



בלבולי מוח: הייצוג המוחי של התנהגות לא רציונלית



ורד קורץ-דוד

דוֹתָן פֶּרֶסִיץ

דינו לוי

פרופ' דינו לוי הוא חבר סגל בפקולטה לניהול ע"ש קולר וחבר בית הספר סגול למדעי המוח באוניברסיטת תל אביב. הצטרף לסגל הפקולטה כחוקר בתחום הניויר-שיווק והניויר-כלכלה. בעל תואר ראשון בכלכלה מאוניברסיטת תל אביב, וסיים בהצטיינות את התואר השני בפסיכוביולוגיה באוניברסיטת תל אביב. סיים דוקטורט ב-2008 במכון ויצמן למדע במחלקה לניוירוביולוגיה בנושא של מודלים מוחיים בהתמכרות לסמים. המשיך לפוסט דוקטורט במרכז לחקר המוח ב-NYU. מחקרו עוסק בהבנת המנגנונים המוחיים של ייצוג ערך במוח והקשר בין המערכת התפיסתית למערכת קבלת ההחלטות. זהו מחקר בין-תחומי המשלב תיאוריות כלכליות עם תיאוריות מחקר המוח, מפסיכולוגיה ומשיווק.

ד"ר דוֹתָן פֶּרֶסִיץ הוא חבר סגל בפקולטה לניהול ע"ש קולר באוניברסיטת תל אביב. סיים דוקטורט ב-2010 בבית הספר לכלכלה ע"ש איתן ברגלס באוניברסיטת תל אביב. בשנים 2010-2012 היה פוסט דוקטורנט במחלקה לכלכלה באוניברסיטת בריטיש קולומביה בקנדה. מחקרו עוסק בשימוש בתיאוריה של ההעדפה הנגלית על מנת לחשוף את המנגנונים שבהם משתמשים מקבלי החלטות בשדה ובמעבדה. בנוסף הוא משתמש בתורת המשחקים כדי להבין את העקרונות המובילים את התארגנות הפרטים ברשתות חברתיות ואת מעבר האינפורמציה על גבי רשתות אלו.

ד"ר ורד קורץ-דוד סיימה לאחרונה את תוכנית הדוקטורט בפקולטה לניהול ע"ש קולר באוניברסיטת תל אביב וכיום פוסט-דוקטורנטית במכון למדעי המוח של הפקולטה לרפואה באוניברסיטת ניו יורק. את עבודת הדוקטורט כתבה תחת הנחייתו של פרופ' דינו לוי במעבדה לניויר-כלכלה ולניויר-שיווק. במחקרה מבקשת להתחקות אחר הייצוג המוחי של התנהגות כלכלית, ולשם כך חוקרת מודלים מכלכלה התנהגותית תוך שימוש בכלי הדמיה מוחית דוגמת fMRI. סיימה בהצטיינות תואר ראשון בתוכנית המשולבת בכלכלה, מדע המדינה ובפילוסופיה (פכ"מ) של האוניברסיטה העברית.

תקציר

התיאוריה הכלכלית מניחה במקרים רבים כי מקבלי החלטות עקביים בבחירותיהם ("רציונליים"). עם זאת, במרוצת השנים הצטברו עדויות רבות לכך שהתנהגותם של מקבלי החלטות אינה עולה בקנה אחד עם הנחה זו. הספרות בניויר-כלכלה מנסה להסביר התנהגות זו באמצעות כלי מחקר ממדעי המוח, המתחקים אחר הפעילות המוחית בזמן תהליך קבלת ההחלטות. בסקירה זו אנו מציגים שורה של ממצאים הקושרים בין התנהגות לא רציונלית שכזאת לבין הפעילות באזורי קבלת החלטות במוח. אנו טוענים כי במקרים רבים, סטיות מהתנהגות עקבית נובעות מהמגבלות הפיזיולוגיות של המוח.

ברצוננו להודות למרכז לחקר התנהגות צרכנים ע"ש סלומון לו על תמיכתו במאמר זה.



מבוא

הדמיוניים הללו). לצורך הבהירות ופשטות ההצגה אנו מניחים כי שלושתם, כמו גם שאר הפרטים שבהם נדון, לעולם אינם אדישים בין שני סלים. נתחיל באלישבע (השורה העליונה בטבלה מספר 1). בהחלטתה הראשונה אלישבע מתבקשת לבחור בין הסלים A ו-B ובחרת את הסל A. בהחלטתה השנייה אלישבע מתבקשת לבחור שוב בין הסלים A ו-B ובחרת הפעם את הסל B. אנו אומרים שאלישבע איננה עקבית משום שבאותה בעיה בחרה שתי אלטרנטיבות שונות, זוהי סתירה פנימית ישירה שנקראת בספרות במקרים רבים "היפוך העדפות". נעבור עתה לבנימין (השורה האמצעית בטבלה מספר 1). בהחלטתו הראשונה בנימין מתבקש לבחור בין הסלים A, B ו-C ובחר את הסל A. בהחלטתו השנייה מתבקש בנימין לבחור בין הסלים A, B ו-D ובחר את הסל B. אם כן, גם בחירותיו של בנימין מובילות לסתירה פנימית ישירה – בבחירתו הראשונה הוא העדיף את A על סל B, ואילו בבחירתו השנייה העדיף את B על סל A (שימו לב כי הפעם הבעיות היו שונות זו מזו). לסיום חלק זה נביט בהחלטותיה של גלית (השורה התחתונה בטבלה מספר 1). בהחלטתה הראשונה גלית מתבקשת לבחור בין הסלים A ו-B, ובחרת את הסל A. בהחלטתה השנייה מתבקשת גלית לבחור בין הסלים A ו-C, ובחרת את הסל B, ואילו בהחלטתה השלישית בחרת גלית את הסל C מבין הסלים A ו-C. גלית איננה עקבית משום שבחירותיה כוללות סתירה פנימית עקיפה – בבחירתה הראשונה הראתה גלית שהיא מעדיפה את A על סל B, ואילו בבחירתה השנייה הראתה

בני אדם נדרשים ללא הרף לקבל החלטות כמנהלי משקי בית, כצרכנים, כבעלי תפקיד בארגונים ואף כקובעי מדיניות. לעיתים קרובות, למרות המאמץ המושקע בקבלת ההחלטות והניסיון שרוכשים מקבלי ההחלטות לאורך חייהם, ההחלטות המתקבלות אינן עקביות זו עם זו, ומקבל ההחלטות מתואר כלא רציונלי. במאמר זה נסקור את העדויות אודות המתרחש במוח בעת קבלת החלטות שאינן עקביות. אנו נטען כי קיימות עדויות ראשוניות לכך שחלק לא מבוטל מחוסר הרציונליות המופנן בקבלת החלטות אנושית נובע מהתכונות הפיזיולוגיות של המוח.

עקביות ורציונליות

בספרות הכלכלית, קבלת החלטה מתוארת במקרים רבים כבחירה של סל¹ מתוך קבוצה של סלים אפשריים. על מנת להבין מהי עקביות, נבחן תחילה את החלטותיהם של שלושה מקבלי החלטות דמיוניים – אלישבע, בנימין וגלית (טבלה מספר 1 להלן מסכמת את החלטותיהם של מקבלי ההחלטות

1 סל הוא רשימה של מוצרים וכמויות מכל אחד ממוצרים אלה. למשל, סל הכולל שלוש עוגיות ושתי כוסות חלב או סל המכיל שש עוגיות ואפס כוסות חלב. סל יכול להכיל מוצרי צריכה (כמו בדוגמה עם העוגיות והחלב), חלוקת הכנסות בין פרטים (כמה אני מקבל וכמה מקבל האחר), תיק השקעות בנכסים שונים וכדומה.

דוגמה	סוג ההפרה	סלים לבחירה	מספר החלטות	מקור ההפרה
אלישבע	ישירה	B, A	2	החלטה ראשונה: A מול B. נבחר A. החלטה שנייה: A מול B. נבחר B.
בנימין	ישירה	D, C, B, A	2	החלטה ראשונה: A מול B מול C. נבחר A. החלטה שנייה: A מול B מול D. נבחר B.
גלית	עקיפה	C, B, A	3	החלטה ראשונה: A מול B. נבחר A. החלטה שנייה: B מול C. נבחר B. החלטה שלישית: A מול C. נבחר C.

שהיא מעדיפה את סל B על סל C, ולכן ניתן להסיק שהיא מעדיפה את הסל A על הסל C. עם זאת, בבחירתה השלישית היא בוחרת את סל C על פני סל A. לכן, אנו נאמר כי **מקבל החלטות הוא עקבי אם החלטותיו אינן כוללות סתירה פנימית ישירה או עקיפה**.

עדויות לחוסר עקביות

התיאוריה הכלכלית הניאו-קלאסית מניחה שמקבלי החלטות הם עקביים. הנחה זו היא רבת חשיבות משום שהיא מאפשרת לתאר את העדפות הפרטים בעזרת פונקציית תועלת מתמטית אבסטרקטית ואת בחירותיהם כתוצאה של מקסום פונקציה זו על פני קבוצת האפשרויות². אולם כבר משנות החמישים של המאה הקודמת החלו להצטבר בספרות הפסיכולוגית ובספרות הכלכלית עדויות אמפיריות רבות לחוסר עקביות בקבלת החלטות.

המתודולוגיה שבה השתמשו רבים מהמחקרים הללו היא שימוש במניפולציה על מנת "לייצר" סתירות בקרב בחירות של נבדקים. דוגמה מפורסמת למניפולציה שכזו היא סדרת ניסויים שבהם נשאלת אותה שאלה באופנים שונים במטרה להדגים את "אפקט המסגור" (Framing Effect). כך למשל, עמוס טברסקי ודניאל כהנמן (Tversky & Kahneman, 1981) הציגו לנבדקים בחירה בין שתי תרופות שיעילותן מתוארת פעם אחת על רקע חיובי (הצלת חיים), ופעם אחרת על רקע שלילי (אובדן חיים). הם הראו כי אופן ההצגה השפיע דרמטית על החלטות הנבדקים.

בה בעת, בשנים האחרונות התחזרר כי נבדקים עשויים להפגין חוסר עקביות גם כאשר הם אינם נתונים למניפולציה מחקרית. כך למשל, שורה ארוכה של ניסויים שבהם נבדקים התבקשו לבחור סל מועדף בהינתן תקציב ומחירים, הראתה שנבדקים מפגינים במקרים רבים התנהגויות שאינן עקביות כאשר השוני בין השאלות הוא רק במחירי המוצרים ובתקציב הנתון. ממצא זה נמצא עמיד בהקשרים שונים – בחירות בין תיקי השקעה (Choi, Fisman, Gale, & Kariv, 2007; Choi, Kariv, Müller, & Silverman, 2014), בחירות בין סלים של מוצרי צריכה (Burghart, Glimcher, & Lazzaro, 2013; Chung, Tymula, & Glimcher, 2017; Harbaugh, Krause, & Berry, 2001) ואף בבחירות בין חלוקות שונות של הכנסות (Andreoni & Miller, 2002; Fisman, Jakiela, Kariv, & Markovits, 2015; Raymond Fisman, Kariv, & Markovits, 2007).

התיאוריה הכלכלית מנסה להתמודד עם תופעות אלה במגוון דרכים. משפחה אחת של תיאוריות טוענת כי לפרטים יש כמה מערכות שונות של העדפות, ובכל בחירה באה לידי ביטוי רק אחת מהן³. משפחה נוספת של תיאוריות מתמקדת בקושי הקוגניטיבי הכרוך בקבלת החלטות, וטוענת שהפרטים מפשטים את תהליך הבחירה באמצעות שימוש בהייריסטיקות או באמצעות צמצום (לעיתים שרירותי) של קבוצת האפשרויות הנשקלות⁴. משפחה שלישית של תיאוריות מתמקדת בטעויות ובהטיות של צרכנים בכל הנוגע להבנת מחירים⁵. כל אחת

3 למשל Random Utility Models.

4 למשל Rational Inattention Models.

5 ראו למשל את הספרות הענפה אודות ההשלכות ההתנהגותיות של תמחור ה-99 (סנט, אגורות, שקלים, דולרים וכו') המקובל בשווקים רבים (Morwitz, Greenleaf, & Johnson, 1998; Thomas & Morwitz, 2005).

2 בספרות הכלכלית מופיעים גם נימוקים נורמטיביים בשבח העקביות המתמקדים בכך שחוסר עקביות מצביע במקרים רבים על חוסר אופטימליות בניצול ובהקצאת המשאבים.

טבלה 2: אזורי קבלת החלטות במוח

שם האזור	קיצור	חלק במוח	תפקיד בקבלת החלטות
Ventromedial Prefrontal Cortex, mPFC	vmPFC	אונה קדמית	תחשיב ערך סובייקטיבי, קידוד החלטות חברתיות ומוסריות
Dorsal lateral prefrontal cortex	dLPFC	אונה קדמית	קידוד החלטות מוסריות, קידוד יתרונות וחסרונות בדילמות
Ventrolateral prefrontal cortex	vlPFC	אונה קדמית	קידוד של עמימות (הסתברויות לא ידועות) בתנאי אי ודאות, קידוד של החלטות עבר המשפיעות על ההחלטה הנוכחית
Dorsal anterior cingulate cortex	dACC	חגורת הקורטקס במרכז	ניטור קונפליקטים בין שתי אלטרנטיבות, החלת מנגנוני ריסון (control), זיהוי בדיעבד של טעויות שנעשו בבעיות הכרעה בינאריות
Posterior cingulate cortex	PCC	חגורת הקורטקס במרכז	אינטגרציה של מספר מקורות מידע
Ventral striatum	vStr	גרעיני הבסיס	תחשיב ערך סובייקטיבי, קידוד ציפייה לתגמולים

מגבלות אלה יכולות להשפיע על בחירת אופן ואורך החשיפה האופטימליים של צרכן למסר של הפירמה. בנוסף, עניין רב בקרב מנהלים אלה עשוי לעורר זיהוי, בעזרת מזדים מוחיים, של בחירות לא עקביות. התעלמות מבחירות שכאלה, המטות את הנתונים, עשויה לשפר באופן דרמטי את איכות הניבוי של בחירות עתידיות של הצרכן בהינתן בחירותיו בעבר. לבסוף, הבנת ההתנהגות הסטוכסטית של המוח, שעליה נרחיב בהמשך, עשויה לשרטט עבור המנהלים ואנשי השיווק את גבולות יכולת ההבנה שלהם של התנהגות צרכנים (ואולי גם את גבולות יכולת ההשפעה שלהם על התנהגות זו).

ייצוג קבלת החלטות במוח

כדי לסקור את התשובות הראשוניות לשאלת ייצוג חוסר העקביות במוח, תחילה עלינו לתאר בקיצור נמרץ את הידוע על הייצוג של קבלת החלטות במוח. בשני העשורים האחרונים הצליחו מדעני מוח לזהות מספר אזורים מוחיים הקשורים בקבלת החלטות. טבלה מספר 2 מפרטת את הידוע היום לגבי האזורים השונים הרלוונטיים לתהליכי קבלת החלטות ואת התפקידים המרכזיים של כל אחד מאזורים אלה. החוקרים הצליחו לזהות כי בשניים מן האזורים הללו, המסומנים באיור מספר 1, מתבצע חישוב הערכים הסובייקטיביים שהפרט משייך לפרסים או לתגמולים מסוגים שונים: ה-vStr וה-vMPCF (Bartra, McGuire, & Kable, 2013; Clithero) vmPFC (& Rangel, 2013; Levy & Glimcher, 2012).

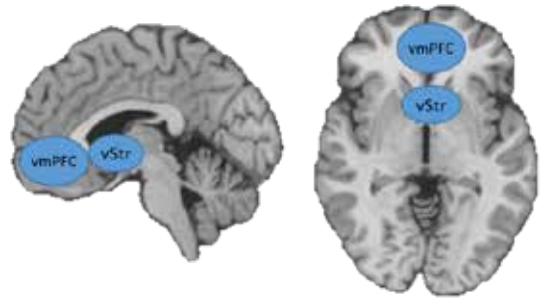
מהתיאורים הללו מאפשרת להסביר סוגים רבים של חוסר עקביות בקרב מקבלי ההחלטות⁶.

ייצוג חוסר העקביות במוח

שאלה מיידיית שעולה מהממצאים אודות חוסר עקביות נוגעת לתפקידו של המוח בתהליך קבלת ההחלטות. בפרט, כשלב ראשון בבירור המנגנונים שמובילים להחלטות לא עקביות, האם ניתן לזהות פעילות שונה (במאפיינים או במיקום) במוחו של נבדק שקיבל החלטה שאיננה עקבית עם החלטות אחרות שקיבל? ואם כן – לאיזה שלב בתהליך קבלת ההחלטה אפשר לשייך פעילות זו? במרכז סקירה זו עומדת הספרות המחקרית במדעי המוח העוסקת בהתנהגות לא עקבית, שבה החישובים עבור החלטות שונות מובילים לסתירות פנימיות.

להבנת התהליכים המוחיים המובילים לחוסר עקביות יש השלכות רבות גם על העולם העסקי. למשל, מנהלים ואנשי שיווק של חברות B-to-C, פונים בשנים האחרונות יותר ויותר לחיפוש אחר תובנות נזיר-שיווקיות שישלימו את הכלים הסטנדרטיים הנמצאים בשימוש מזה שנים רבות (לסקירה אודות נזיר-שיווק ראו Hakim & Levy, 2019). אלה עשויים למצוא עניין בהבנת המגבלות הביולוגיות של המוח, משום שהן עשויות לסייע להם להבין את מגבלות התפיסה של הצרכנים את המסרים המועברים בקמפיינים שיווקיים. בפרט,

6 בסקירה זו לא נדון כלל בספרות הרחבה והפעילה המשלבת במסגרת הניאו-קלאסית התנהגויות מסוג אלו שתוארו כאן.



חוסר עקביות מתואם עם פעילות באזורי חישובי הערכים הסובייקטיביים

מספר מחקרים מהעת האחרונה ניסו לאתר את הייצוג המוחי של התנהגות לא עקבית בקבלת החלטות בעזרת הדמיה מוחית פונקציונלית⁸.

קבוצה אחת של מחקרים השתמשה במטלות של בחירה בין זוגות של הגרלות כדי לזהות חוסר עקביות בהחלטותיהם של הנבדקים, ולבחון מהו הקשר ביניהן לבין הפעילות המוחית שנמדדה בעת ביצוע ההחלטה. Kalenscher et al. (2010) בדקו הפרות של טרנזיטיביות (סתירות פנימיות עקיפות) בבחירה בין זוגות של הגרלות, ומצאו כי הפעילות המוחית ב-vStr, ב-ACC וב-dlPFC מתואמת באופן חיובי עם כמות ההפרות. (Rigoli, Rutledge, Dayan, & Dolan, 2016) הציגו לנבדקים בחירה בין שתי הגרלות המוצגות פעם אחת בסביבה של הגרלות עם פרסים נמוכים, ופעם אחרת בסביבה של הגרלות עם פרסים גבוהים. כך לדוגמה, נבדקים נדרשו לבחור בין הגרלה שבה יש 50% סיכוי לזכות ב-10 שקלים ו-50% סיכוי לזכות בכלום ("ההגרלה המסוכנת") לבין 5 שקלים בטוחים ("ההגרלה הבטוחה"). פעם אחת שאלה זו הופיעה בתוך סדרה של שאלות עם סכומים נמוכים יותר (למשל, הגרלה מסוכנת עם 6 שקלים אל מול 3 שקלים בטוחים), ופעם אחרת שאלה זו הופיעה בתוך סדרה של שאלות עם סכומים גבוהים יותר (למשל, הגרלה מסוכנת עם 14 שקלים אל מול 7 שקלים בטוחים). החוקרים זיהו היפוכי העדפות בין שתי הסביבות. בנוסף, הם הראו כי יש מתאם חיובי בין הערך הסובייקטיבי שניתן להגרלה המסוכנת (שהשתנה מסביבה לסביבה) לבין הפעילות המוחית באזורי חישוב הערך⁹. קבוצת מחקרים זו קושרת אפוא בין הפעילות באזורי תחשיב הערך הסובייקטיבי לבין התנהגות לא עקבית.

קבוצה שנייה של מחקרים השתמשה בהוספה של אלטרנטיבות לא רלוונטיות לקבוצת האפשרויות על מנת לזהות חוסר

איור 1. האזורים המוחיים המעורבים בחישוב הערכים הסובייקטיביים של פרסים או תגמולים מסוגים שונים: ה-vStr וה-vmPFC. שני האזורים מוצגים במנחים שונים של המוח. האיור השמאלי מציג את המוח בחתך חיצוני, כך שה-vmPFC מוצג משמאל, וה-vStr מימין. האיור הימני מציג את המוח בחתך אופקי, וכאן ניתן לראות את ה-vmPFC בראש האיור ואת ה-vStr מתחתיו.

פרטים בעלי פגיעה או ניוון באזורי חישובי הערך פחות עקביים בהחלטותיהם

קבוצה אחת של מחקרים שפורסמו לאחרונה בודקת כיצד פגיעה או ניוון באזורי קבלת החלטות באונה הקדמית (ה-mPFC) משפיעים על מידת העקביות של בחירות הפרטים⁷. במסגרת זו נמצא כי בקרב פגועי ראש מספר ההפרות של עקביות גדול בהשוואה למספר ההפרות שנמצא בקרב קבוצת ביקורת של נבדקים בריאים (Camille, et al., 2011; Fellows & Farah, 2007). מחקר נוסף מצא כי עלייה במספר ההפרות נמצאה מתואמת עם ירידה בנפח גוף תאי הניורונים ("חומר אפור") באונה הקדמית (Chung, Tymula, & Glimcher, 2017). אם כן, העדויות מהמחקר הקליני מראות כי פתולוגיות ותהליכי ניוון באזורי קבלת ההחלטות במוח פוגעים במידת העקביות של מקבלי ההחלטות.

8 במחקר הדמיה מוחית פונקציונלית, (fMRI) functional MRI, מודדים את השינויים בזרימת הדם לאזורים שונים במוח. מחקרים הראו כי השינויים בזרימת הדם מתואמים עם פעילות הניורונים, ולפיכך חוקרים מזהים אזורים שאליהם אותרת זרימת דם מוגברת, כאזורים שבהם מתבצעת פעילות נוירולוגית מוגברת.

9 ממצאים התנהגותיים דומים עולים גם מ-Louie et al. (2013) ומ-Khaw, Glimcher & Louie (2017). עדות מוחית ישירה להשפעת הקונטקסט על תהליך חישוב הערך עולה ממחקרים בקופי-אדם, דוגמת Yamada, Louie, Tymula & Glimcher (2018).

7 מספר ההפרות של עקביות הוא המדד הפשוט ביותר למידת חוסר העקביות בבחירותיה של מקבלת ההחלטות. מדד זה לוקה בחוסר דיוק משום שבחירה לא עקבית יחידה עשויה להוביל במחקרים מסוימים למספר גדול של הפרות ובמקרים אחרים להפרה אחת בלבד.

עקביות בהחלטותיהם של הנבדקים¹⁰. מחקרים אלה מצאו כי הפרות הנוצרות בבחירות מסוג זה מקושרות לפעילות מוגברת באזורי קבלת החלטות באונה הקדמית וב-vStr. ממצאים אלה מופיעים בין אם הבחירה היא בין הגרלות, בין חלוקות של הכנסה בין פרטים או בין חלוקות של הכנסה על פני זמן (Chung et al., 2017; Gluth, Hotaling, & Jo, 2014; Hu & Yu, 2014; Hedgcock & Rao, 2009; 2017).¹¹

אם כן, גם מחקרי הדמיה מוחית פונקציונלית מעידים על כך שיש ייצוג מוחי של חוסר עקביות באזורים שונים של קבלת החלטות במוח. תוצאות אלה עדיין לא מאפשרות להציע מכניזם שיקשר בין הפעילות המוחית לבין קבלת החלטות שאיננה עקבית. אנו רוצים להציע מכניזם שכזה, המעמיד במרכז הקשר בין הפעילות המוחית לבין חוסר עקביות את האופי "הרועש" (הסטוכסטי) של פעילות הניורונים במוח.

קבלת החלטות והסטוכסטיות של פעילות הניורונים

נחזור לבחון קבלת החלטות וחישובי ערך. בבחירות בין טובין שונים¹². Webb et al. (2019) מראים שמידת הסטוכסטיות של בחירות הנבדקים מתואמת עם השינויים בפעילות המוחית באזור ה-mPFC. באופן דומה, Padoa-Schioppa (2013) עשה שימוש במטלת בחירה פשוטה בין שני סוגים של מיצים כדי לתעד את הסטוכסטיות בקבלת החלטות אצל קופי אדם. במחקר זה הוא הקליט את פעילות הניורונים בחלק מאזור ה-vmPFC אצל הקופים, ומצא שעבור בחירות ברמת ערך סובייקטיבי דומה (כלומר כאלה שהקוף היה כמעט אדיש ביניהן), התנודתיות (סטוכסטיות) בבחירות הקופים ניתנת להסבר באמצעות קצב הירי המשתנה (הסטוכסטי) של הניורונים באזור המתועד¹³.

התמונה המתגבשת משורת מחקרים זו היא שניתן לייחס סטוכסטיות בקבלת החלטות לפעילותם הסטוכסטית של הניורונים באזורי קבלת החלטות במוח. במאמר שפרסמנו לאחרונה בשיתוף עם ד"ר ראין ווב מבית הספר למינהל עסקים ע"ש רוטמן באוניברסיטה של טורונטו (Kurtz-David, Persitz, Webb, & Levy, 2019), ניסינו לבחון אם ניתן להשתמש בממצאים אודות הקשר בין תנודתיות בקבלת החלטות לבין תנודתיות בפעילות הניורונית, על מנת להסביר חלק מהתופעות המתוארות בספרות בכלכלה ובפסיכולוגיה העוסקת בחוסר עקביות בקבלת החלטות.

12 בניסוי זה הוצגה לנבדקים סדרה של החלטות בינאריות בין מוצרי צריכה שונים. בין המוצרים שהנבדקים נדרשו לבחור ביניהם היו עותק DVD של סרט, אלבום מוזיקה, פוסטר, ספר וכדומה. בכל שאלה הוצגו שני מוצרים, והנבדקים נדרשו לבחור ביניהם.

13 Kurikawa et al. (2018) חקרו בחירות סטוכסטיות אצל חולדות, וקיבלו ממצאים דומים.

מהם ניורונים ומדוע אנו אומרים שפעילותם סטוכסטית?

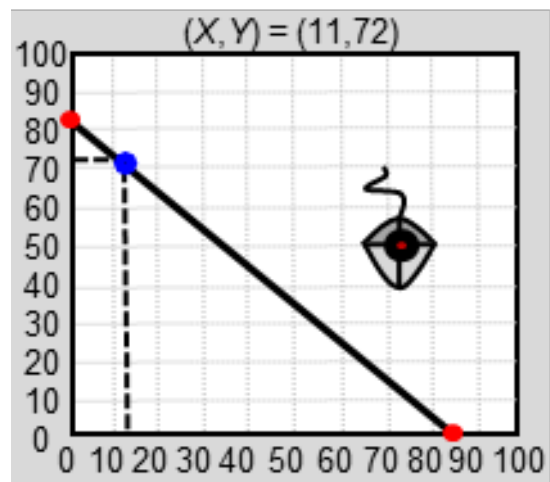
הניורונים הם יחידת החישוב העצבית הבסיסית של המוח. מוח האדם מכיל מיליארדי ניורונים שמקודדים מידע באמצעות הולכה של אות חשמלי. קצב הירי של הניורון הוא מספר האותות החשמליים שניורון מייצר בזמן נתון. לכן ניתן למדוד, עבור גירוי מסוים, מהו קצב הירי של הניורון כשהוא נחשף לגירוי זה. בהקשרים של קבלת החלטות, הגירוי עשוי להיות הערך הסובייקטיבי הצפוי מבחירה בחלופה מסוימת. באזורים המוחיים האמונים על תחשיב ערך, אנו מזהים מתאם חיובי בין קצב הירי של הניורונים לרמת הערך הצפויה מחלופות שונות. כלומר, ככל שהערך הצפוי מהחלופה גדול יותר, כך הניורונים יירו בקצב מהיר יותר (Platt & Glimcher, 1999). עם זאת, קצב הירי של הניורונים הוא סטוכסטי, כלומר אם נציג לניורון את אותו הגירוי פעם אחר פעם ונמדוד את קצב הירי, בכל פעם נקבל תוצאה שונה מעט (Arieli, Sterkin, 2010).

10 באלטרנטיבה "לא רלוונטית" (לעיתים מכונה Decoy) הכוונה לאלטרנטיבה שאינה עדיפה בשום ממד על פני האלטרנטיבות האחרות. הוספה של אלטרנטיבה מעין זו לקבוצת האפשרויות אינה אמורה לשנות את בחירות הנבדקים. עם זאת, ידוע כי תוספת של אלטרנטיבה כזאת מובילה את הנבדקים לבצע בחירות המובילות לסתירות פנימיות ישירות. סקירה זו מתמקדת במחקרים שנעשו על מוחות אנושיים. אולם ראוי לציין שיש מחקרים רבים שנעשו על בעלי חיים אחרים. כך, על פי Cohen et al. (2019) אפילו בעל חיים עם מספר מצומצם של ניורונים, דוגמת תולעת ה-C.elegans, מציג סתירות פנימיות כשמציגים לו קבוצת אפשרויות הכוללת אלטרנטיבות לא רלוונטיות.

מבנה הניסוי: המטלה

נבדקים ביצעו מטלה מוכרת מהספרות הכלכלית של בחירות מקווי תקציב לבחינת העדפות לסיכון (Choi, et al., 2007; Choi, et al., 2014; Halevy, Persitz, & Zrill, 2018). במהלך סריקת fMRI. בכל בעיית החלטה אפשרנו לנבדקים לבחור הגרלה אחת מתוך אוסף גדול של הגרלות. אוסף ההגרלות תואר באמצעות קו היורד משמאל לימין (ראו איור 2). בכל הגרלה באוסף זה מוטל מטבע הונג – אם המטבע נופל על "פיל" הנבדק/ת מקבל/ת את הסכום שבחירה בציר האופקי, ואילו אם המטבע נופל על "עץ" הנבדק/ת מקבל/ת את הסכום שבחירה בציר האנכי. למשל, בדוגמה המתוארת באיור 2, הנבדק/ת בחרה בהגרלה (11,72), כלומר יש לו/ה 50% סיכוי לזכות ב-11 אסימונים אם הציר האופקי יעלה בגורל ("פיל"), ו-50% סיכוי לזכות ב-72 אסימונים אם הציר האנכי יעלה בגורל ("עץ").

איור 2: תיאור המטלה



איור 2. מטלה מייצגת כפי שנראתה לנבדק/ת. כל אחד מהנבדקים ביצע 108 החלטות, כאשר בכל בעיית בחירה הקו (אוסף ההגרלות הנתון לבחירה) נבחר באופן רנדומלי. התמריצים בניסוי היו גבוהים ביחס למקובל – כל אסימון היה שווה 5 שקלים. בדוגמה המתוארת באיור 2, בחירתה/ה של הנבדק/ת הובילה לכך שסכומי הזכייה שעל הכף היו 55 שקלים ו-360 שקלים (בהתאמה). בסוף הניסוי אחת השאלות נבחרה באקראי, ועבור שאלה זו ביצענו את ההגרלה ושילמנו לנבדק/ת (בתוספת לתשלום קבוע בעבור ההשתתפות בניסוי).

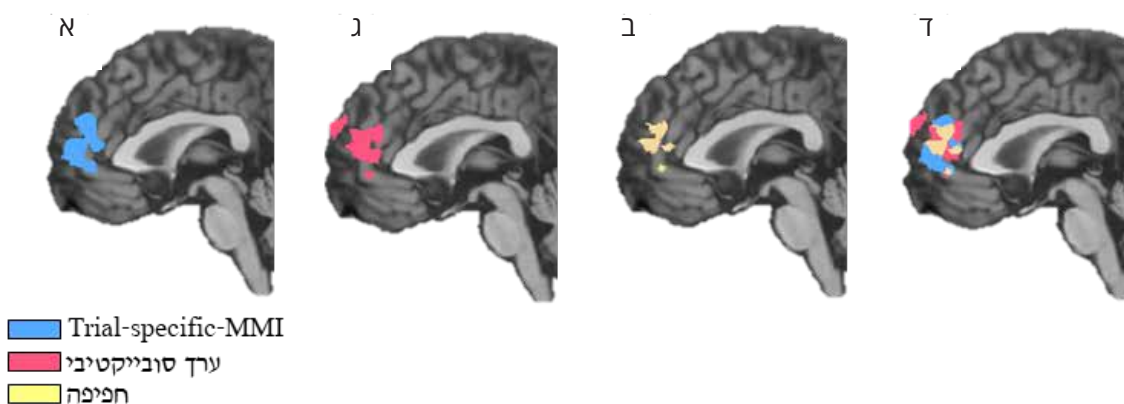
מדידת חוסר עקביות

על מנת לעשות שימוש מיטבי במידע הרב הגלום בסריקת ה-fMRI, נדרשנו לאמוד את מידת חוסר העקביות בכל בעיית החלטה. עם זאת, הספרות הכלכלית מספקת רק מדדים המתארים את סך כל חוסר העקביות המגולמת בבחירות הנבדקים (למשל, מספר הסתירות הפנימיות או מספר התצפיות שיש להשמיט על מנת להפוך את הבחירות לעקביות. Afriat, 1973; Dean & Martin, 2016; Echenique, Lee, & Shum, 2011; Houtman & Maks, 1985; Varian, 1990). כלומר, המדדים הקיימים מתאימים לכל נבדק ציון יחיד המתאר את מידת חוסר העקביות של בחירותיו על פני כל הניסוי כולו. לו היינו עושים שימוש באחד מן המדדים הללו, היינו נאלצים למצע את הסינגל המוחי שנמדד בסורק ה-MRI במשך כל הניסוי, ולהשוות את הסינגל הממוצע למדד זה. אנו רצינו להימנע מאובדן האינפורמציה הנובע מהמיוצע, ולפיכך הצענו דרך חדשה לאמוד את רמת חוסר העקביות בכל בחירה, תוך שאנו מתבססים על אחד המדדים המקובלים בספרות¹⁴. עבור כל תצפית, בשלב הראשון חישבנו את המדד על פני כל הבחירות של הנבדק/ת, ואילו בשלב השני חישבנו את ערכו של מדד זה על פני כל התצפיות מלבד התצפית האמורה. ההפרש בין שני המספרים הללו הוא הציון שהוצמד לתצפית. אנו מכנים את המדד בשם Trial-specific-MMI. על פי שיטה זו, הציון המוצמד לכל תצפית מבטא את רמת חוסר העקביות שאותה תצפית מוסיפה לכלל חוסר העקביות הטמונה בבחירות הנבדק/ת.

הממצא המרכזי

הממצא המרכזי שלנו מורכב משלושה חלקים: החלק הראשון הוא שמדד חוסר העקביות החדש מתואם באופן חיובי עם פעילות מוחית באזורי קבלת החלטות באונה הקדמית – ה-mPFC וה-dACC (איור 3א). כלומר, יותר פעילות מוחית נצפתה באזורים אלה כאשר רמת חוסר העקביות בבחירה כלשהי של הנבדק הייתה גבוהה יותר. החלק השני של הממצא עולה בקנה אחד עם הספרות שתוארה לעיל אודות הייצוג המוחי של ערך סובייקטיבי – הפעילות המוחית באותם אזורים נמצאה מתואמת עם הערך הסובייקטיבי מההגרלות (איור 3ב). החלק השלישי של הממצא הוא שיש חפיפה משמעותית

14 מדד ה-Money Metric Index (MMI) הוצג לראשונה על ידי Halevy, Persitz & Zrill, 2018, ומהווה הרחבה למדד שהוצג ב-Varian (1990).

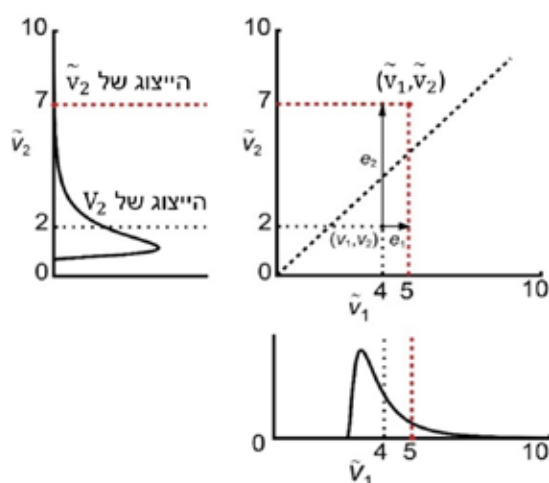


מעניק לאלטרנטיבה 2: $v_1 > v_2$. אם יבחר באלטרנטיבה 1, בחירתו של מקבל ההחלטות תשקף את הבחירה העקבית עם העדפותיו. אולם בשל "הרעש הניורוני", אל חישוב הערך של מקבל ההחלטות נוסף רכיב רעש סטוכסטי המתואר באמצעות ε_i . אם כן, יוצא שהערך המחושב של כל אחת מהאלטרנטיבות בנוי משני רכיבים שאינם ניתנים להפרדה – הערך הסובייקטיבי ורכיב הרעש: $\tilde{v}_i = v_i + \varepsilon_i$. כאשר $\tilde{v}_i$ מייצגת את הערך הסטוכסטי של כל אלטרנטיבה. בסופו של דבר, מבין שתי האלטרנטיבות יבחר מקבל ההחלטות (שאינו יודע "לנקות" את הרעש) באלטרנטיבה שיש לה ערך סטוכסטי גבוה יותר. ולפיכך אם רכיב הרעש ε_2 של אלטרנטיבה 2 גדול דיו, הערך הסטוכסטי המיוחס לאלטרנטיבה 2 יהיה גבוה מהערך הסטוכסטי של אלטרנטיבה 1, ומקבל ההחלטות יבחר באלטרנטיבה שאינה עקבית עם העדפותיו.

בין האזורים הפועלים באופן מתואם עם מדד חוסר העקביות והאזורים הפועלים באופן מתואם עם הערך הסובייקטיבי (איור 3 ג+ד). המסקנה המתקבלת מממצא זה היא כי מקור חוסר העקביות בקבלת ההחלטות של הנבדקים נמצא באזורי קבלת ההחלטות עצמם ולא באזורים אחרים במוח. כלומר, באזורים שבהם מחושב הערך הסובייקטיבי של החלופות השונות, מתהוות גם הסתירות לעקביות בקבלת ההחלטות של הנבדקים.

איור 3. המחשת הממצא המרכזי. האזורים הצבועים מייצגים ווקסלים (פיקסלים תלת-ממדיים) שבהם הממד היה מובהק ב- $p < 0.0005$ (אחרי תיקון להשוואות מרובות). עיבוד מתוך Kurtz-David et al., (2019).

איור 4: דוגמה מספרית



הסבר הממצא המרכזי: הרעש הניורוני מהווה רכיב מרכזי בחוסר העקביות בקבלת החלטות

כדי להסביר את הממצא המרכזי השתמשנו במסגרת מחשבתית (מודל) המתארת כיצד מתקבלת במוח החלטה על בחירה בין שתי אלטרנטיבות, כאשר חישוב הערך הוא רועש (כתוצאה מה"רעש הניורוני"). המודל נקרא The Neural Random Utility Model (בקצרה NRU) (Webb, 2019; Webb, 2014; et al., 2019; Woodford, 2014). ובמרכזו עומד מקבל החלטות שנדרש לבחור בין שתי אלטרנטיבות – אלטרנטיבה 1 ואלטרנטיבה 2. לצורך הדיון נניח שהערך הסובייקטיבי שמקבל ההחלטות מעניק לאלטרנטיבה 1 גבוה מהערך שהוא

דין

לסיכום, הספרות על הייצוג המוחי של התנהגות לא עקבית שאינה עולה בקנה אחד עם ההנחה של פרט רציונלי עדיין בראשיתה. מסקירת הממצאים הקיימים עולה כי סתירות אלה מתואמות עם פעילות באזורי קבלת ההחלטות במוח. אנו מנסים להסביר תופעה זו בכך שתהליכי קבלת ההחלטות במוח, כמו כל התהליכים המבוססים על חישוב ניוירנלי, הם סטוכסטיים מטבעם בשל הרעש הניורנלי. אנו טוענים כי סטוכסטיים זו בתהליכי קבלת ההחלטות היא שמובילה לעיתים לבחירות המאופיינות בסתירות פנימיות.

אנו מאמינים כי להבנת התהליכים המוחיים המובילים לחוסר עקביות יש השלכות רבות על העולם העסקי. כך למשל, התחום המתפתח במהירות של ניויר-שיווק (consumer neuroscience בעגה האקדמית) מעיד על כך שמנהלים ואנשי שיווק מבינים כי תובנות המניעות ממדעי המוח עשויות להשלים את הכלים הסטנדרטיים (סקרים, קבוצות מיקוד, ניסויים התנהגותיים וראיונות) הנמצאים בשימוש מזה שנים רבות. בפרט, הבנת הייצוג המוחי של חוסר עקביות יאפשר לאנשי השיווק והפרסום להתאים את הקמפיינים השיווקיים טוב יותר ליכולות התפיסה של הצרכנים הפוטנציאליים, ולשפר בצורה דרמטית את המיקוד של הקמפיינים הללו בעזרת ניצול טוב יותר של הנתונים שבידי הפירמה.

עם זאת, עדיין רב הנסתר על הגלוי ושאלות חדשות רבות מתעוררות בעקבות תוצאות אלה. האם החשיבות של הרעשים הניורנלים תלויה באופי הבעיה המוצגת למקבל ההחלטה? האם קיימים מנגנונים קוגניטיביים או חיצוניים להקטנת השפעתם של רעשים אלו? האם החשיבות של רעשים אלה משתנה עם מאפיינים מדידים של מקבל ההחלטות? כך או כך, אנו מאמינים כי העדויות שסקרנו במאמר קצר זה צריכות להוביל את המחקר בנויר-כלכלה לבחון לעומק את תפקידו של הרעש הניורנלי בתהליכי קבלת החלטות.

dinolevy@tauex.tau.ac.il

פרופ' דינו לוי

איור 4. דוגמה למודל NRUM עם שתי אלטרנטיבות. הפאנל התחתון מתאר את הייצוג המוחי של הערך הסובייקטיבי של אלטרנטיבה 1, ואילו הפאנל השמאלי מתאר את הייצוג המוחי של הערך הסובייקטיבי של אלטרנטיבה 2. הקו השחור המקווקו מתאר את V_i של כל אחת מהאלטרנטיבות, בעוד הקו האדום המקווקו מתאר את $\tilde{V}_1$ הכולל גם את רכיב הרעש הסטוכסטי (עבור כל אלטרנטיבה). בפאנל הימני העליון ניתן לראות כי $\tilde{V}_2 > \tilde{V}_1$ (הנקודה נמצאת מעל קו ה-45 מעלות), ועל כן אלטרנטיבה 2 נבחרת, חרף העובדה שהערך הסובייקטיבי שלה נמוך יותר, $V_1 > V_2$.

איור מספר 4 מדגים את הרעיון. מקבל ההחלטות נדרש לבחור בין שתי אלטרנטיבות שהערכים שלהן הם $V_1 = 4$ ו- $V_2 = 2$, כלומר $V_1 > V_2$. אל ערכים אלה מתווסף הרכיב הסטוכסטי E_i הלקוח מתוך התפלגות א-סימטרית (יידוע שהרעש הניורנלי במוח מתפלג באופן לא סימטרי (Buzsaki & Mizuseki, 2014)). בדוגמה זו, הערכים הסטוכסטיים הם $\tilde{V}_1 = 5$ ו- $\tilde{V}_2 = 7$. בהתאמה. את הערך הסובייקטיבי, התפלגות הרעש והערך הסטוכסטי של אלטרנטיבה 1 ניתן לראות בתרשים התחתון, ואילו את הערך הסובייקטיבי, התפלגות הרעש והערך הסטוכסטי של אלטרנטיבה 2 ניתן לראות בתרשים השמאלי. יוצא אפוא ש- $\tilde{V}_2 > \tilde{V}_1$, ואלטרנטיבה 2 נבחרת (מעל קו ה-45 המעלות בתרשים העליון מימין) חרף העובדה שבחירה זו אינה עקבית עם ההעדפות של מקבל ההחלטות.

שימו לב שככל שהפער בין הערכים של האלטרנטיבות גדל, כך הפער בין הרכיבים הרועשים ε_i צריך להיות גדול יותר על מנת שתתבצע בחירה שאינה עקבית עם ההעדפות של מקבל ההחלטות. סימולציות (המניחות כאמור התפלגות א-סימטרית של קצב הירי של הניורונים) מראות שככל שהרעש הניורנלי גדול יותר, כך הערכים הסטוכסטיים ($\tilde{V}_i$) גבוהים יותר ויש יותר חוסר עקביות (כלומר אלטרנטיבה 2 נבחרת לעיתים קרובות יותר). תוצאות אלה עולות בקנה אחד עם הממצאים האמפיריים שתוארו לעיל – באזורים המוכרים כמעורבים בתהליכים של חישובי ערך וקבלת החלטות, נצפה מתאם חיובי גם בין הפעילות הניורנלית לערך הסובייקטיבי וגם בין הפעילות הניורנלית וממד חוסר העקביות.

- Afriat, S. N. (1973). On a System of Inequalities in Demand Analysis: An Extension of the Classical Method. *International Economic Review*, 14(2), 460–472.
- Andreoni, J., & Miller, J. (2002). Giving According to GARP: An Experimental Test of The Consistency of Preferences for Altruism. *Econometrica*, 70(2), 737–753.
- Arieli, A., Sterkin, A., Grinvald, A., & Aertsen, A. (1996). Dynamics of Ongoing Activity: Explanation of the Large Variability in Evoked Cortical Responses. *Science*, 273(5283), 1868–1871.
- Bartra, O., McGuire, J. T., & Kable, J. W. (2013). The valuation system: A coordinate-based meta-analysis of BOLD fMRI experiments examining neural correlates of subjective value. *NeuroImage*, 76, 412–427.
- Burghart, D. R., Glimcher, P. W., & Lazzaro, S. C. (2013). An expected utility maximizer walks into a bar ..., 215–246.
- Buzsaki, G., & Mizuseki, K. (2014). The log-dynamic brain: how skewed distributions affect network operations. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(4), 264–278.
- Camille, N., Griffiths, C. A., Vo, K., Fellows, L. K., & Kable, J. W. (2011). Ventromedial frontal lobe damage disrupts value maximization in Humans. *Journal of Neuroscience*, 31(20), 7527–7532.
- Choi, S., Fisman, R., Gale, D., & Kariv, S. (2007). Consistency and heterogeneity of individual behavior under uncertainty. *American Economic Review*, 97(5), 1921–1938.
- Choi, S., Kariv, S., Müller, W., & Silverman, D. (2014). Who Is (More) Rational? *American Economic Review*, 104(6), 1518–1550.
- Chung, H. K., Tymula, A., & Glimcher, P. (2017). The Reduction of Ventrolateral Prefrontal Cortex Grey Matter Volume Correlates with Loss of Economic Rationality in Aging. *Journal of Neuroscience*, 37(49), 12068–12077.
- Chung, H. kuan, Sjo, T., Lee, H., Lu, Y., Tsuo, F., Chen, X., ... Huang, C. (2017). Why Do Irrelevant Alternatives Matter? An fMRI-TMS Study of Context-Dependent Preferences. *Journal of Neuroscience*, 37(1), 11647–11661.
- Clithero, J. A., & Rangel, A. (2013). Informatic parcellation of the network involved in the computation of subjective value. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(9), 1289–1302.
- Cohen, D., Teichman, G., Louie, K., Levy, D. J., Volovich, M., Zeevi, Y., ... Rechavi, O. (2019). Bounded rationality in C. elegans is explained by circuit-specific normalization in chemosensory pathways. *Nature Communications*, 1–12.
- Cohen, M. R., & Newsome, W. T. (2009). Estimates of the Contribution of Single Neurons to Perception Depend on Timescale and Noise Correlation. *Journal of Neuroscience*, 29(20), 6635–6648.
- Dean, M., & Martin, D. (2016). Measuring Rationality with the Minimum Cost of Revealed Preference Violations. *Review of Economics and Statistics*, 98(3), 524–534.
- Echenique, F., Lee, S., & Shum, M. (2011). The Money Pump as a Measure of Revealed Preference

- Violations. *Journal of Political Economy*, 119(6), 1201–1223.
- Fellows, L. K., & Farah, M. J. (2007). The role of ventromedial prefrontal cortex in decision making: Judgment under uncertainty or judgment per se? *Cerebral Cortex*, 17(11), 2669–2674.
- Fisman, R., Jakiela, P., Kariv, S., & Markovits, D. (2015). The distributional preferences of an elite. *Science*, 349(6254), aab0096–aab0096.
- Fisman, R., Kariv, S., & Markovits, D. (2007). Individual preferences for giving. *American Economic Review*, 97(5), 1858–1876.
- Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., & Raichle, M. E. (2007). Intrinsic Fluctuations within Cortical Systems Account for Intertrial Variability in Human Behavior. *Neuron*, 56(1), 171–184.
- Gluth, X. S., Hotaling, X. J. M., & Jo, X. (2017). The Attraction Effect Modulates Reward Prediction Errors and Intertemporal Choices. *Journal of Neuroscience*, 37(2), 371–382.
- Hakim, A., & Levy, D. J. (2019). A gateway to consumers' minds: Achievements, caveats, and prospects of electroencephalography-based prediction in neuromarketing. *WIREs Cognitive Science*, (October 2018), 1–21.
- Halevy, Y., Persitz, D., & Zrill, L. (2018). Parametric Recoverability of Preferences. *Journal of Political Economy*, 126(4), 1558–1593.
- Harbaugh, W. T., Krause, K., & Berry, T. R. (2001). GARP for Kids: On the Development of Rational Choice Behavior. *American Economic Review*, 91(5), 1539–1545.
- Hedgcock, W., & Rao, A. R. (2009). Trade-Off Aversion as an Explanation for the Attraction Effect: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *Journal of Marketing Research*, XLVI(February), 1–13.
- Houtman, M., & Maks, J. A. H. (1985). Determining all Maximal Data Subsets Consistent with Revealed Preference. *Kwantitatieve Methoden*, 19, 89–104.
- Hu, J., & Yu, R. (2014). The neural correlates of the decoy effect in decisions. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8 (August), 1–8.
- K.H. Britten, Newsome, W. T., Shadlen, M. N., S. Celebrini, & Movshon, J. A. (1996). A Relationship between Behavioral Choice and the Visual Responses of Neurons in Macaque MT. *Visual Neuroscience*, 13, 87–100.
- Kalenscher, T., Tobler, P. N., Huijbers, W., Daselaar, S. M., & Pennartz, C. M. a. (2010). Neural signatures of intransitive preferences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4(2010), 1–5.
- Khaw, M. W., Glimcher, P. W., & Louie, K. (2017). Normalized value coding explains dynamic adaptation in the human valuation process. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(48).
- Kurikawa, T., Haga, T., Handa, T., Harukuni, R., & Fukai, T. (2018). Individual Variability in Decision-Making. *Nature Neuroscience*, 21(December), 1764–1773.
- Kurtz-David, V., Persitz, D., Webb, R., & Levy, D. J. (2019). The neural computation of inconsistent choice behavior. *Nature Communications*, 10(1583), 1–14.

- Levy, D. J., & Glimcher, P. W. (2012). The root of all value: A neural common currency for choice. *Current Opinion in Neurobiology*, 22(6), 1027–1038.
- Louie, K., Khaw, M. W., & Glimcher, P. W. (2013). Normalization is a general neural mechanism for context-dependent decision making. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(15), 6139–6144.
- Morwitz, V. G., Greenleaf, E. A., & Johnson, E. J. (1998). Divide and Prosper: Consumers' Reactions to Partitioned Prices. *Journal of Marketing Research*, 35(4), 453–463.
- Padoa-Schioppa, C. (2013). Neuronal origins of choice variability in economic decisions. *Neuron*, 80(5), 1322–1336.
- Platt, M. L., & Glimcher, P. W. (1999). Neural correlates of decision variables in parietal cortex. *Nature*, 233–238.
- Rigoli, F., Rutledge, R. B., Dayan, P., & Dolan, R. J. (2016). The influence of contextual reward statistics on risk preference. *NeuroImage*, 128, 74–84.
- Thomas, M., & Morwitz, V. (2005). Penny Wise and Pound Foolish: The Left-Digit Effect in Price Cognition. *Journal of Consumer Research*, 32 (June), 54–64.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). The Framing of Decisions and the Psychology of Choice. *Science*, 211(4481), 453–458.
- Varian, H. R. (1990). Goodness-of-fit in optimizing models. *Journal of Econometrics*, 46(1–2), 125–140.
- Webb, R. (2019). The (Neural) Dynamics of Stochastic Choice The (Neural) Dynamics of Stochastic Choice. *Management Science*, 64(1), 230–255.
- Webb, R., Levy, I., Lazzaro, S. C., Rutledge, R. B., & Glimcher, P. W. (2019). Neural Random Utility: Relating Cardinal Neural Observables to Stochastic Choice Behavior. *Journal of Neuroscience, Psychology, and Economics*, 12(1), 45–72.
- Woodford, M. (2014). Stochastic Choice: An Optimizing Neuroeconomic Model. *American Economic Review*, 104(5), 495–500.
- Yamada, H., Louie, K., Tymula, A., & Glimcher, P. W. (2018). medial orbitofrontal cortex. *Nature Communications*, (2018), 1–11.