

סיביות: ב. בעיית הפורמליזציה

בטור הקודם סקרתי במבט כללי את סוגיית הסיביות. בין היתר, עמדתי שם על כך שלעקרון הסיביות אין מקור אמפירי, וליחס הסיביתי אין בכלל ייצוג מתמטי-לוגי. בטוקבק הראשון העלה רועי יוזביץ לינק לראיון שהוא ערך עם פרופ' יהודה פרל, איש מדעי המחשב, ובו הם דנים ב**מאמר** שפרסם פרל שעוסק בדיוק בנקודה הזאת. טענתו העיקרית שם היא שהסתברות ואפילו הסתברות מותנה ותמונה בייסאנית לא יכולות לייצג יחס סיביתי. לאחר מכן הוא מציע פורמליזם שכן יכול לייצג סיביות. בטור הזה אשתמש במודל שלו כדי לחדד את טענותי מהטור הקודם.

מדדים הסתברותיים לסיביות

ההסתברות מציעה אומדן כמותי למשקלן של אפשרויות שונות בנסיבות שכוללות אי ודאות. לדוגמה, בהטלת קובייה יש שש תוצאות אפשריות, ולכן יש אי ודאות לגבי התוצאה הצפויה. תורת ההסתברות מציעה לנו אומדן כמותי לכל אחת מהאפשרויות, ובמקרה של קובייה הוגנת המשקל הוא $1/6$ לכל תוצאה. ההסתברות כשלעצמה כמובן אין לה דבר וחצי דבר עם סיביות. אם רוצים להתקרב יותר למושגים של סיביות וקשר בין אירועים, ניתן לדבר על קורלציה.

קורלציה בין שני אירועים A ו- B מודדת את הקשר ביניהם. אם אין קשר בין האירועים אז התרחשותו של האחד לא משפיעה על השני, ומשמעות הדבר היא שההסתברויות בלתי תלויות. את ההסתברות של אירוע מורכב, כלומר ההסתברות שהתרחש גם A וגם B מסמנים: $P(A*B)$. במקרה שאין תלות בין האירועים אזי מתקיים השוויון: $P(A*B) = P(A)P(B)$. כאשר יש קשר בין האירועים הללו השוויון לא מתקיים, ומידת הקשר בין האירועים נקבעת לפי היחס בין שני צדי המשוואה הזאת (ככל שהם רחוקים יותר זה מזה הקשר בין האירועים חזק יותר).

אם רוצים להתקרב עוד יותר לתיאור של יחס סיביתי, מקובל לחשוב שעלינו להשתמש בהסתברות מותנה ובנוסחת בייס. בטור [402](#) הגדרתי את ההסתברות המותנה והצגתי את נוסחת בייס (ראו גם טורים [144-145](#) ועוד). בקצרה, הסתברות מותנה מתארת שינוי בהסתברות כאשר נוספת לנו אינפורמציה. לדוגמה, ההסתברות לתוצאה 5 בקובייה הוגנת היא: $P(A)=1/6$. אבל אם ידוע לנו עוד מידע, למשל שהתוצאה בהטלה הייתה גדולה מ-1 (נסמן את המידע הזה ב- B), אזי ההסתברות שקיבלנו 5 גדלה כמובן: $P(A/B)=1/5$. תרגום: ההסתברות לקבל 5 בהינתן שהתוצאה גדולה מ-1 היא $1/5$. אם ידוע לנו שהתוצאה הייתה אי זוגית (C), אזי ההסתברות המותנה לקבל 5 במקרה כזה היא: $P(A/C)=1/3$. ועדיין ברור שהסתברות מותנה אינה בהכרח סיבית. קשה לומר שהעובדה שהתוצאה היא אי זוגית היא הגורם הסיביתי לכך שיצא 5 (ולא רק בגלל שההסתברות המותנה במקרה זה אינה 1).

לפעמים תוכלו לשמוע או לקרוא את הטענה שקורלציה אמנם אינה סיבית (ראו בטור הקודם), אבל הסתברות מותנה כן נקשרת לסיביות. כך, לדוגמה, ישנו קשר סיביתי בין גשם (A) לעננים (B), ומשמעות הדבר היא שההסתברות הכללית לגשם $P(A)$ קטנה יותר מההסתברות לגשם אם ידוע שהיו עננים: $P(A/B)$. אמנם גם אם יש עננים לא בהכרח יורד גשם, ולכן ההסתברות המותנה אינה 1.

מה תאמרו על ההסתברות המותנה ההפוכה: $P(B/A)$? אם יש גשם אז בבירור יש עננים. לכן זו אכן שווה ל-1. אבל אף אחד לא יאמר שהגשם הוא סיבת העננים (הוא אינדיקציה להם). ראו דוגמת השומן והדיאטה בטור הקודם). באופן לוגי נאמר שהגשם הוא תנאי מספיק לעננים אבל לא הסיבה שלהם. זה משקף טענה נוספת שפגשנו בטור הקודם, ולפיה הלוגיקה אדישה לציר הזמן, וכעת אנחנו נוכחים בכך שגם ההסתברות כך. הנוסחה ההסתברותית אדישה לשאלה מי הסיבה ומי המסובב, והיא בודקת רק את הקשר ביניהם. כלומר גם הסתברות מותנה אינה מדד טוב לסיביות. גם בדוגמה הקודמת (של תוצאות הקובייה) ראינו שהסתברות מותנה אינה מבטאת בהכרח קשר סיביתי.

אמנם קשר סיביתי בין אירועים ניתן לתיאור במונחי הסתברות מותנה. לדוגמה, נניח ששפשוף גפרור (B) גורם בהכרח (כלומר הוא תנאי מספיק) להצתת אש (A), אזי ניתן לומר שההסתברות המותנה $P(A/B) = 1$. אם הוא לא גורם בהכרח עדיין ניתן לומר שההסתברות המותנה $P(A/B)$ גדולה יותר

מההסתברות הלא מותנה $P(A)$ אבל היא אינה שווה ל-1. גם במקרה כזה יש קשר סיבתי בין האירועים, אלא שהוא תלוי גם בנסיבות.

הצעתו של פרל

בפרק 4.1 של מאמרו, פרל דן בשאלה האם השפה ההסתברותית בתוספת ציר הזמן מספיקה כדי לתאר הסתברות. הוא מתאר שם את הגישה המקובלת, שלפיה אכן שני המרכיבים הללו מספיקים כדי לתאר יחס סיבתי. אבל, הוא טוען, בניגוד למה שחושבים רבים, התשובה לכך היא שלילית (בדיוק כפי שטענתי בטור הקודם).

הדוגמה שהוא מביא שם כדי לחדד את ההבדל היא הבאה. נניח שמתג X מדליק שתי נורות, Y ו- Z . נניח שהמרחק של הנורות מהמתג הוא מאד שונה, ולכן הנורה Z נדלקת שנייה לפני הנורה Y . כאשר נדליק את המתג X , אחרי זמן כלשהו תידלק הנורה Z ושנייה אחר כך תידלק הנורה Y . כעת השוו זאת למצב הבא: המתג X מדליק את הנורה Z וזו בתורה מדליקה את הנורה Y . מבחינת הקשרים הלוגיים והזמניים שתי הסיטואציות הן זהות, אבל ברור שבהסתכלות סיבתית אין זהות בין שני המצבים. המצב הראשון ניתן לתיאור הבא: $Z \leftarrow X \rightarrow Y$, ואילו המצב השני עונה לתיאור אחר: $X \rightarrow Z \rightarrow Y$. את ההבדל בין שתי הסיטואציות קל מאד להדגים דרך בדיקת פעולות של התערבות. לדוגמה, אם אני מתערב באופן מלאכותי ומכבה את הנורה Z , במקרה הראשון זה לא ישפיע על הנורה Y , אבל במקרה השני זה יכבה גם את Y . פירוש הדבר שבמקרה הראשון אין יחס סיבתי בין Z ל- Y (אלא רק קורלציה) ובמקרה השני יש.

במינוח שלי ניתן לתאר את מסקנתו כך: כדי לתאר את היחס הסיבתי באופן מלא, יש להוסיף ללוגיקה (וההסתברות) ולזמן גם את האלמנט הפיזיקלי (הגרימה). החיצים בתיאורים כאן מבטאים את המרכיב השלישי הזה. פרל משתמש בייצוג הזה כדי להציע פורמליזם שיתאר בצורה טובה יותר את היחס הסיבתי.

בלי להיכנס לפרטים מתמטיים, בפרק 3.2 של מאמרו פרל מציע להשתמש בתיאור דומה לזה של החיצים, במקום התיאורים הלוגיים וההסתברותיים המקובלים. הוא מגדיר פונקציות שם סיבתיות שמתחשבות גם בתנאי הסביבה (בנסיבות), וכך ניתן גם להכניס את מידת ההשפעה. למשל, עננים (B) אמנם יוצרים גשם (A), אבל כפי שראינו אי אפשר לסמן $B \rightarrow A$ במובן הסיבתי (שאם יש B אז בהכרח יש גם A), שהרי זה תלוי בנסיבות נוספות (מזג אוויר, אופי העננים, הלחות וכדומה). לכן הוא מסמן זאת כפונקציה $A = f_A(B, w)$. פירוש הדבר הוא שיש פונקציה f_A , שמקבלת כקלט את הנסיבות (w) ואת העננים (B), וקובעת האם יהיה גשם (A). אבל אל לכם לטעות. לא מדובר בסימון מתמטי רגיל של פונקציה, שכן כפי שראינו בטור הקודם השוויון המתמטי לא יכול לעשות את העבודה כי אין לו כיוונית. אצל פרל ה"שוויון" הזה פועל רק לכיוון אחד, מימין לשמאל. משמעות הדבר היא שאם נשנה באופן מלאכותי את A (נוריד גשם ממטוס) זה לא אומר שמשהו בערכי הפונקציה השתנה. במילים אחרות, לא מדובר כאן בשוויון אלא בגרירה סיבתית, זו שסומנה למעלה בחץ.

שתי בעיות

אני רואה שתי בעיות עיקריות בהצעתו של פרל. האחת היא שאין בה התקדמות לקראת טיפול מתמטי בסיבתיות. והשנייה שהיא אינה לוכדת באמת את מושג הסיבתיות במלואו. כעת אפרט אותן יותר. השאלה שעולה אצלי תמיד כשאני פוגש סימול לוגי-מתמטי לתופעה כלשהי היא האם הרווחנו משהו מהסימון הזה. עד עכשיו אמרנו שיש יחס סיבתי בין (B, w) לבין A , ולא הייתה לנו דרך לסמל זאת. פרל מציע שבמקום לומר שיש יחס סיבתי נסמל אותו בחץ או בפונקציה חד כיוונית. במה מועיל הסימון הזה? לגבי פונקציות רגילות צברנו הרבה מאד ידע על משמעותן והאופן להשתמש בהן. לכן יש היגיון לתאר תופעות טבעיות באמצעות פונקציות מתמטיות, והרווח מהסימון הזה הוא ברור. אבל כאן רק תרגמנו מילה בעברית לסימול לוגי-מתמטי, ולכן אני רואה מה הרווחנו מכל הסיפור. לניתוח המקדים של פרל יש ערך כמובן, שכן הוא מראה שסימול מתמטי ולוגי לא מצליח להתמודד עם תופעות של סיבתיות, אבל ההצעה הקונסטרוקטיבית שלו לדעתי לא באמת מביאה תועלת לדיון. עד

עכשיו חשבנו שבמקום המתמטיקה צריך לדבר עברית, וכעת מסמנים מילה עברית בחץ. איני רואה מה הרווחנו מזה. זוהי הבעיה הראשונה שאני רואה בהצעתו של פרל.¹

הבעיה השנייה שעולה כאן נוגעת לשאלה האם הפורמליזם הזה באמת לוכד את מושג הסיבתיות במלואו. אם תתבוננו בדוגמה של המתג ושתי הנורות שהובאה למעלה, תראו שפרל מתייחס ליחס הסיבתי דרך התופעות שלו. הוא מבחין בין קורלציה לסיבתיות דרך פעולת ההתערבות (פעולה של do בלשוננו). אבל כפי שהזכרתי בטור הקודם דייוויד יום הציב בעיה פילוסופית חמורה יותר לגבי היחס הסיבתי: שאין לו מקור אמפירי, כלומר שלא ניתן לאבחן אותו דרך תופעות והתרחשויות בעולם. כזכור, יום טען שגם אם רואים שבעיטה גורמת לכדור לעוף או שעננים (בנסיבות נתונות w) גורמים לגשם, אין לנו דרך אמפירית לוודא שאכן מדובר כאן ביחס של גרימה ולא בקורלציה גרידא. זו בעיה פילוסופית-מדעית ולא בעיה של סימול מתמטי-לוגי. גם אם הסימול שמציע פרל פותר את הבעיה הפורמלית, הוא מותיר על כנה את הבעיה המדעית. אין לנו דרך לבטא בצורה מתמטית את הטענה שבין A ל- B קיים יחס של גרימה, כלומר שהאחד מחולל את השני. לכל היותר ניתן לבטא את העובדה ששינוי של A ישנה את B , אבל זו עדיין התייחסות ששייכת למישור הפנומנולוגי ולא לזה המהותי. הקשר בין התופעות הוא עובדה פנומנלית (היא עוסקת בתופעות וביחס ביניהן), אבל היא לא נוגעת בסיבתיות במובנה הפילוסופי המהותי.

במילים אחרות, הוויכוח עם יום לגבי טיבו של היחס הסיבתי לא יוכרע בכלים הפורמליים שמציע פרל, וספק אם הוא יכול להיות מוכרע בצורה כזאת בכלל. הכלים הללו מבטאים הבדל בין קורלציה לבין סיבתיות פנומנלית, אבל לא נוגעים בסיבתיות מהותית. ייתכן שאין דרך פורמלית לטפל בסיבתיות מהותית. מה שמדע ומתמטיקה יכולים לעשות זה לכל היותר לטפל בתופעות ובהתרחשויות בעולם ובקשרים הלוגיים והזמניים ביניהן. הסיבתיות שמחוללת את הקשרים הללו (במינוח קאנטיאני: הנואומנה, בניגוד לפנומנה) שייכת למטפיזיקה ולכן אינה נגישה לתצפית ולא למדע וליסימול מתמטי.

כדי להבין זאת, נתבונן בחוק הגרביטציה. חוק זה מתאר תנועה של גוף בעל מסה m תחת השפעתו של גוף אחר בעל מסה M שנמצא במרחק r ממנו. חוק הגרביטציה מתאר את התאוצה של הגוף m בהינתן המסה האחרת M (שהיא הגורם B) בנסיבות הנתונות (המרחק r , והיעדר מסות אחרות והשפעות נוספות), אבל אי אפשר להוציא ממנה את קיומו של כוח גרביטציה שמחולל את התנועה הזאת. התנועה של m מצויה בקורלציה עם קיומה של מסה M , וזהו תיאור במישור הפנומנלי. אבל הכוח הוא הגורם הסיבתי לתנועה, והמשוואה שקושרת את התאוצה עם הנתונים (r - M) אפילו לא רומזת על קיומו.² הטענה שיש כוח שגורם לתאוצה הזאת היא פרשנות שלנו לחוק הגרביטציה, בדיוק כמו שהטענה שהכוח גורם לתאוצה ולא להיפך, היא פרשנות שלנו לחוק השני של ניוטון (ראו על כך בטור הקודם).

ההערה השנייה אינה בהכרח ביקורת על הצעתו של פרל. התכוונתי רק לחדד את ההבדל בין המישורים (הפנומנלי והמהותי) ואת האלמנט הנוסף שיש ביחס הסיבתי מעבר לזמן וללוגיקה שנוגעים רק במישור הפנומנלי. טענתי היא שפורמליזם מתמטי ולוגי, כולל זה שמציע פרל, לא מצליח לתאר את הממד הפיזיקלי של הסיבתיות.

סיכום

הראיתי כאן שיש בעיה מהותית בפורמליזציה לוגית או מתמטית של היחס הסיבתי. זו לא טענה נגד תפיסה סיבתית כזו או אחרת. להיפך, טענתי היא שלמרות שתפיסתו של יום את היחס הסיבתי אולי ניתנת לפורמליזציה ואילו תפיסתי סובלת מחוסר יכולת לפורמליזציה, הדבר אינו פוסל את תפיסתי ולא

¹ יש לציין שפרל הוא איש מדעי המחשב, ומטרתו המוצהרת היא לאפשר למחשב לטפל ביחסים סיבתיים. הוא לא מציע פתרונות לבעיות פילוסופיות או מדעיות. במובן הזה הצעתו אמורה להיבחן תוצאתית. ייתכן שסימול כזה נגיש יותר להצגה לוגית ולפורמליזציה עבור מחשב. במובן הזה, ייתכן שהבעיה שתיארת כאן אין בה משום ביקורת על הפורמליזם שלו, אבל לענייננו הניתוח הזה חשוב כדי לחדד את טענותיי שלי לגבי היחס הסיבתי, הצורך בכל שלושת המרכיבים וחידוד תפקידו של המרכיב השלישי (הגרימה, מה שכיניתי בטור הקודם 'המרכיב הפיזיקלי').

² אמנם במכניקה מדברים על כוח הגרביטציה, אבל זו לכל היותר הגדרה. במקום לומר שמסה M גורמת למסה m להאיץ בתאוצה a , אומרים שהמסה M מפעילה עליה כוח בעוצמה של ma . אין לנו דרך לדעת שפועל כאן כוח אלא דרך העובדה שמתפתחת תאוצה. זה לא נגיש לתצפית. כבר הערתי לא פעם על כך שמציאת גרביטונים אולי תשנה את המצב, כמו שהפוטונים הם ביטוי לכוח (השדה) האלקטרומגנטי. אבל קיומם של גרביטונים הוא פרשנות למשוואה, וגם אם זה יאושר, זו אינה תוצאה של השוויון בחוק הגרביטציה של ניוטון.

מוכיח או מאשש את תפיסתו. זה רק אומר שיש משהו בסיבתיות שאינו שייך לרובד המדעי-מתמטי אלא לרובד הפילוסופי. כשאני אומר שהכוח הוא סיבתה של התאוצה זוהי פרשנות ולא קביעה מדעית. היא לא עולה מהמשוואה אלא מפרשנותנו אליה.

המדע יכול להסתדר גם בלי הפרשנות הזאת. מדען רוצה לדעת האם פועל או לא פועל כוח, ולפי החוק השני של ניוטון קיומה של תאוצה מוכיח שפועל כאן כוח, גם אם התאוצה אינה סיבתו של הכוח (מה שאינו נכון אפילו לפי הפרשנות המקובלת שלפיה הכוח הוא סיבת התאוצה). מדען רוצה לחזות רעידת אדמה, ולשם כך די לו במציאת קורלציות וסיבתיות נוסח יהודה פרל, כלומר עליו למצוא מה אמור להופיע לפני הרעידה שיכול לנבא את התרחשותה. האם הדבר הזה הוא סיבתה של הרעידה או לא, זו שאלה של פרשנות ולכן היא אינה מדע טהור אלא יותר פילוסופיה. המדע מסתדר גם בלעדיה. חשבו על דוגמת הנורות של פרל. מדען ירצה לנבא האם הנורה Y תדלק או לא, ולשם כך די לו בהכרת התנאים המקדימים גם אם אלו אינם סיבות במובן הפיזיקלי-פילוסופי המלא. אבל אני לא רואה בזה כשלעצמו הסבר להידלקותה של הנורה. הסבר לאירוע כלשהו דורש הצבעה על הסיבה להתרחשותו. לכן כדי לדבר על הסבר להידלקות הנורה עלינו להוסיף לקורלציות שמצאנו אמפירית וסימלנו פורמלית, את הפרשנות הסיבתית.