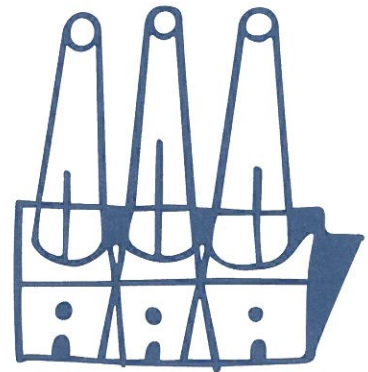
אפשר להסתכל על פתרון זה בצורה אחרת: לאחר שהגענו לפתרון שהוצג בחלוקה, אנו מציבים לעצמנו בעיה חדשה: איך נממש את הרעיון במינימום הוצאות. שבירת סימטריה מראה כיצד אפשר להסתפק במכשיר אחד במקום שישה.

בתחילת הפרק הצגנו פתרונות שנוצרה בהם תלות בין משתנים שלכאורה אין ביניהם כל קשר. בדוגמאות הבאות, ברור כבר עם הצגת הבעיה, שיצירת תלות בין משתנים תפתור אותה. היצירתיות בפתרון באה לידי ביטוי באופי התלות בין המשתנים.

מפעל לאיכות הסביבה

מפעלים תעשייתיים רבים צורכים כמויות גדולות של מים. אחת הדרכים לספק להם מים היא לבנות את המפעל בקרבת נהר. המפעל שואב את המים, מסנן או מטהר אותם (במקרה שהנהר מזוהם) ומשתמש בהם לצרכיו.

חלק מהמפעלים מזרימים אל הנהר שפכים הנוצרים בתהליך הייצור, ובכך גורמים לזיהום סביבתי. תקנות ממשלתיות מחייבות אמנם את המפעלים לטהר את השפכים שלהם קודם לכן, אך כיוון שתהליך הטיהור יקר, לא כל המפעלים מקפידים על כך. הרשויות מתקשות לגבות את הקנסות המוטלות בגין עבירה זו, ומפעלים רבים ממשיכים לזהם את מי הנהרות.



השתמשו בתכסיס השבירה כדי להציע פתרון למפעלים שימנעו את זיהום הנהרות.

שוברים ופותרים: מפעל לאיכות הסביבה

הטלת קנסות הוא פתרון שמבוסס בדרך כלל על יצירת התלות הבאה: ככל שהזיהום גדול יותר, כך גדל הקנס המוטל על המפעל. האם קשרים בין משתנים נוספים יציעו לנו פתרונות אחרים?

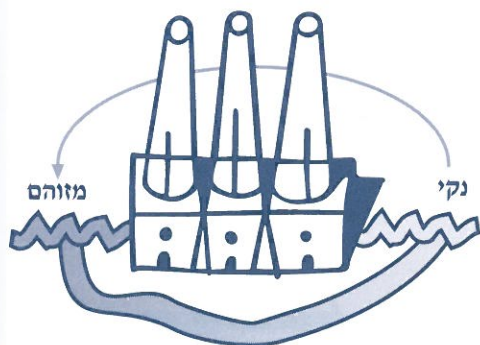
מרכיבי הבעיה: המפעל, מי השפכים, מי הנהר.

משתני מי השפכים: כמות המים, טמפרטורה, מידת הזיהום.

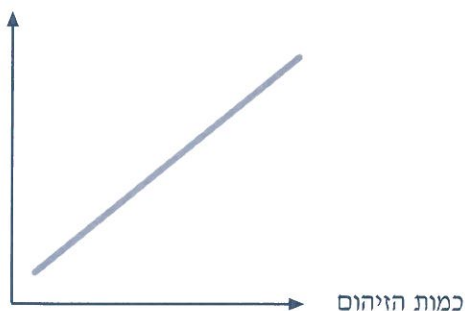
משתני מי הנהר: מהירות הזרימה, טמפרטורה, איכות המים.

משתני המפעל: מיקום המפעל, כוח אדם, מבנים.

נבחן את הקשרים שעשויים לעזור בפתרון הבעיה. הקשר הראשון הוא בין כמות המים שהמפעל מזרים לנהר לבין כמות החומרים המזוהמים שהוא מייצר. אפשר לחייב את המפעל למהול את הרעלים בכמות גדולה יותר של מים, ובכך להקטין את הנזק שעשויים לגרום החומרים הרעילים. בתעשייה לעתים אכן משתמשים בפתרון זה. היתרון של פתרון זה הוא שמפעל שאינו מטהר את המים מרעלים, צריך להגדיל את כמות המים שהוא שואב מהנהר כדי למהול את המים המזוהמים, תהליך שעלותו גבוהה.

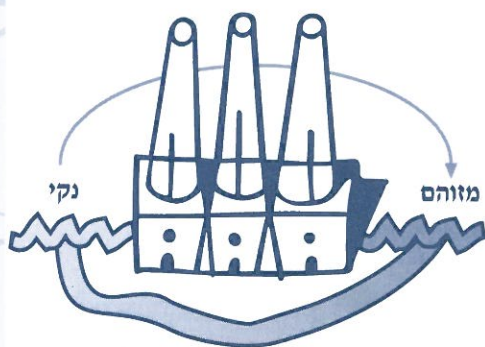


כמות המים שיש לשאוב

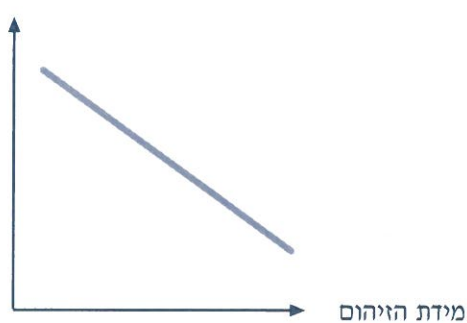


אך גם כאן, כמו בפתרון של הגדלת הקנס, החסרון הוא שצריך פיקוח צמוד כדי לוודא שהמפעל אכן מוהל את הרעלים שלו בכמות גדולה של מים.

קשר מסוג אחר הוא בין מידת הזיהום שהמפעל גורם לאיכות המים שהוא שואב.



איכות המים הנשאבים



נגדיר את הקשר כך: ככל שהמפעל מזהם את הנהר יותר, איכות המים שהוא שואב יורדת.

כאשר איכות המים יורדה, המפעל יאלץ להשקיע כסף רב יותר בטיהור המים שהוא שואב. כתוצאה מכך יהיה כדאי לו להקטין את מידת הזיהום.

לכן, יש ליצור מצב שבו מידת הזיהום תשפיע ישירות על איכות המים הנשאבים. מצב כזה נוצר כאשר מחייבים מפעלים לשאוב מים במורד הנהר ולהזרים את השפכים שלהם במעלה הנהר. ככל שהשפכים יהיו מזוהמים יותר, איכות המים שהמפעל שואב תרד. מפעל שיזהם בצורה משמעותית את מי הנהר, לא רק שישלם קנס אם ייתפס, אלא גם יצטרך להשקיע מאמץ רב יותר בטיהור המים שהוא שואב.

הפתרון האחרון הוא היצירתי מכולם. המיוחד בפתרון זה הוא יצירת תלות בין המשתנה שעליו רצינו להשפיע למשתנה, שסביר להניח שלא היינו חושבים עליו באופן טבעי בהקשר זה.

שימוש בתכסיס השבירה הפנה את תשומת לבנו למשתנה ולפתרון היצירתי. לפתרון שהתקבל יש שני יתרונות. האחד, אין צורך בפיקוח צמוד על המפעל, והשני, למפעל יש מוטיבציה למנוע את הזיהום.

שיחה כבדה

מנהליה של חברה שקיבלה זיכיון להפעלת טלפונים ציבוריים באוסטרליה הבינו שהם בצרות. על פי חוקי המדינה תעריף שיחה מקומית הוא קבוע, כך שבמחיר של שיחה אחת אפשר לדבר זמן רב. הדבר צמצם את רווחי החברה, ומנהליה חיפשו דרכים להקטין את משך השיחות. כל דרך גלויה להגביל את משך השיחה או לבקש תשלום נוסף מהמשתמשים לא באה בחשבון. האם מנהלי החברה יכולים לפתור את הבעיה בעזרת שימוש בתכסיס השבירה?

שוברים ופותרים: שיחה כבדה

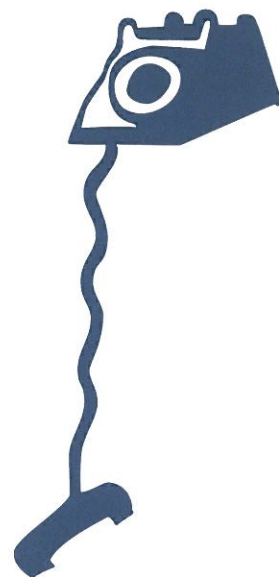
הפתרון המקובל של יצירת תלות בין משך השיחה למחירה אינו אפשרי, שכן על פי חוקי המדינה התעריף קבוע. אם כך, יש ליצור תלות בין משך השיחה למשתנה אחר במערכת. למשל, איכות הקליטה, משקל, צבע וטמפרטורת השפורפרת, עוצמת הדיבור, תחושת אי הנוחות של המשוחח וכדומה.

תחילה נבחן יצירת קשר בין איכות הקו למשך השיחה: ככל שהשיחה תתארך, איכות הקו תיפגע. היתרון של פתרון זה ברור, אולם חסרונו הוא פגיעה במוניטין של החברה. חסרון זה פוסל רעיונות נוספים הקשורים באיכות הקו או באיכות השירות.

מנהלי החברה בחרו ליצור קשר בין תחושת אי הנוחות של הדובר למשך השיחה: תחושת אי הנוחות של המשוחח בטלפון תגדל, ככל שמשך השיחה יתארך. הפתרון ניצל גורם מתווך – משקל השפורפרת – כדי ליצור תלות עקיפה בין אי הנוחות או העייפות של הדובר למשך השיחה. החברה החליפה את השפורפרת הרגילות בשפורפרת כבדות שעשויות מעופרת. השפורפרת הכבדה גורמת לדובר להתעייף במהירות, ומעודדת אותו לקצר את משך השיחה.

מרד פני הנילוס

ניצד ליצור תלות בין גובה המס לגובה ההכנסה? הרשויות במצרים העתיקה מצאו פתרון יצירתי לבעיה. המצרים השתמשו במתקן שנקרא נילומטר, שמדד מדי שנה את גובה פני הנילוס. כאשר מפלס הנילוס היה גבוה, הסיקו שגם היבול היה רב, ולכן אפשר להעלות את גובה המס בהתאם.



מעניין לשים לב לכך שבפתרון המוצע חושפים קשר קיים ומנצלים אותו לפתרון הבעיה. הקשר בין עייפות השרירים למשך השיחה היה ידוע קודם אך לא נתפס עד כה כשייך לבעיה. לאחר חשיפת הקשר, מגבירים אותו כדי להגיע לתוצאה הרצויה. במקרה זה, הגברת הקשר הושגה בעזרת מתווך – משקל השפופרת. המתווך יכול לאפשר קשר בין שני משתנים, שאין יודעים כיצד לקשור ביניהם, או להגביר קשר קיים. בדוגמה זו אין צורך שתכונות המתווך (משקל השפופרת) ישתנו בפועל כדי להגביר את התלות בין המשתנים. די להחליף את השפופרת הקיימת בשפופרת כבדה יותר כדי להשיג את התוצאה הרצויה.



תרגילים

נסו לפתור את השאלות הבאות. מומלץ להעלות כמה רעיונות ולנסות להפעיל את תכסיס השבירה. הצעות לפתרונות תוכלו למצוא בעמ' 95-98.

מתגים ונורות

חדר מואר על ידי שלוש נורות. בחדר סמוך נמצאים שלושת המתגים. כל מתג מדליק נורה אחת בלבד, אולם לא ברור איזה מתג מדליק איזו נורה. האם אפשר לגלות איזה מתג שייך לאיזו נורה בלי להיעזר במכשירים כלשהם?

אילוצים:

- מחדר המתגים אי אפשר לראות אם הנורות דלוקות או כבויות.
- מותר להיכנס לחדר הנורות פעם אחת בלבד.

מטבעות מזויפים

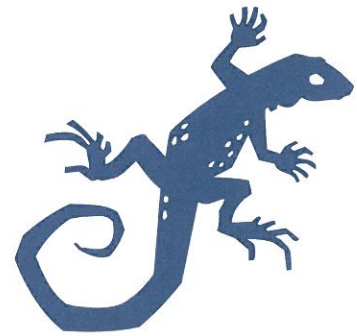
לפניכם מאזניים דיגיטליים ועשרה שקים המכילים מטבעות זהב. משקל כל מטבע הוא 10 גרם. שק אחד מכיל מטבעות זהב מזויפות, שמשקל כל אחת מהן 9 גרם. איך נוזה בעזרת שקילה אחת בלבד את השק עם המטבעות המזויפות?

חוק היובש

בשנת 1919 נאסר בארצות-הברית לייצר, לייבא ולהפיץ משקאות משכרים. 14 שנה נמשכה "תקופת היובש", שהביאה לצמיחת ארגוני פשע שייצרו משקאות וסחרו בהם במחתרת. הגנגסטרים נהגו להבריח ארגזים עם בקבוקי יין, מוסתרים בסירות דיג קטנות. כאשר נעצרו לביקורת על ידי משמר החופים, מבריחי המשקאות העמידו פני דייגים תמימים. כיצד לדעתכם הסתירו את בקבוקי היין בסירות?

סוסי יאור

מהי טמפרטורת המים שבה מרגישים סוסי יאור בנוח? אחת הדרכים לברר זאת היא לחמם את מי הברכה שלהם בגן החיות. מנסים טמפרטורות שונות, ובודקים משתנים שמבטאים שביעות רצון, כגון מספר ההזדווגויות, מידת התיאבון וכו'. הבעיה היא שכדי לכוון את הטמפרטורה במכשירי החימום, יש להתקרב אל מקום המרבץ של הבהמות הכבדות והמאיימות. כיצד פתרו החוקרים את הבעיה? הם נהגו להוציא את סוסי היאור מהכלוב, ורק אז לחמם את מי הברכה לטמפרטורות השונות. מערך ניסוי זה היה מורכב ומסובך, דבר שדרבן אותם לנסות למצוא מערך ניסוי טוב יותר לביצוע המחקר. איך לדעתכם הם עשו זאת?



זיקית לא סימטרית

הזיקית מסוגלת לשנות את צבע עורה בהתאם לצבע הסביבה שבה היא מצויה. בעזרת הורמונים שונים, הזיקית משנה את הפיזור והריכוז של הפיגמנטים (חומרי הצבע) המצויים בתאים מיוחדים בעורה (תאים כרומטופורים). שינוי הצבע משמש להסוואה כאשר הזיקית מזהה טורף פוטנציאלי.

שעה במהירות גבוהה

דוגמה אחת לקושי האנושי להתמודד עם קשר חדש בין משתנים היא ההתנגדות הרבה שבה התקבלה תופעת התארכות הזמן, המתוארת בתורת היחסות של איינשטיין. אחת המסקנות של תורת היחסות היא שיחידות הזמן, שאנו רגילים לראותן כקבועות, אינן קבועות באמת. כלומר, ייתכן שנמדוד שתי יחידות זמן, נאמר של שעה, ונגלה שאינן זהות. לפי תורת היחסות, גודלה של יחידת הזמן מושפע ממהירות התנועה של הגוף שעליו נמדד הזמן. אם נכיל שני שעוני מדידה מדויקים על שעה מסוימת, למשל 12:00, ונמתין שעה, תחלוף בדיוק שעה בכל אחד מהשעונים. אך אם שעון אחד יישאר במקומו, ושעון שני ישלח בחללית שטסה במהירות גבוהה ביותר, קרוב למהירות האור, לטיסה של שעה, כאשר נשווה את השעונים, נגלה שבשעון שנשאר על פני כדור הארץ חלפה שעה, ואילו בשעון שהיה בחללית חלף זמן קצר יותר. בפועל, השינוי בזמן זעיר ביותר, והוא הופך למשמעותי רק כאשר מדובר במהירויות הקרובות למהירות האור.

שוברים וממציאים

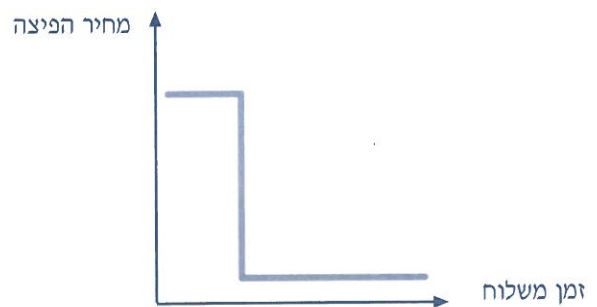
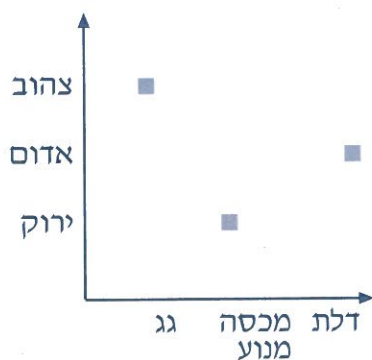
רשת דומינוס פיצה העולמית היתה הראשונה שהציעה מסע פרסום שיקשר בין זמן המשלוח למחיר הפיצה. וזה היה נוסח ההצעה: הפיצה מגיעה אליך בתוך חצי שעה מרגע ההזמנה או שתזכה בהנחה על מחירה. רעיון שיווקי זה הגדיל באופן משמעותי את מכירות הרשת, והפך אותה מפיצריה קטנה במדינת מישיגן שבארצות-הברית לרשת בינלאומית בעלת אלפי סניפים בכל רחבי העולם.



יצרנית הרכב פולקסווגן הודיעה ב-1 באפריל 1995 על השקת דגם חדש של מכונית פולו, שכל אחד מחלקיה החיצוניים צבוע בצבע אחר. למעשה, היה מדובר במתיחה ובדגם של מכונית שאינה קיימת. אבל אנשים רבים התייחסו לרעיון ברצינות ואף בהתלהבות. הם התקשרו למשרדי החברה וביקשו לרכוש את הדגם המוזר.

לנוכח מספר הפונים הרב, החליטה החברה להפוך את הדגם למוצר אמיתי, שנמכר ברחבי העולם תחת השם פולו ארלקינו*.

הגרף להלן מראה לנו ששני הרעיונות היצירתיים הללו נולדו מיצירת תלות בין שני משתנים שלא מקובל לקשור ביניהם.



אכן, אפשר להגיע לרעיונות כאלה גם במקרה. אבל איך מגיעים אליהם בדרך שיטתית ויעילה?

* אי מנור, "על שיטתיות בחדשנות ועל מוצרים וירטואליים", **אותות**, (נוב-דצ) 1996.

ממציאים מוצר: השלבים



ננסה כעת להעלות רעיונות לכמה מוצרים חדשים.

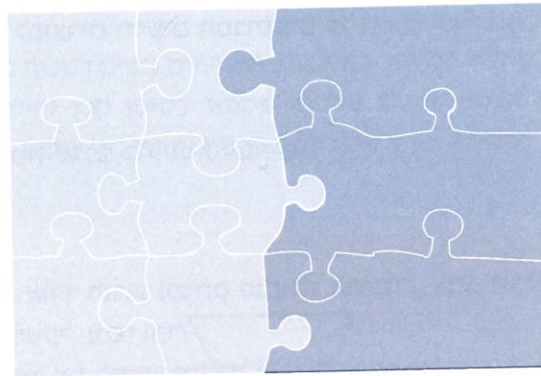
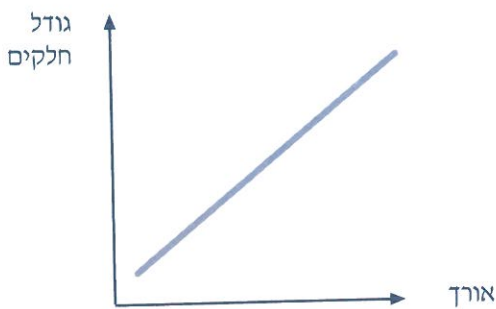
משחק פאזל [2]

המוצר: משחק פאזל

עולם המוצר: משחקים ביתיים לילדים.

המשתנים של פיסות הפאזל: צבע, משקל, גודל.

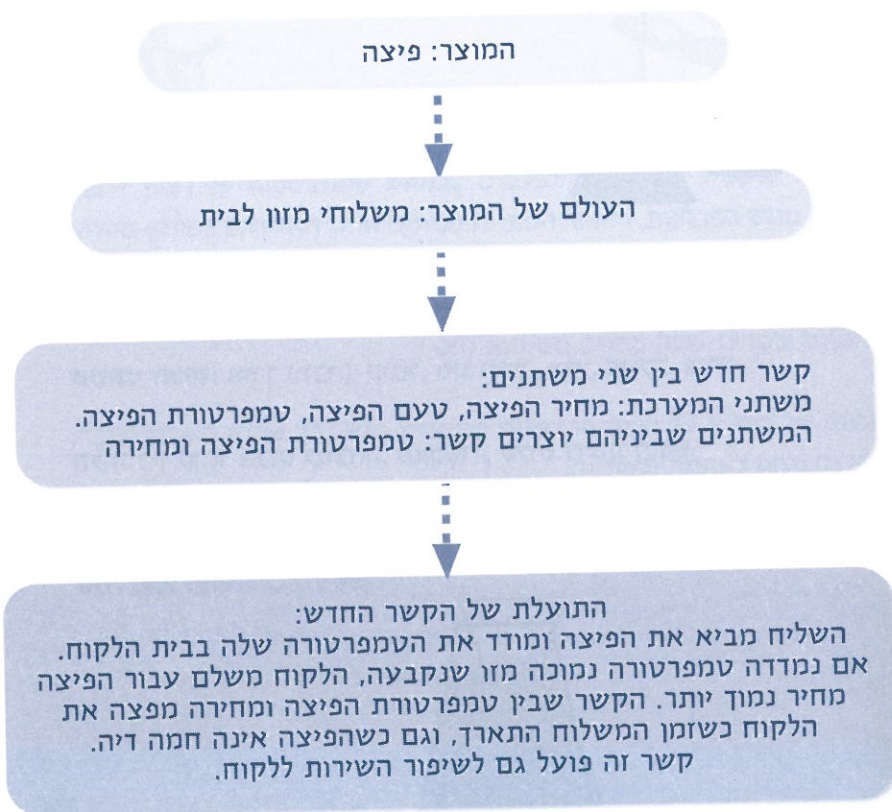
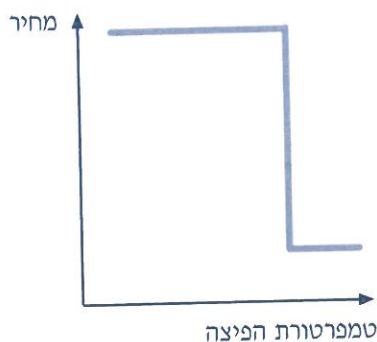
יצירת קשרים בין המשתנים: אפשר ליצור קשר בין גודל חתיכת פאזל למיקומה לאורך התמונה. התמונה המתקבלת תורכב מחתיכות קטנות, שתגדלנה ככל שמתקדמים לעבר הצד האחר של התמונה.



משחק זה מאפשר לשני אחים או לילדים בגילאים שונים לשחק יחדיו. הצעיר יתחיל להרכיב את התמונה בצד עם החלקים הגדולים, והבוגר יתחיל להרכיב אותה מהצד השני עם החלקים הקטנים.

פיצה עם מרחום

סיפרנו קודם כיצד השיגה רשת דומינוס פיצה יתרון על מתחריה בזכות יצירת קשר בין מחיר הפיצה לזמן המשלוח. הטבלה הבאה תלמד על רעיון חדשני נוסף בתחום משלוחי הפיצה.

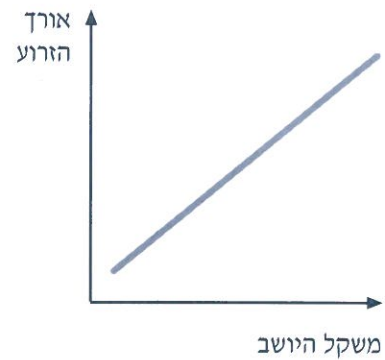
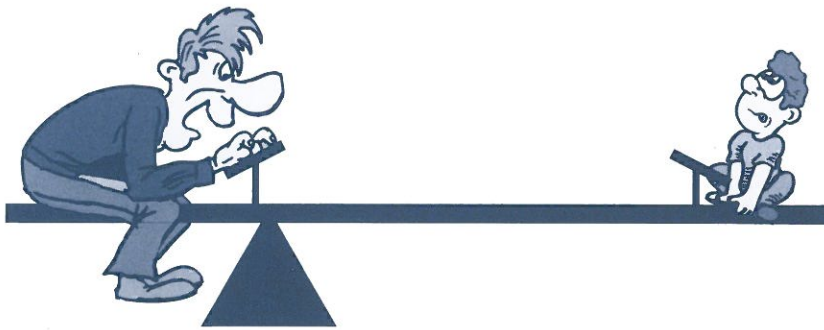


כעת נסו להגיע למוצרים חדשים המבוססים על המוצרים הבאים: נדנדה, כוס שתייה.

השוו את הרעיונות שלכם לרעיונות הבאים:

נדנדה

משתני הנדנדה: אורך הזרוע (מרחק מנקודת החיבור), צבע, גודל המושב וכד'.
משתני האדם: משקל, גובה וכד'.
הרעיון הוא לשבור את הסימטריה בין אורך הזרועות של הנדנדה. במקום נדנדה בעלת זרועות שאורכן זהה וקבוע, בונים נדנדה שבה ניתן להאריך זרוע אחת, ובמקביל לקצר את הזרוע השנייה.
ברעיון זה יוצרים קשר בין אורך הזרוע של הנדנדה למשקל האדם היושב עליה. הדבר מאפשר לנדנדה לשמש שני אנשים בעלי משקל שונה, למשל אב ובנו הקטן. האב יישב בצד של הזרוע הקצרה, ואילו הבן יישב בצד עם הזרוע הארוכה. את אורך הזרוע ניתן יהיה לשנות בהתאם למשקל המתנדנדים עליה.



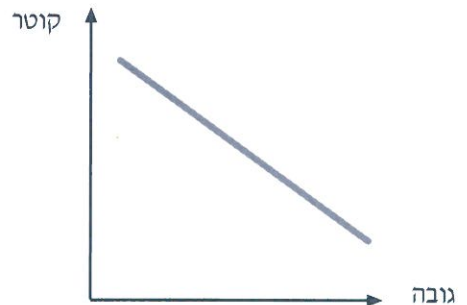
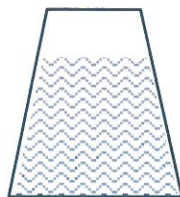
כוס שתייה

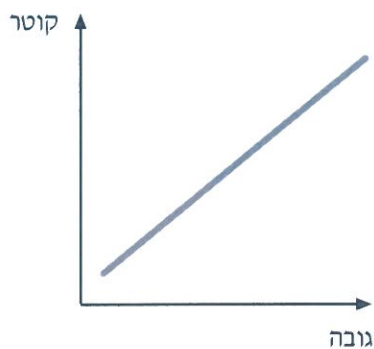
משתני הכוס: אורך (גובה), קוטר, סוג חומר, צבע, משקל, צורה.

תלות בין קוטר הכוס לגובהה, מאפשרת שלוש דרגות חופש:

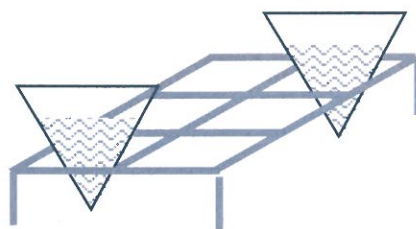
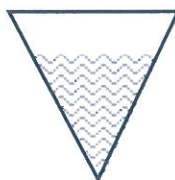
א. הקוטר קטן עם הגובה:

כוס זו נמצאת בשימוש במעבדות ומכונה ארלנמייר. הכוס יציבה והמבנה המיוחד שלה מונע מהנוזלים להישפך.





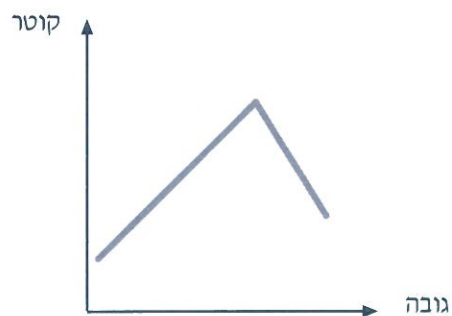
ב. הקוטר גדל עם הגובה:
 הכוס טובה לשימוש במיוחד במסיבות. האורחים נוטים לשכוח כוסות במקומות שונים ברחבי הבית. שימוש בכוסות שקוטר בסיסן קטן יחייב את האורחים להחזיר אותן למקומן, כיוון שלא יוכלו להניח אותם בכל מקום אלא רק במתקן מיוחד.



במסיבות קוקטיל משתמשים לפעמים בכוסות שמתבססות על רעיון דומה: המשקה מוגש במבחנות, ולאחר השתייה מניחים אותן האורחים במתקן מיוחד. הדבר מאפשר לאסוף את המבחנות, לנקותן ולהשתמש בהן שנית.

ג. הקוטר קטן עד גובה מסוים ואז הוא גדל:

יתרונה של כוס זו על הכוס הראשונה שתיארנו הוא בכך שהיא לא רק יציבה, אלא גם נוחה לאחיזה ולשתייה.



סיכום

קשרים בין משתנים הם מאפיינים יסודיים של מערכת. הקושי לערער על קשרים אלו גם הוא סוג של קיבעון. ככל שהקשרים שעליהם מערערים מוכרים יותר וככל שאנו מורגלים בהם, התוצרים שיתקבלו מיצירת קשרים חדשים יהיו יצירתיים יותר.

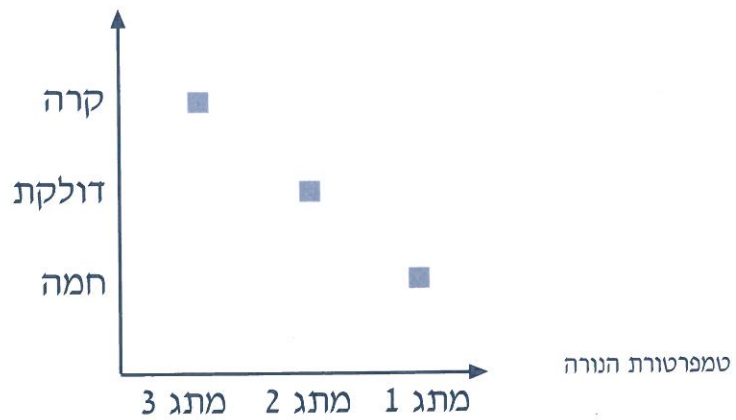
תכסיס השבירה מציע ליצור קשרים חדשים ולשנות קשרים קיימים, אך לא לנתק קשרים. ניתוק קשרים מחייב גם הוא להתגבר על קיבעונות שונים, ועשוי להוביל לרעיונות יצירתיים בדרכו הוא.

במסגרת הנתונה בחרנו שלא להרחיב על ניתוק הקשרים, אך הקוראים מוזמנים לנסות ולבחון את האפשרויות בכיוון זה.

פתרונות

מתגים ונורות

רשימת מרכיבים עיקריים: נורות, אדם, מתגים.
משתנים: מצב המתגים, מצב הנורות (כבוי, דולק), עוצמת האור, גודל הנורה, החום שנורה פולטת, גוון האור וכד'.
מגיעים לפתרון הבעיה על ידי יצירת תלות בין מצב המתגים לטמפרטורת הנורה. איך עושים זאת? פשוט מאוד, מנצלים את חום הנורה כדי לקבל מידע שקושר בין נורה למתג.
סדר הפעולות: מדליקים נורה אחת בעזרת המתג הראשון. כעבור חמש דקות מכבים את הנורה, מרימים את המתג השני, ונכנסים לחדר הנורות. הנורה הדולקת שייכת למתג השני, הנורה החמה לראשון והנורה הקרה למתג השלישי.

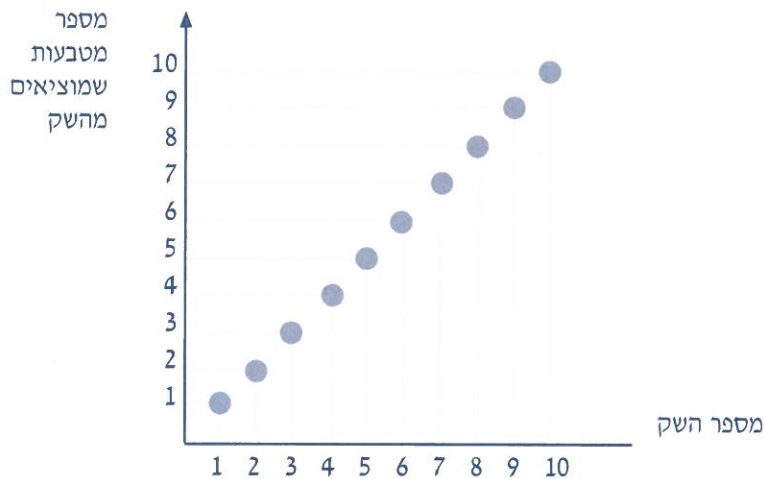


מטבעות מזויפים

ללא האילוץ של שקילה אחת, אפשר היה להוציא מכל שק מטבע אחד ולשקול מטבע בכל פעם עד למציאת שק המטבעות המזויפים. אך החידה מתירה שקילה אחת בלבד, ולכן פתרון זה אינו אפשרי.

בפתרון החידה יוצרים קשר בין מספר המטבעות שמוציאים מהשק ובין מספר השק.

מוציאים מכל שק מספר אחר של מטבעות: מהשק הראשון מטבע אחד, מהשק השני שני מטבעות וכך הלאה.



סך כל המטבעות שמוציאים מהשקים הוא:

$$1+2+3+4+5+6+7+8+9+10 = 55$$

אם אף אחד מהמטבעות אינו מזויף, המשקל הכללי צריך להיות 550 גרם. (כזכור, משקל כל מטבע לא מזויף הוא 10 גרם).

אם המשקל הכללי נמוך בגרם אחד מ-550 גרם, זאת אומרת שבין המטבעות ישנו מטבע מזויף אחד, ולכן שק המטבעות המזויפים הוא השק הראשון. אם חסרים שני גרם למשקל הכללי, זאת אומרת שבין המטבעות ישנם שני מטבעות מזויפים, ולכן השק עם המטבעות המזויפים הוא שק מספר שניים, וכך הלאה. פתרון הבעיה הושג הודות לקשר שיצרנו בין מספר המטבעות למספר השק. הקשר הזה איפשר לנו לקבל מידע נוסף על המערכת.

חוק היובש

מרכיבים עיקריים: סירה, בקבוקים, ארגזים, ים.



מעורבים כאן משתנים רבים. בשלב זה נתייחס רק לממדי הסירה, אורך הארגז, משקל הארגז, סוג המשקה שבבקבוק ונפח הבקבוק.

הצעה אחת לפתרון הבעיה היא ליצור תלות בין הזמן לסוג הנוזל שבבקבוק. כל עוד הבקבוקים נמצאים בסירה, המשקה יהיה ללא אלכוהול. כשיגיעו הארגזים ליעדם, הנוזל יהפוך לייין. אכן רעיון טוב, אך אין לנו מושג איך לממש אותו, ולכן ננסה ליצור קשר מסוג אחר.

העובדה שארגזי כבד שוקע בים ואילו ארגז קל צף מאפשרת ליצור תלות בין משקל הארגזים לזמן. מגדילים את משקל הארגז, כך שישקע ויוסתר בים, אז אפשר להעמיד פני דייגים תמימים כאשר תיערך ביקורת של משמר החופים. לאחר מכן, מקטינים את משקל הארגז, גורמים לו לצוף ואוספים אותו אל הסירה. איך בוצע הדבר? המבריחים קשרו לארגזי הבקבוקים גוש מלח גדול וכבד. בתחילה הארגז שקע בים. מאוחר יותר, לאחר שהמלח התמוסס במים, צף הארגז.

סוסי יאור

מרכיבי המערכת: בריכה, סוסי יאור, מים.

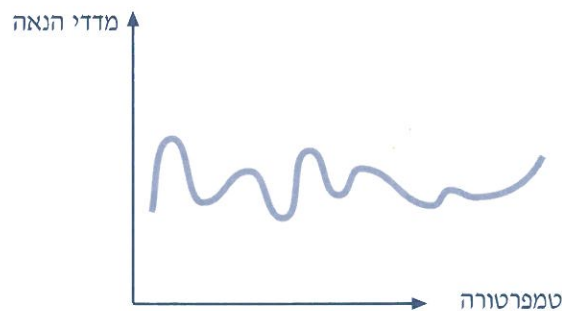
המשתנים:

מים: כמות, טמפרטורה.

בריכה: רוחב, עומק, מיקום לאורך הבריכה.

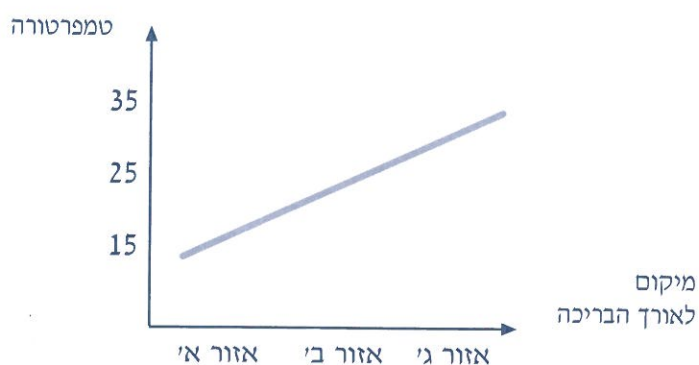
סוס היאור: משקל, כמות אוכל, מספר הזדווגויות.

החוקרים מנסים למצוא את הקשר בין ממדי ההנאה לטמפרטורת המים. למעשה החוקרים מנסים לבנות את הגרף הלא ידוע מהסוג שמתואר באיור:



הבעיה היא שמערך הניסוי מחייב להוציא ולהכניס את סוסי היאור מהכלוב מספר רב של פעמים.

פתרון הבעיה מושג על ידי יצירת קשר בין מיקום בבריכה לטמפרטורת המים. יוצרים אזורי חום שונים לאורך הבריכה, למשל, על ידי הצבת יריעות שחורות שבולעות את קרינת השמש בקרקעית הבריכה באזורים שבהם רוצים להעלות את טמפרטורת המים, ויריעות לבנות שאינן בולעות את קרינת השמש, באזור בו רוצים שטמפרטורת המים תהיה נמוכה.



תאור גרפי של הפתרון:

הפתרון מאפשר לשנות את הטמפרטורה ללא צורך להיכנס לכלוב ולהסתכן במפגש פנים אל פנים עם סוס יאור מרוגז.

הפתרון מתבסס על החלפת אחד המשתנים במשתנה אחר. במקום שהטמפרטורה תהיה תלויה בזמן (בכל יום מוציאים את סוסי היאור ומשנים את הטמפרטורה), יוצרים תלות חדשה, שבה הטמפרטורה שונה במקומות שונים בבריכה.

