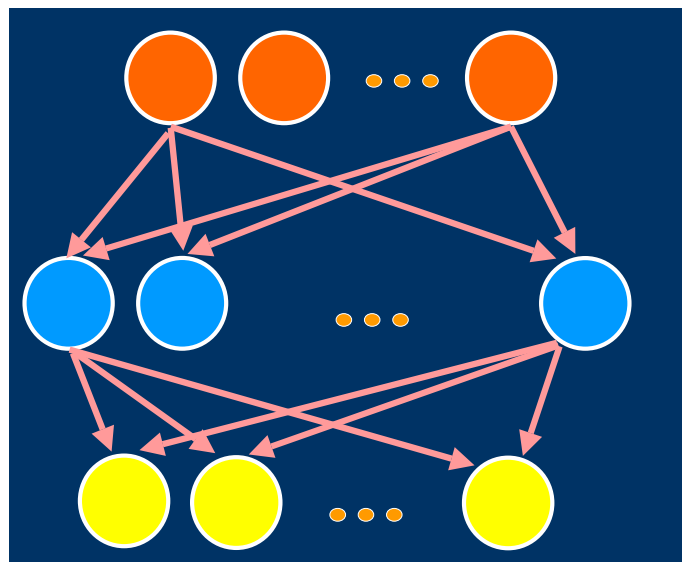


מה לוכדים הניורונים ברשת? על התיאוריה של רשתות ניורונים

אורן שריקי*

כיצד מיוצג מידע במוח? הנחת המוצא הרווחת כיום במחקר המוח היא שכאשר אנו מעבדים מידע הנקלט בחושינו, הוגים ברעיון כלשהו או מחליטים להזיז את ידינו, המידע מיוצג על-ידי הפעילות החשמלית של תאי העצב. כאשר מדובר בטווחי זמן ארוכים יותר, כגון בעובדות המאוחסנות בזכרוננו או במיומנויות שרכשנו, התפיסה המקובלת היא שהמידע מקודד בחוזק ההשפעות ההדדיות של תאי העצב, כלומר בקשרים הסינפטיים. מה מתרחש, אם-כן, כאשר אנו לומדים דברים חדשים? ההנחה המרכזית היא שלמידה מתבטאת בשינויים בחוזקם של הקשרים בין תאי העצב.

כיום, כאשר ידוע לא מעט על אופי הפעולה של תאי עצב ושל הקשרים ביניהם, ניתן לבנות מודלים תיאורטיים של רשתות תאי עצב, לחקור את התנהגותם ולהשוות למה שידוע מהניסיון. בסופו של דבר, מדובר במערכת של משוואות מתמטיות, אשר את התנהגותה מנתחים בעיקר באמצעות הדמיות מחשב. במקרים מסויימים ניתן להגיע לתוצאות מעניינות גם ללא עזרת המחשב, כפי שנראה בהמשך. מודלים שונים נבדלים זה מזה ברמת הפירוט של התיאור. מודלים מפורטים מתייחסים לתא העצב כאל מעגל חשמלי ולוקחים בחשבון את זרימת היונים השונים דרך קרום התא ואף את המבנה המרחבי של הענפים המסועפים דרכם מגיעים הקלטים אל גוף התא. בקצה השני של הקשת נמצאים מודלים מפושטים, המתעלמים ממרבית הפרטים הביולוגיים, ומתייחסים לתא העצב כאל מערכת הסוכמת קלטים מתאים אחרים ולבסוף מוציאה אות פלט, המשודר הלאה.



תרשים סכמטי של רשת ניורונים שבה המידע עובר מהשכבה העליונה לשכבה התחתונה.

* ד"ר אורן שריקי סיים את המסלול במרכז לחישוביות עצבית באוניברסיטה העברית

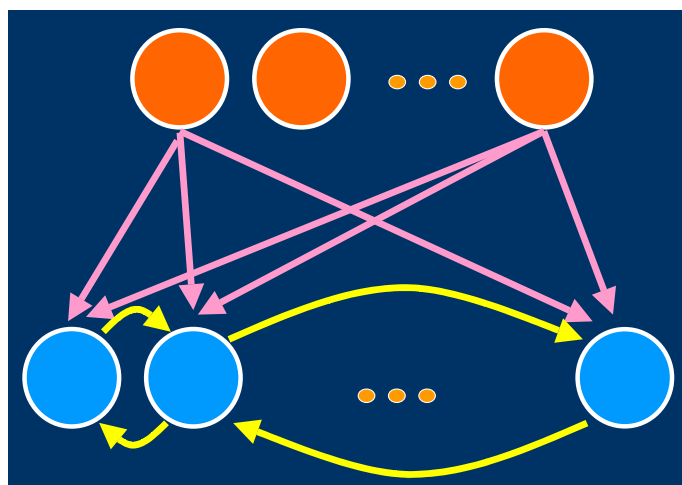
קלטים מתאים שונים מקבלים משקל שונה בתהליך הסכימה. המודלים הפשוטים שימושיים במיוחד כאשר אנו מעוניינים להבין את ההתנהגות הקולקטיבית של רשת תאים גדולה. במקרים אלו, המודלים המפורטים דורשים משאבי חישוב ניכרים ועקב המורכבות לא קל לבדוד את הגורמים החשובים ולנתח את התנהגות הרשת. תחום המחקר השם דגש על ההתנהגות של רשתות גדולות ומתמקד במודלים המפושטים מכונה בפי אנשי המקצוע "התיאוריה של רשתות נירונים".

ניתן לומר כי הכוח העיקרי של המוח הוא ביכולתו ללמוד דברים חדשים ולרכוש מיומנויות מורכבות. האם ניתן לחקות במחשב את תהליכי הלמידה המתרחשים במוח? רשתות נירונים ממוחשבות מופיעות כיום במגוון רחב של יישומים טכנולוגיים ומצליחות ללמוד משימות מורכבות יחסית, כגון זיהוי ספרות ואותיות בכתב יד וזיהוי דיבור. בדרך-כלל, מדובר ברשתות המורכבות מכמה שכבות של נירונים. בשכבה הראשונה מוצג הקלט לרשת ובשכבה האחרונה מיוצג הפלט שחושב על-ידי הרשת. בתחילת תהליך הלמידה בוחרים ערכים אקראיים לקשרים בין הנירונים. כעת מציגים לרשת דוגמאות שונות יחד עם התשובה הרצויה לכל דוגמא. כאשר מדובר בזיהוי ספרות בכתב יד מציגים תמונות של ספרות אשר נכתבו על-ידי אנשים שונים, וכל נירון בשלב הקלט מקבל ערך ממקום אחר בתמונה. הפלט של הרשת מושווה לפלט הרצוי ובעזרת כלל למידה מתאים מתבצעים שינויים בערכי הקשרים בין הנירונים. לאחר שהרשת מתמודדת בצורה מוצלחת עם הקלטים שהראו לה בשלב האימון בודקים את יכולתה להכליל, כלומר להתמודד עם דוגמאות חדשות. במקרה של זיהוי ספרות בכתב יד נצפה שהרשת תדע לזהות גם ספרות שלא ראתה בשלב האימון.

בלמידה הטבעית המתרחשת במוח בדרך-כלל לא ידועות תשובות מפורשות. אחת המשימות של המוח היא לאפיין את החוקיות של העולם מסביבנו, ולהציג את המידע בצורה נוחה יותר לצורך העיבוד בהמשך. דוגמא לתהליך כזה היא מיון של הקלטים למחלקות. כך למשל, ברגע שנשייך את החיה העומדת לפנינו למחלקת הטורפים יהיה לנו קל יותר לקבל את ההחלטה לברוח. גם כאשר גילה מנדלייב את הטבלה המחזורית הוא הבחין בכך שקיימת חוקיות במאפיינים של היסודות השונים. לא היה לו מורה שלימד אותו את החוקיות והורה לו כיצד לשבץ את היסודות. תחום מרכזי בלמידה של רשתות נירונים מתעסק בבעיות מסוג זה. המשימה העומדת בפני הרשת היא העברה של הקלט התחושתני הגולמי ליצוגים "יעילים" יותר. מעניין לחקור את התכונות של התאים המתפתחים במודלים אלו כאשר חושפים את הרשתות לקלטים הדומים לקלטים טבעיים. למשל, מה קורה כאשר חושפים רשת המחקק את שלבי העיבוד הראשונים של מידע ראייתי לתמונות טבעיות של עצים, אבנים הרים וכדו'? עבודות מהשנים האחרונות הראו כי בתנאים מתאימים מתפתחים במהלך הלמידה תאים עם תכונות הדומות לאלו של התאים בשלבים הראשונים של עיבוד מידע ראייתי במוח. דבר זה תומך בהשערה, שלפחות בשלבי העיבוד הראשונים, המוח מוצא פתרון אופטימלי לבעיות של יצוג מידע.

מחקרים רבים על תהליכי למידה עוסקים ברשתות שכבתיות, שבהן תהליך העיבוד הוא פשוט יחסית. מה יקרה אם נאפשר גם השפעות משוב בין הנוירונים ולא רק זרימה של מידע בכיוון אחד (למשל, מצב שבו נוירון א' משפיע על נוירון ב' ונוירון ב' משפיע חזרה על נוירון א')? במקרה זה, הדינמיקה של הרשת נעשית מורכבת הרבה יותר עקב ההשפעות ההדדיות של התאים. יתכן כי הפעילות של התאים לא תתייצב כלל, וגם אם תתייצב, יעבור זמן מה עד להתייצבות. ידוע כי במוח ישנם קשרי משוב בין התאים בכל אזור ובין אזורים שונים ולכן יש לקחת אותם בחשבון בתיאוריות שאנו מפתחים.

בתחילת שנות השמונים הוצע על-ידי פיזיקאי בשם ג'ון הופפילד מודל לזכרון אסוציאטיבי המבוסס על רשת משוב. הרעיון שעומד בבסיס המודל הוא שלרשת ישנם מספר מצבים יציבים של פעילות עצבית, אליהם היא מתכנסת ממצבים התחלתיים שונים. המצבים הסופיים מכונים "הזכרונות" וכל המצבים ההתחלתיים המובילים לאותו מצב סופי מכונים "האסוציאציות" של אותו "זכרון". הופפילד הציע כלל פשוט לקביעת חוזק הקשרים בין התאים כך שיאוחסנו הזכרונות המבוקשים. במודל המקורי התיאור המתמטי של כל נוירון היה פשוט למדי, אך העבודה הציעה קישור מעניין בין מושגים מהתחום של מערכות דינמיות למושג התפקודי של זכרון אסוציאטיבי.

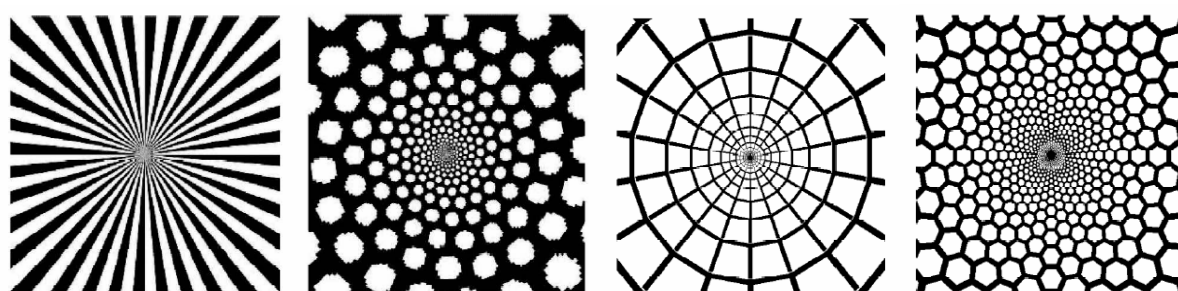


רשת משוב עם קלטים מבחוץ.

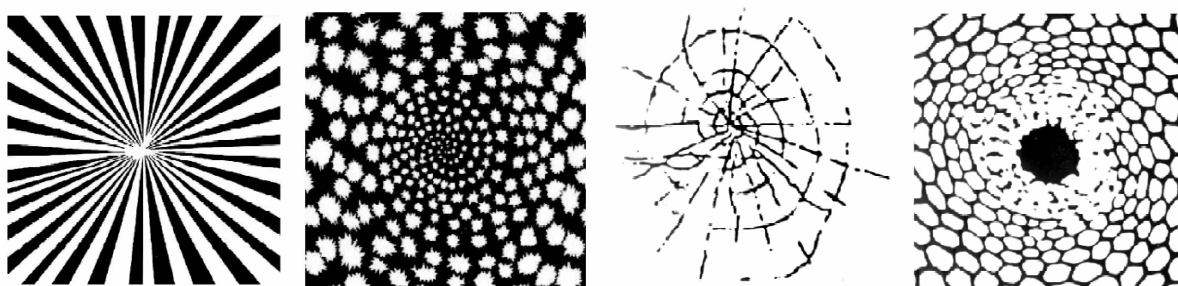
קישור מעניין אחר בין מושגים מתחום הדינמיקה למושגים תפקודיים בחקר המוח, מתייחס לתופעה של הזיות. מה מתרחש במוחו של אדם אשר לקח סמים הזייתיים ורואה, למשל, תבניות גיאומטריות מורכבות למול עיניו שעה שהן עצומות? למרות שלא מגיע קלט ראייתי אובייקטיבי מתקיימת במוח פעילות מורכבת הדומה לפעילות בשעת תפקוד תקין. תופעה אנאלוגית מתרחשת במודלים של רשתות משוב לעיבוד מידע ראייתי כאשר קשרי המשוב "חזקים" מספיק. למשל, אם נכפיל את כל ערכי הקשרים במספר מסוים ונגדיל אותו בהדרגה, בשלב מסוים תיווצר ברשת פעילות מורכבת גם בהיעדר קלט ישיר מבחוץ. הקשרים ההדדיים בין התאים הם שמקיימים את הפעילות.

כדי להבין זאת נחשוב על תלמידים בכיתה המקשיבים למורה ומעוניינים להבין אותו. המורה במשל הוא הקלט החיצוני והתלמידים הם תאי העצב. כאשר התלמידים מתקשים להבין את המורה, הם מדברים זה עם זה וחולקים את המידע שקלטו. אם הדבר נעשה במידה הוא עשוי לשפר את ההבנה הכוללת של הכיתה. במידה והתלמידים מתקשרים זה עם זה באופן אינטנסיבי מדי הם עשויים "להתנתק" מהמורה ו"להזות" דברים שהוא כלל לא אמר. השערה מקובלת היא שפעולתו של סם הזייתי שקולה להגברה כללית של חוזקי הקשרים ברשת. הסם פועל על הקשרים בצורה מפוזרת ולכן הנחה זו עשויה להוות קירוב ראשוני למה שמתרחש.

בסדרת עבודות בשנים האחרונות חקרו פול ברסלוף ועמיתיו מודל מתמטי של האזור הראייתי הראשוני בקליפת המוח, וניתחו את ההשפעות האפשריות של סמים הזייתים על הפעילות המתקבלת. כל תא עצב תואר על-ידי מודל דינמי פשוט יחסית, אך תכונות התאים והקשרים ביניהם נקבעו באופן מפורט על סמך תוצאות אנטומיות ופיזיולוגיות. המודל מדמה את תבנית הפעילות המתקבלת באזור הראייתי הראשוני בתגובה לתמונה כלשהי הנופלת על הרשתית. כאשר מכפילים את חוזקי הקשרים בערך גדול מספיק מופיעות ברשת תבניות מורכבות של פעילות ספונטנית גם כשאין קלט ישיר. באותו אופן שהמודל מתרגם תמונה הנופלת על הרשתית לפעילות של הרשת, ניתן לתרגם פעילות של הרשת לתמונה שאמורה הייתה להיות על הרשתית. מעניין במיוחד להשוות את התוצאות לעבודה שנערכה על-ידי חוקר בשם קלובר באמצע המאה העשרים ובה נאספו תרשימים של הזיות גיאומטריות ממקומות שונים בעולם ומהשפעות של סמים הזייתים שונים. קלובר מצא כי ניתן לסווג את התרשימים לארבע קטיגוריות עיקריות: ספירלות, רשתות קורי עכביש, חלות דבש ומשפכים. ברסלוף ועמיתיו מצאו כי ניתן לקבל את כל הקטיגוריות הללו מהמודל שבנו.



תרשימים שהופקו על ידי מודל רשת נוירונים המחקק את התנהגות האזור הראייתי הראשוני בקליפת המוח



תמונות של הזיות ראייתיות שצוירו על-ידי אנשים בעת לקיחת סמים הזייתים

מהם כיווני המחקר האפשריים? ראשית, יש לבדוק כל העת את תקפותן של ההנחות העיקריות שהוזכרו בראשית המאמר. למשל, מהו אופי החישובים המבוצע על-ידי תא עצב בודד. חישובים מורכבים יותר ברמת התא יתבטאו ביכולות גבוהות יותר ברמת הרשת. ידוע גם כי המוח מכיל תאים נוספים המכונים תאי גליה, אשר מספרם עולה עשרות מונים על מספר תאי העצב והם אחראים בין השאר לתחזוקה השוטפת של תאי העצב. בשנים האחרונות, מתגלה כי תאי הגליה מעורבים גם בתהליכי למידה. הבנה מלאה יותר של תפקוד תאי גליה עשויה לשנות את הצורה בה אנו תופסים את עיבוד המידע והלמידה במוח.

במקביל, במסגרת ההנחות המקובלות כיום, אנו חותרים לפתח מודלים מורכבים יותר שישפכו אור על תפקודי מוח שונים. להבנות שיצמחו מהמודלים התיאורטיים עשויים להיות ישומים רפואיים חשובים.