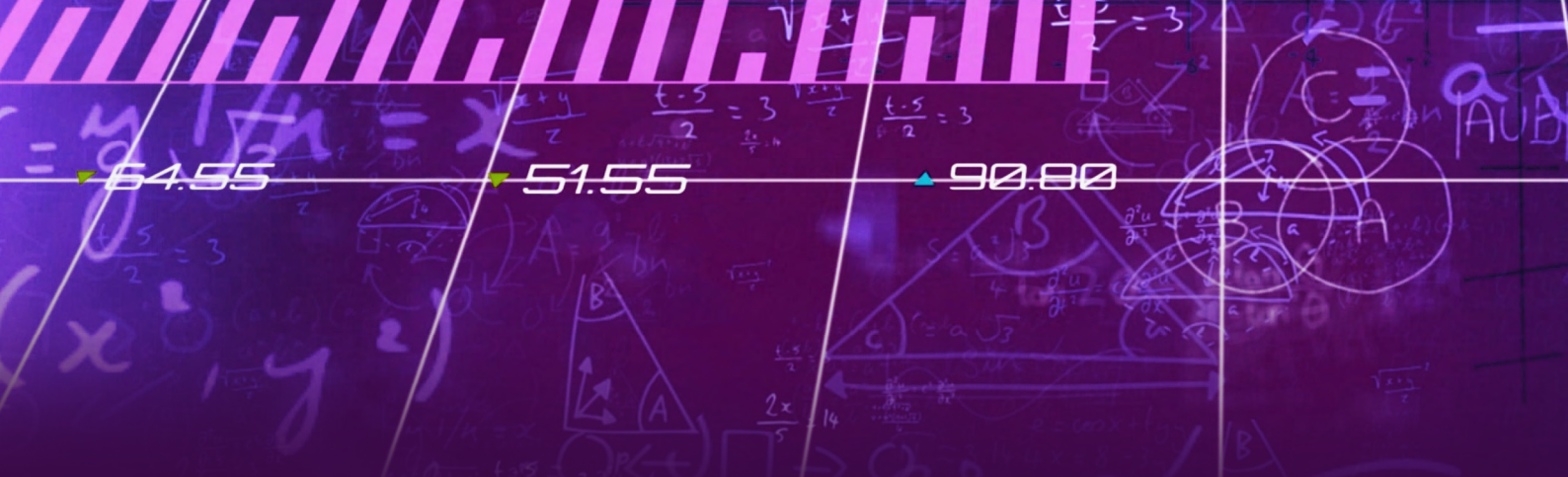




איך מחשב לומד?

ד"ר יוסי אלרן

בעל תואר שלישי בכימיה פיזיקלית תאורטית מאוניברסיטת בר-אילן, תעודת הוראה במתמטיקה ממכון ויצמן למדע ועבודת בתר־דוקטורט במכון ויצמן למדע והאוניברסיטה של טורונטו בקנדה. ראש יחידת החדשנות ומומחה למתמטיקה יצירתית-חזוניתית (recreational mathematician) במכון דוידסון לחינוך מדעי, מכון ויצמן למדע, ועוסק בפיתוח יוזמות חדשניות בחינוך מדעי ומתמטי, בטכנולוגיות למידה ובשילוב בינה מלאכותית בהוראה.



איך מחשב לומד? יוסי אלרן

תקציר

בשנים האחרונות אנו עדים לפריחה של יישומי בינה מלאכותית. לצד יכולות מרשימות כמו ניצחון של המחשב במשחקי שחמט ו"גו" (Go), יצירה של טקסטים, תמונות, סרטונים, ניתוח מידע, כתיבת קוד ועוד, אנו עדים גם להזיות, כמו הישענות על עובדות לא מבוססות, דמויות שמצוירות עם מספר אצבעות שגוי, המצאת ציטוטים ועוד.

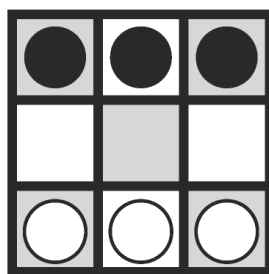
בבסיס הבינה המלאכותית, בין שמדובר בבינה מלאכותית "קלאסית" ובין שמדובר בבינה מלאכותית יוצרת, מתנהל תהליך "למידה" שהמחשב עושה אותו. לאדם ממוצע זה נראה כמו קסם. מתמטיקאים ומדעני מחשב ישתמשו במושגים כמו "למידת עומק" ו"רשתות נוירונים" כדי לתאר תיאור פורמלי את מה שעומד בבסיס הבינה המלאכותית, והם רואים בה תהליך מורכב ומסובך מאוד שקשה להבינו. ישנן כמה דרכים שבהן המחשב "לומד", אחת מהן, המכונה למידת חיזוק (reinforcement learning), בנויה על עיקרון פשוט יחסית של שכר ועונש. להבנה של תהליך למידה זה יש ערך רב לתלמידים ומורים כאחד. היא מקלפת את המסתורין שבבינה המלאכותית ומסבירה את היתרונות והחסרונות שלה. יתרה מזו, היא אף מאפשרת לדון דיון רציונלי ומבוסס בשאלה הפילוסופית הגדולה של גבולות הפוטנציאל של הבינה המלאכותית.

בשנות השבעים של המאה הקודמת תיאר מרטין גרדנר (Gardner, 1991) את תהליך "הלמידה" של מחשבים באמצעים פשוטים ביותר. על סמך מאמרו יצרנו פעילות בשביל תלמידים שבה הם יוצרים ומאמנים "מכונת חשיבה" העשויה מכוסות נייר וסוכריות והיא מסוגלת לשחק ולנצח משהו שמשחק נגדו משחק מוקטן של שחמט. פעילות זו ממחישה בדרך יעילה ופשוטה את תהליך למידת החיזוק בבינה המלאכותית. במאמר נציג את הפעילות וכיצד היא מסבירה את יכולות הלמידה של מחשב, נפתור את המשחק בשתי דרכים כדי להשוות בין האלגוריתמיקה של בינה מלאכותית ובין השיטה הלוגית הקלאסית, ונראה איך אפשר לשכלל את מכונת החשיבה ולהשתמש בה ובמכונות דומות בפעילויות אחרות.

מילות מפתח: בינה מלאכותית; למידת מכונה; חשיבה חישובית; אלגוריתמים; תורת הגרפים; משחקים מתמטיים; למידה מבוססת משחק; מתמטיקה יצירתית; מיני-שחמט.

משחק מיני-שחמט

משחק מיני-שחמט הוא משחק לוח 3x3 לשני שחקנים: שחקן עם חיילים לבנים, שתמיד פותח את המשחק, ושחקן עם חיילים שחורים. בתחילת המשחק יש לכל שחקן שלושה חיילים המיוצגים בדיסקיות. בתחילת המשחק השחקנים יושבים זה כנגד זה משני צידי הלוח וכל שחקן ממקם את חייליו בשורה הקרובה אליו כפי שמתואר באיור 1.



איור 1: המצב ההתחלתי בלוח מיני-שחמט

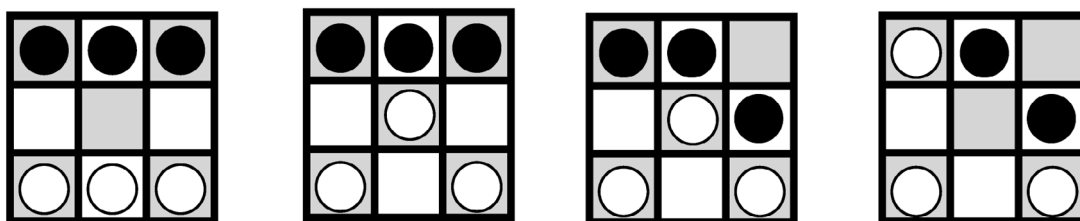


מותר לחייל לנוע רק קדימה ורק משבצת אחת בכל תור וזאת רק אם במשבצת שלפניו לא נמצא חייל אחר. במקום לנוע קדימה, חייל יכול לבחור בתורו להכות חייל של היריב כשהוא נמצא במשבצת אלכסונית ישירה בכיוון התקדמותו. במילים אחרות, אם יש חייל יריב באלכסון ישיר – משבצת אחת קדימה ומשבצת אחת שמאלה או ימינה – מותר להכות אותו ולהורידו מהלוח.

משחק זה מסתיים באחד מהמצבים האלה:

- א. חייל מגיע לשורה האחרונה.
- ב. שחקן מכה את כל חיילי היריב.
- ג. שחקן גורם לתקיעה של היריב – חייליו נמצאים במשבצות שבדרכו הישירה של יריבו ולא באף משבצת האלכסונית לו.

איור 2 מדגים משחק אחד של מיני־שחמט. השחקן הראשון בוחר לפתוח בהזזת החייל שלו (הלבן) האמצעי קדימה. יריבו מגיב בהזזת החייל השמאלי שלו (שחור) קדימה. הוא כמובן היה יכול לבחור במקום זאת להכות את החייל הלבן שבמשבצת האמצעית אך מסיבותיו שלו בחר שלא לעשות זאת. זו הייתה טעות מצידו, שכן החייל הלבן מנצל זאת והוא מכה את החייל השחור של היריב שבמשבצת האלכסונית שמשמאלו (הימנית של היריב). לפיכך הוא מגיע ראשון לשורה האחרונה ומנצח במשחק.



איור 2: דוגמה למשחק מיני־שחמט (משמאל לימין)

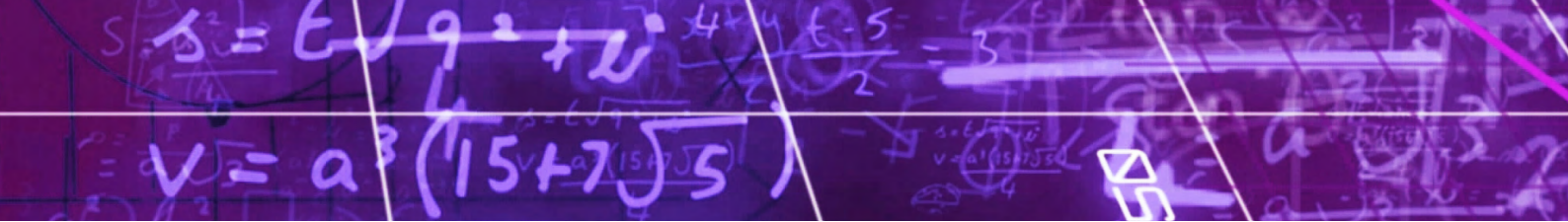
פתרון המשחק בעזרת גרף

מתמטיקאים מסווגים משחקים לפי קריטריונים מגוונים, למשל, האם המשחק מסתיים לאחר צעדים סופיים (כמו במשחק שחמט)? האם יש במשחק רכיב של מזל (כמו ששיבש)? האם המשחק חייב להסתיים בתיקו (כמו באיקס-עיגול)? האם המשחק חייב להסתיים בניצחון של אחד השחקנים (כמו במשחק נים)? ואם כן, בהנחה ששני השחקנים חכמים, כלומר שהם משחקים את המהלך הטוב ביותר בכל זמן נתון, האם השחקן הראשון הוא המנצח? אולי שחקן אחר?

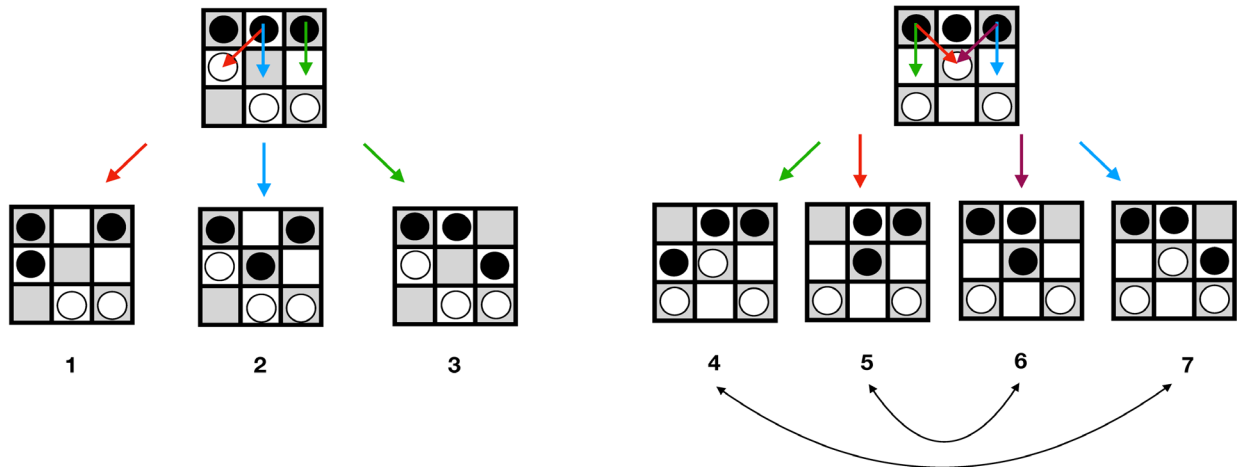
התכנון של משחק המיני־שחמט הוא שהשחקן השני, כלומר השחקן השחור, יכול תמיד לנצח וזאת בתנאי שבכל מצב שייתקל בו, הוא יבחר את המהלך הנכון. לכן עליו לפרוס את כל המצבים שייתכנו ולתכנן איך להגיב בכל מצב שהוא אכן ינצח. דרך מתאימה לעשות זאת היא בעזרת גרף מכון, מבנה מתמטי הבנוי מנקודות (המכונות קודקודים או צמתים) וחיצים המחברים ביניהן (המכונים קשתות). גרף זה מייצג את כלל המצבים שייתכנו במשחק כולו. במשחק המיני־שחמט הקודקודים בגרף הם המצבים והקשתות הם דרכי התגובה של היריב בכל שלב במשחק.

נצייר את גרף משחק המיני־שחמט, שפרוסים בו כל המהלכים שייתכנו במשחק עד להפסד או ניצחון (תיקו כאמור אינו ייתכן). הגרף יצויר כמו מעין עץ ההולך ומתפתח על פי דרכי התגובה על כל מהלך. במתמטיקה גרף מסוג זה מכונה בפשטות "עץ" ונכנה אותו בשם זה מכאן והלאה. איור 3 מראה את הרמה הראשונה והשנייה של העץ. הקודקודים ברמה הראשונה של העץ הם מצבי הפתיחה של השחקן הלבן. אומנם יש שלוש פתיחות לשחקן הראשון אך כדי להקל על משימת ציור העץ, נשתמש בשיקולי סימטריה ונדון רק בשני צעדים פותחים של השחקן הלבן – פתיחה במשבצת אמצעית, כפי שראינו בדוגמה באיור 2, ופתיחה שבה החייל הלבן הנמצא במשבצת השמאלית צועד קדימה. מותר לנו לעשות זאת משום שפתיחה של החייל הלבן במשבצת הימנית היא סימטרית למהלך זה – המשחק מתנהל כביכול באמצעות מראה המוצבת בצד השמאל של הלוח.

השחקן השחור יכול להגיב באחת משלוש דרכים על מהלך פתיחה שבו השחקן הלבן מתקדם עם החייל השמאלי, ובאחת מארבע דרכים למהלך פתיחה שבו השחקן הלבן מתקדם עם החייל האמצעי. שבעת המצבים שייתכנו ברמה השנייה מיוצגים במספרים 1–7 והם מתוארים בקודקודי הרמה השנייה של העץ. מהלכי התגובה של השחקן השחור המכונים

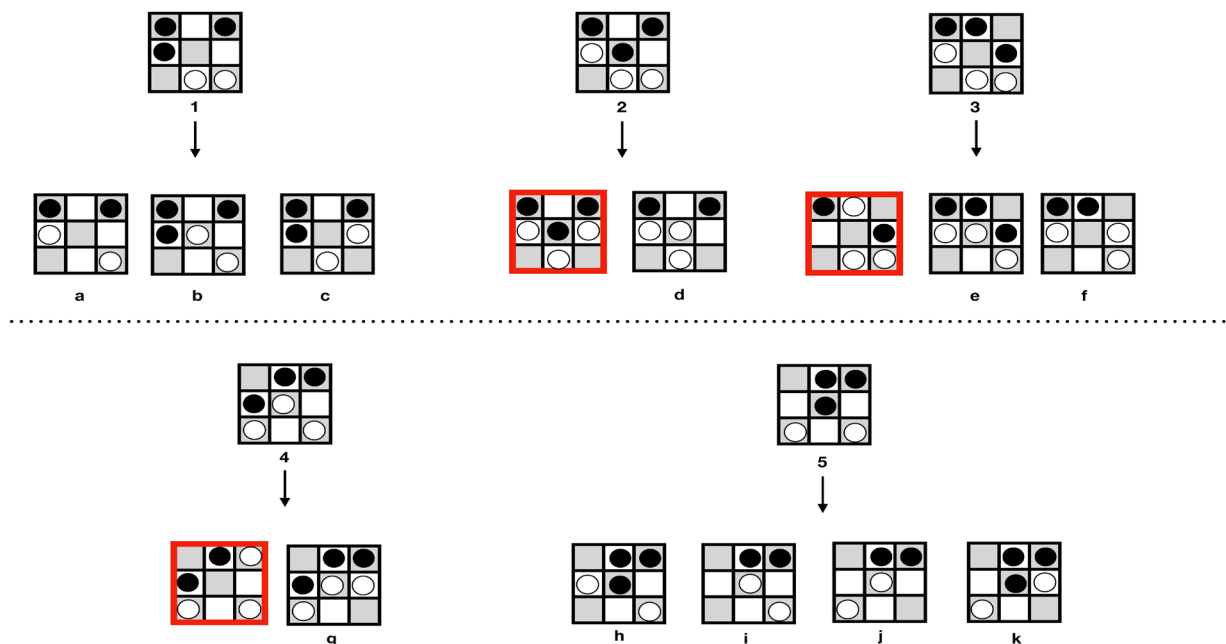


למצבים אלו מתוארים באיור בחיצים צבעוניים בתוך הלוחות ברמה הראשונה. הקשתות המכוונות מהרמה הראשונה של העץ לרמה השנייה מתוארות בחיצים צבעוניים בהתאמה לצבע החץ של מהלך השחקן השחור. לדוגמה, החץ האדום בלוח ברמה הראשונה באיור 3 מתאר מהלך שבו החייל השחור האמצעי מכה את החייל הלבן שבמשבצת האלכסונית של ימינו. החץ (הקשת) האדום שבין הרמות משמעותו שמהלך זה של החייל השחור מכוון למצב לוח מספר 1 ברמה השנייה של העץ. נשים לב שמצב 5 ומצב 6 סימטריים (בהקבלה לפעולת שיקוף) וכן גם מצב 4 ומצב 7. לכן אפשר לצמצם את מספר המצבים שייתכנו לחמש.



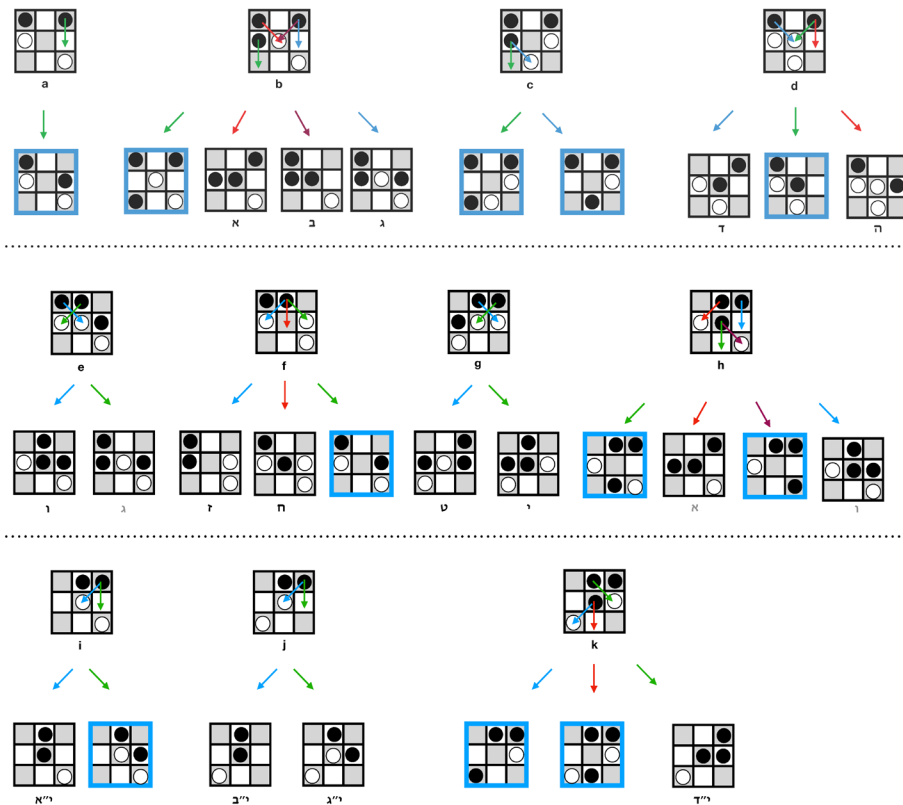
איור 3: הרמה הראשונה – מצבי הפתיחה של השחקן הלבן והרמה השנייה – מצבי התגובה של השחקן השחור בעץ המצבים של משחק המיני-שחמט

איור 4 מראה את המעבר מהרמה השנייה – חמשת המצבים של השחקן השחור המגיב על מהלכי הפתיחה של השחקן הלבן – לרמה השלישית המתארת את 14 המצבים המתקבלים מתגובת השחקן הלבן. 14 מצבים אלו מיוצגים באותיות a-k. כדי להקל על המעקב אחרי השחקנים נצייר חיצים במפורש רק למהלכי השחקן השחור (בהמשך תגלם אותו המכונה) ולא למהלכי השחקן הלבן, לכן הם אינם מופיעים באיור 4. השחקן השחור במסגרת אדומה מצבי הפסד של השחקן השחור, כלומר מצבי ניצחון של השחקן הלבן. השחקן השחור צריך לתכנן לא לאפשר לשחקן הלבן להגיע למצבים אלה ולכן הוא יתכנן לא לעשות מהלכים שיכוונו למצב 2, 3 ו-4 כי בנקודות אלו לשחקן הלבן יש בחירה ולפיכך הוא יוכל לבחור להביא את השחקן השחור לידי הפסד.

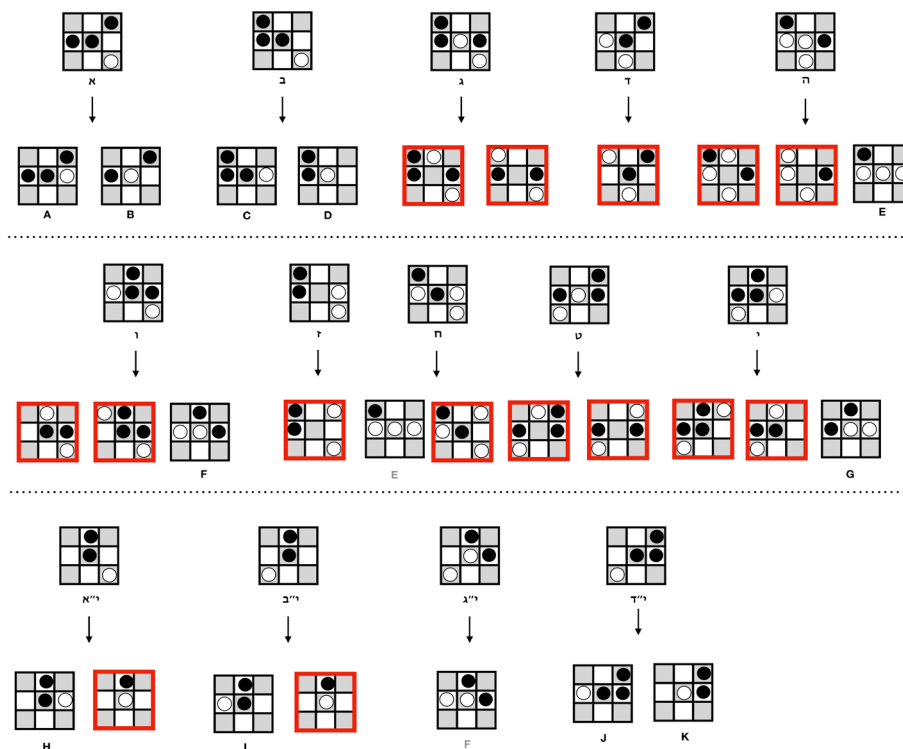


איור 4: הרמה השנייה והרמה השלישית בעץ המצבים של משחק המיני-שחמט

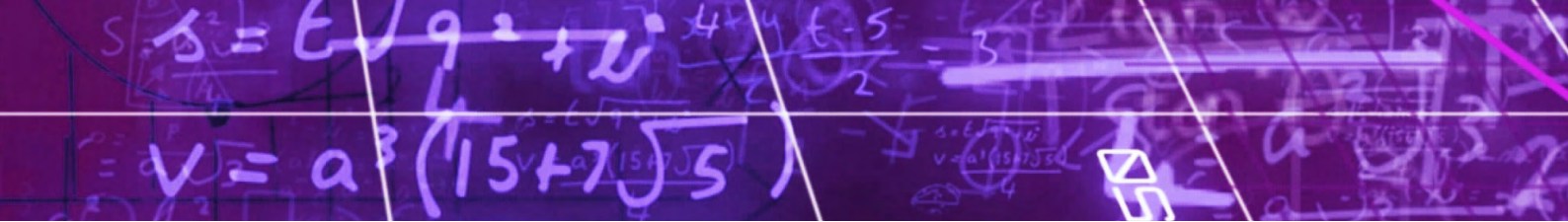
איור 5 ואיור 6 מראים את הרמות שלאחר מכן בעץ המשחק. המצבים המגוונים הפתוחים לפני השחקן הלבן מיוצגים באותיות האל"ף-בי"ת ואלו שפתוחים לפני השחקן השחור מיוצגים באותיות לועזיות גדולות. המצבים עם המסגרות הכחולות הם מצבי ניצחון של השחקן השחור.



איור 5: הרמה השלישית והרמה הרביעית בעץ המצבים של משחק המיני-שחמט

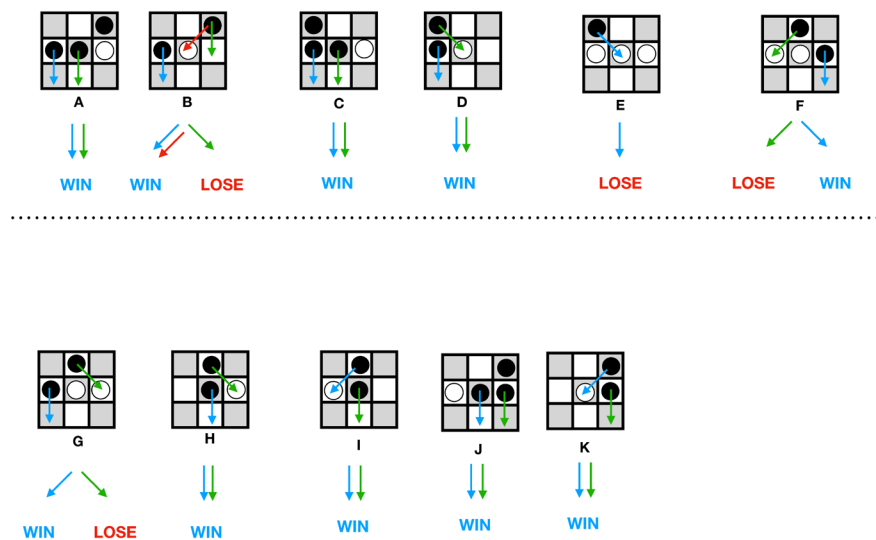


איור 6: הרמה הרביעית והרמה החמישית בעץ המצבים של משחק המיני-שחמט

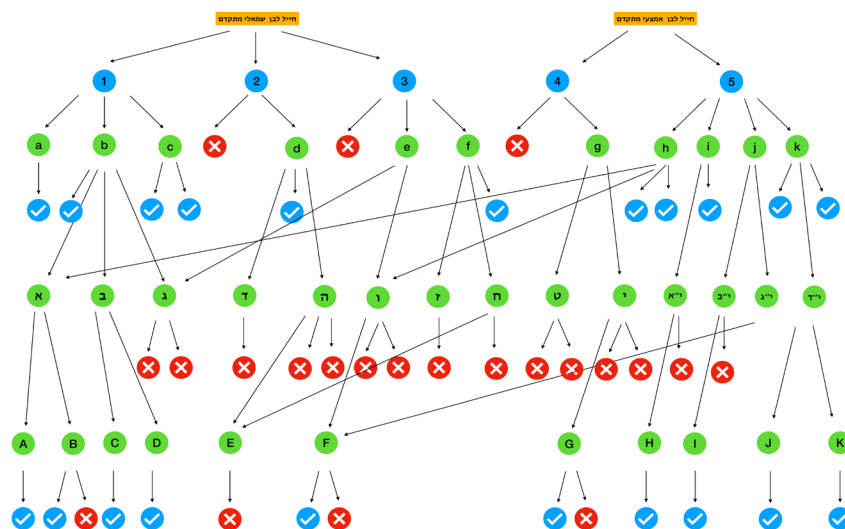


הרמה השישית היא הרמה האחרונה במשחק משום שכל המצבים מביאים לידי ניצחון של אחד השחקנים. איור 7 מראה מצב זה. מצבי הניצחון של השחקן השחור מסומנים במילה "WIN" ומצבי ההפסד במילה "LOSE". איור 8 מראה את כל העץ כאשר המצבים עצמם, הקודקודים, מיוצגים במספרים ובאותיות על פי הסימונים שבחרנו לכל רמה. בעץ זה מצבי הניצחון של השחקן השחור מסומנים ב-✓ ומצבי ההפסד ב-X. נזכור שמצבי הבחירה של השחקן השחור, הצמתים שבהם יש לו יכולת להשפיע על המשחק, הם התגובה על מהלך הפתיחה של השחקן הלבן (רמה 1), אות לועזית קטנה (רמה 3) ואות לועזית גדולה (רמה 5).

לפני המשחק השחקן השחור צריך לנתח עץ זה ולשחק תמיד מצבים שאינם מאפשרים לשחקן הראשון לנצח. מניתוח זה השחקן השחור מבין שעליו להגיב על הפתיחה שבה חייל לבן שמאלי מתקדם במהלך המסומן בחץ האדום המכוון למצב 1 כי אז תגובת השחקן הלבן תכוון לאחד מהמצבים a, b או c ומכל אחד ממצבים אלו הוא יכול להכריע את המשחק מייד (במהלך המסומן בחיצים הירוקים במצב a ו-b וחץ הירוק או הכחול במצב c). אם השחקן הלבן פותח בקידום החייל הלבן האמצעי, על השחקן השחור לבחור במהלך המסומן בחץ האדום המכוון למצב 5 כדי שאם תגובת השחקן הלבן תכוון למצב h, i או k, יוכל השחקן השחור לנצח מייד ואם השחקן השחור ניצב לפני מצב j, הוא יבחר במסלול י"ג – F – ניצחון.



איור 7: הרמה החמישית בעץ המצבים של משחק המיני-שחמט מכוננת לרמה שישית שבה כל מצב מביא לידי ניצחון או הפסד של השחקן השחור



איור 8: עץ משחק מיני-שחמט

פתרון המשחק בעזרת מכונת חשיבה הבנויה מכוסות נייר וסוכריות

עצי החלטה הם כלי מתמטי יעיל מאוד לניתוח ותכנון של משחקים ושימוש בהם הוא הדרך המועדפת על מתכנתים בבואם לתכנן משחקים שבהם שחקן משחק נגד מחשב. אותם מתכנתים משתמשים בטכניקה של חשיבה חישובית – אלגוריתמיקה הנשענת על לוגיקה. הם פורסים את כל המהלכים שייתכנו במשחק בגרף ובכל צומת קובעים למחשב איך להגיב באמצעות משפט "אם-אז". שורת קוד במשחק מיני-שחמט יכולה להיות לדוגמה: "אם אתה נתקל במצב j תגיב במהלך המיוצג על ידי החץ הירוק שמוביל למצב "ג". ואולם ברוב הפעמים, כמו למשל במשחק שחמט תקני, מדובר בגרפים עצומים ולכן מסיבות מעשיות (מקום בזיכרון, זמן וכו') אי אפשר לתכנת משחקים כאלה בדרך זו. נוסף על כך יש משחקים שאינם מסתיימים בניצחון כורחני של אחד השחקנים (למשל אם כל אחד מהשחקנים יכול לכפות תיקו), או שהם אינם מסתיימים בכלל (משחקים אינסופיים). משחקים אחרים, כמו שש-בש, תלויים במזל.

בשל מגבלות אלה יש צורך בשיטות נוספות לפתרון משחקים באמצעות מחשב. שיטה אחת מסתמכת על למידת מכונה (machine learning). בשיטה זו יש שני שלבים: שלב של אימון שבו המכונה לומדת את המשחק ולאחריו שלב שבו המכונה "מבצעת" והיא מוכנה לשחק "על אמת". בשלב האימון המכונה משחקת את המשחק שוב ושוב כאשר היא לומדת בכל משחק אילו מהלכים הם מהלכים טובים ואילו הם מהלכים לא טובים מתוך כך שהיא מתוגמלת על מהלכים נבונים ומוענשת על מהלכים שמביאים לידי כישלון.

נדגים כיצד שיטה זו פועלת באמצעות משחק המיני-שחמט, כאשר שחקן אנושי (השחקן הלבן) משחק נגד מכונת חשיבה (השחקן השחור). למרבה הפלא לא נשתמש במחשב או מכשיר אלקטרוני בתור המכונה, אלא בהשראתו של מרטין גרדנר (Martin Gardner), נבנה מכונת חשיבה "מכנית" באמצעות 24 כוסות קפה עם מכסים וחבילת סוכריות צבעוניות. נכין בצד לוח משחק וחיללים כפי שמופיע באיור 1 לעיל. אפשר להכין את הלוח והחיללים באמצעות בריסטול או נייר רגיל. נדפיס את כל צומתי הבחירה העומדים לפני השחקן השחור שתגלם אותו מכונת החשיבה. אלה כל הלוחות שמצוירים בהם חיצו הבחירה של השחקן השחור באיור 3, 5 ו-7. על המכסה של כל כוס מדביקים מצב אחד מהמצבים המודפסים. לנוחיות הקוראים קיבצנו אותם לאיור אחד בנספח 1. בתוך כל כוס שמים סוכריות במספר ובצבע של החיצים המופיעים על גבי המצב המודבק על המכסה של אותה כוס. לדוגמה, בכוס שעל המכסה שלה מודבק מצב h נשים סוכרייה אחת בצבע כחול, סוכרייה אחת בצבע ירוק, סוכרייה אחת בצבע אדום וסוכרייה אחת בצבע סגול.

השלב הראשון הוא אימון המכונה. בשלב זה משחקים נגד המכונה ומאמנים אותה לבחור מהלכים נבונים. כדי לעשות זאת המאמן משחק בתפקיד השחקן הלבן וצופה ניטרלי מפעיל את המכונה המשחקת בתפקיד השחקן השחור. תפקיד הצופה הניטרלי להפעיל אלגוריתם של בחירת מצב אקראי בשביל המכונה. במשחק האימון, השחקן הלבן עושה מהלך והצופה הניטרלי מגיב על מהלך זה בתפקיד "המכונה" בדרך הזו: הוא מרים את מכסה הכוס ובוחר באקראי את אחת הסוכריות מתוך הכוס מבלי להסתכל בה. אחרי שהוא סוגר את המכסה, הוא מניח את הסוכרייה לעין כול על גבי המכסה של הכוס. הוא מסתכל בסוכרייה ועושה את המהלך שבו צבע החץ הזה לצבע הסוכרייה. כלומר צבע הסוכרייה הנבחרת מכתוב את מהלך המכונה. לדוגמה, אם השחקן הראשון פותח בחייל אמצעי, והצופה הניטרלי מוציא סוכרייה ירוקה, המהלך שהוא עושה הוא המהלך המיוצג בחץ הירוק ברמה 2, כלומר הזזת החייל הימני שלו (והשמאלי של יריבו) צעד אחד קדימה – למצב 4.

ממשיכים לשחק כך עד לניצחון או הפסד. הלמידה של המכונה מתנהלת כאשר המכונה מפסידה במשחק. רק אז הצופה אוכל את הסוכרייה המייצגת את המהלך האחרון שהמכונה עשתה ומונע ממנה לחזור על הטעות. שאר הסוכריות מוכנסות חזרה לכוסות שלהן, כל אחת לתוך הכוס שנלקחה ממנה. עם הזמן, ככל שמתרבים משחקי האימון, המהלכים השגויים של המכונה מתבטלים והיא נשארת רק עם בחירות שמכוונות לניצחונה. לפניכם דוגמאות לשני משחקי אימון של המכונה השונים זה מזה. בדוגמה הראשונה השחקן השחור (=המכונה) מנצח ובדוגמה השנייה הוא מפסיד.

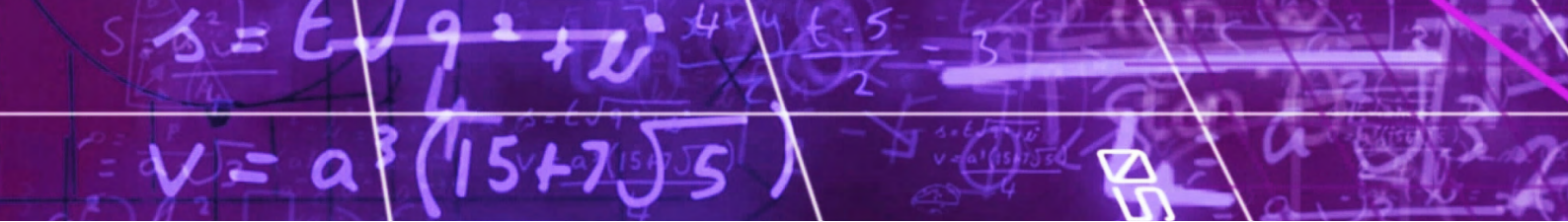
דוגמה למשחק אימון שבו השחקן השחור מנצח

שחקן לבן: מקדם את החייל השמאלי צעד אחד קדימה.

צופה ניטרלי: פותח את מכסה הכוס, מוציא באקראי סוכרייה אחת ומבלי להסתכל בכוס. הוא סוגר את המכסה ומניח את הסוכרייה מעל הכוס. כולם מסתכלים בסוכרייה. הסוכרייה בצבע אדום. הוא עושה את המהלך המיוצג בחץ האדום, כלומר הוא מכה את החייל הלבן שזה עתה התקדם. מצב הלוח כעת הוא מצב 1.

שחקן לבן: גומל לשחקן השחור ומכה את החייל השחור. הלוח כעת במצב a .

צופה ניטרלי: פותח את מכסה הכוס, מוציא באקראי סוכרייה אחת ומבלי להסתכל (כאן יש רק סוכרייה אחת בכוס a).



הוא סוגר את המכסה ומניח את הסוכרייה מעל הכוס. כולם מסתכלים בסוכרייה. הסוכרייה בצבע ירוק. הוא עושה את המהלך המיוצג בחץ הירוק, כלומר הוא מתקדם עם החייל השחור הפנוי צעד קדימה ומנצח במשחק באמצעות חסימת כל החיילים הלבנים – השחקן הלבן לא יכול לזוז. לסיום הוא מחזיר את כל הסוכריות שמחוץ לכוסות לתוך הכוסות שלהן, וכך המכונה מוכנה למשחק שלאחר מכן.

דוגמה למשחק אימון שבו השחקן השחור מפסיד

שחקן לבן: מקדם את החייל האמצעי צעד אחד קדימה.

צופה נייטרלי: פותח את מכסה הכוס, מוציא באקראי סוכרייה אחת ומבלי להסתכל בכוס. הוא סוגר את המכסה ומניח את הסוכרייה מעל הכוס. כולם מסתכלים בסוכרייה. הסוכרייה בצבע סגול. הצופה הנייטרלי מסביר לשחקן הלבן שהמהלך עם החץ הסגול סימטרי למהלך עם החץ האדום ומחליף את הסוכרייה הסגולה בסוכרייה אדומה. הוא עושה את המהלך המיוצג בחץ האדום, כלומר הוא מכה את החייל הלבן שזה עתה התקדם. מצב הלוח כעת הוא מצב 5.

שחקן לבן: גומל לשחקן השחור ומכה את החייל השחור עם החייל הלבן הימני שלו. הלוח כעת במצב j.

צופה נייטרלי: פותח את מכסה הכוס, מוציא באקראי סוכרייה אחת ומבלי להסתכל בכוס. הוא סוגר את המכסה ומניח את הסוכרייה מעל הכוס. כולם מסתכלים בסוכרייה. הסוכרייה בצבע כחול. הוא עושה את המהלך המיוצג בחץ הכחול, כלומר הוא מכה את החייל הלבן שבמשבצת האמצעית. מצב הלוח כעת הוא מצב י"ב.

שחקן לבן: מכה את החייל השחור שבמשבצת האמצעית ומתוך כך חוסם את החייל השחור האחרון שנשאר. לכן הוא המנצח של המשחק.

צופה נייטרלי: אוכל את הסוכרייה הכחולה כדי ללמד את המכונה "לקח". מעתה המהלך האחרון, שהביא לידי הפסד השחקן השחור, לא יתנהל בשום משחק המשך עם אותה מכונה פשוט משום שהברירה הזו לא קיימת יותר. הוא מחזיר את כל הסוכריות שנשארו (חוץ מזו שנאכלה) לתוך הכוסות.

מתברר שלאחר מעט משחקים המכונה כבר תנצח בכל משחק משום שכל המהלכים שהביאו לידי הפסדה כבר אינם קיימים. הסוכריות שייבחרו בכל שלב יהיו רק כאלה שמסמנות חיצים שמכוונים למצבי ניצחון שלה. לאחר כמה משחקים קובעים שהמכונה סיימה את האימון והיא מוכנה לשימוש. נשים לב כי ככל שיהיו יותר משחקי אימון, כך המכונה תהיה מדויקת יותר, אבל מצד אחר ההכרזה על המכונה שהיא "מבצעת" תתעכב. הקוראים מוזמנים לבנות מכונה כזו, לאמן אותה ולשחק נגדה (או להזמין חברים לשחק נגדה). האלגוריתם המוצג כאן מדגים יפה את התהליך ואת היתרונות של למידת מכונה. אומנם המכונה צריכה לדעת מראש את כל המצבים והמהלכים שייתכנו במשחק אך היא אינה צריכה לנתח אותם, לזכור מהלכים קודמים (למעט המהלך האחרון) או לתכנן מהלכים עתידיים.

הצעות לשכלול מכונת החשיבה

אחרי שבנינו את מכונת החשיבה, אפשר לשכלל אותה בכמה דרכים. אפשר למשל להגדיל את הלוח לגודל 4×4 . אפשר לשנות את הכללים, למשל לאפשר "תיקו" כאשר שחקן חוסם שחקן אחר. דרך אחרת היא לשנות את שיטת השכר ועונש. נזכור שהמשחק הוא משחק שבו שחקן שחור חכם תמיד ינצח. נניח שאנחנו מעוניינים לתת הזדמנות לשחקן הלבן לנצח מדי פעם, כלומר להעניק למכונה מאפיינים אנושיים יותר. המשמעות מבחינת האלגוריתם היא לעדן את תהליך התגמול. אפשר למשל להחליט לאכול את הסוכרייה לאחר כל הפסד שני של המכונה או לאכול סוכרייה מדי פעם גם לאחר מהלך אחרון מנצח של המכונה. אפשר גם לשלוט בקצב הלמידה של המכונה בהוספת סוכריות לכוסות. כאשר מכפילים את מספר הסוכריות בכל כוס, הלמידה תהיה איטית יותר.

אפשר לייצר מכונות חשיבה דומות למשחקים אחרים. מכונת החשיבה הראשונה המתוארת בספרות (Michie, 1963), שידעה לשחק איקס-עיגול, הורכבה מ-304 קופסאות גפרורים ובהן היו חרוזים. גרדנר (Gardner, 1991) מתאר מכונות חשיבה אחרות שבנו קוראיו, בהן משחק מיני-דמקה ונים. תכנון ובנייה של מכונות אחרות כרוכים בבחירה מושכלת של המשימה שאנחנו רוצים שהמכונה תעשה אותה. בייחוד חשוב לחשב לפני הבנייה את מספר צומתי ההחלטה של המכונה כדי שהמשימה תוכל להתנהל בתנאים של זמן וחומרים מוגבלים. לאחר בחירת המשימה, פועלים בדומה למתואר במאמר זה, כלומר פריסת המצבים שייתקל בהם המחשב (צומתי ההחלטה) ויצירת מנגנון תגמול לפיהם. אפשר לחשוב על בניית מכונה כזו למשימות אחרות מלבד משחקים, למשל מכונה שתכתוב משפט פשוט ונכון מבחינה תחבירית באורך של עשר מילים ממאגר מצומצם של מילים. כדי להכין מכונה כזו נשתמש בעשר קופסאות נעליים, קופסה אחת לכל מילה במשפט. נדפיס עשרה עותקים של כ-100 מילים על פתקים ונשים עותק אחד בכל קופסה.



נסדר את הקופסאות בשורה כשהקופסה הראשונה תייצג את המילה הראשונה במשפט, הקופסה השנייה את המילה השנייה וכן הלאה. בשלב האימון נשלוף פתק אחד באקראיות מכל קופסה ונשים אותה מעליה. בסיום המשפט ניתן לו ציון לאחר שנשמד פתקים שמופיעות עליהם מילים שאינן תואמות למבנה תחבירי תקין ואת שאר הפתקים נחזיר למקום. אפשר גם לחזק מילים מוצלחות באמצעות שכפול פתקים "טובים" והכנסתם לקופסה או לקצר את התהליך בקביעת תחביר המשפט מראש, מתן תפקיד תחבירי לכל קופסה (למשל: הקופסה הראשונה תהיה שם עצם, הקופסה השנייה פועל וכן הלאה) והכנסת מילים ממאגרים מגוונים בכל קופסה (כלומר רק מילים שהן שמות עצם ייכנסו לקופסה הראשונה, רק פעלים לקופסה השנייה וכן הלאה).

אם רוצים בכל זאת ליצור מכונת חשיבה למשימה שבה יש צומתי החלטה רבים, אפשר כמובן להמיר את מכונת כוסות הקפה והסוכריות לתוכנת מחשב. אומנם זה מרחיב בהרבה את מספר המשימות שאפשר לפתור, ואולם לטעמי זה עלול לפגום בהבנת ההבדל בין אלגוריתם לוגי ואלגוריתם המסתמך על עיקרון התגמול. כמובן זה מגביל את החוויה הלימודית לתלמידים היודעים לתכנת.

סיכום ודיון

בניית מכונת חשיבה לפתרון מיני-שחמט היא פעילות חווייתית לכיתה, בייחוד אם עושים את העבודה בקבוצה. הפעילות מלמדת מיומנויות מספר, בהן מיומנויות חשיבה ברמה גבוהה, למידה שיתופית ואוריינות מידע. במהלך תכנון המכונה התלמידים נעזרים בקומבינטוריקה כדי לחשב את מספר המצבים שייתכנו ובתורת הגרפים כדי למפות אותם ולמצוא את כל המסלולים בין הרמות המגוונות בעץ המשחק.

נוסף על כך הם משתמשים בחשיבה חשובית ולומדים להבחין בין אלגוריתמים מגוונים לפתרון בעיות, ונחשפים לעקרונות חשובים בלמידת מכונה. עם זה חשוב לציין שזו למידת מכונה מסוג מסוים מאוד. בשל מגבלותיה היא דומה יותר לבניה מלאכותית קלסית הנפוצה במערכות מומחה. היא יכולה להדגים כמה מהעקרונות שבבסיס למידת מכונה, כמו חלוקת האלגוריתם לשלב אימון ושלב מבצעי, ומנגנוני תגמול בצומתי החלטה, אך היא לא יכולה להדגים את כל הגוונים למיניהן שבתחום רחב הזה.

יתרה מזו, יש צורך להיזהר מתפיסות מוטעות כפי שמביאים מרקס ועמיתיו במאמר חשוב בנושא (Marx et al., 2022). למשל, התלמידים עלולים לטעות ולחשוב שלמידת מכונה תיתכן רק כאשר ממפים מראש את כל המצבים, או רק כאשר מענישים על כישלון, או שבמודלים של למידת מכונה בוחנים כל צומת החלטה בנפרד. ההרחבות המוצעות בסעיף הקודם עשויות לתת פתרון חלקי לפחות לחלק מתפיסות מוטעות אלו. חשוב לנהל דיון כיתתי בסוף הפעילות ולעמוד על הדומה והשונה בין מכונת החשיבה של המיני-שחמט ובין סוגים אחרים של למידת מכונה. אפשר להרחיב את הפעילות ולכלול חשיפה והתנסות בסוגים אחרים של למידת מכונה כמו מכונת הלימוד של גוגל (Carney et al., 2020) (Google Teachable Machine).

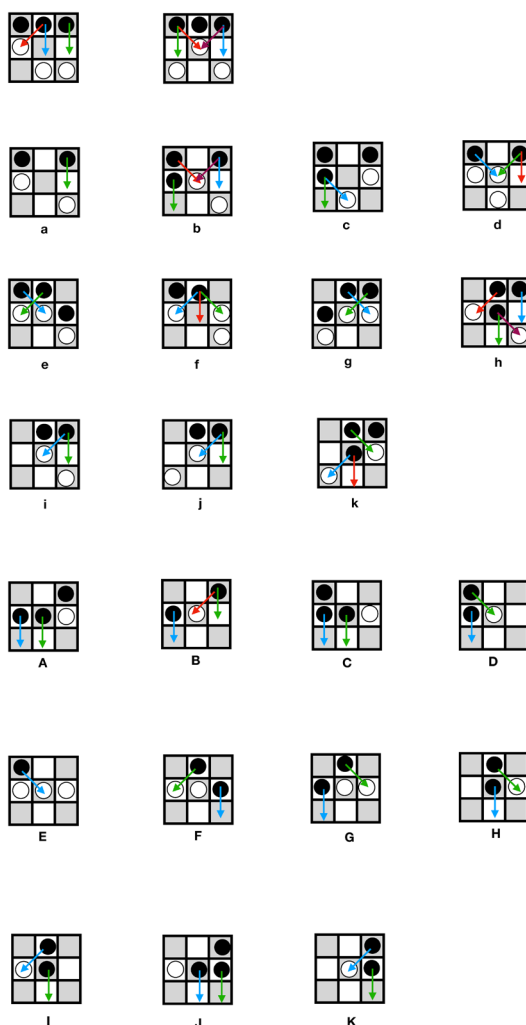
דיון כיתתי מזמן גם שיח פילוסופי על מהות הלמידה. האם גם אנחנו לומדים טוב כשמשמשים בשיטות של שכר ועונש, כמו משנתו הביהוויוריסטית של סקינר (Skinner, 1961)? האם בינה מלאכותית יכולה לפעול לפי תאוריות למידה אחרות כמו אלו של פיאז'ה, ויגוצקי ואחרים?

תכנון ובנייה של מכונות חשיבה מכניות הם פעילות כיתתית נהדרת בתחום המתמטיקה היצירתית (recreational math). יש לה ערך הן בהבנה של אלגוריתמיקה של למידת מכונה הן בפיתוח מיומנויות מתקדמות רבות החיוניות למאה העשרים ואחת. בסופו של דבר פיתוח מיומנויות אלו הן הדבר החשוב בעבור תלמידנו והן יהיו להם לעזר רב בבגרותם בפילוס דרכם בחיים המודרניים.

רשימת מקורות

- Carney, M., Webster, B., Alvarado, I., Phillips, K., Howell, N., Griffith, J., Jongejan, J., Pitaru, A., & Chen, A. (2020). Teachable machine: Approachable web-based tool for exploring machine learning classification. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (LBW017)*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3334480.3382839>
- Gardner, M. (1991). A matchbox game-learning machine. In *The unexpected hanging and other mathematical diversions* (pp. 90–102). University of Chicago Press.
- Marx, E., Leonhardt, T., Baberowski, D., & Bergner, N. (2022). Using matchboxes to teach the basics of machine learning: An analysis of (possible) misconceptions. *Proceedings of the Second Teaching Machine Learning and Artificial Intelligence Workshop, PMLR 170*, 25–29.
- Michie, D. (1963). Experiments on the mechanization of game-learning part I. Characterization of the Model and its parameters. *The Computer Journal*, 6(3), 232–236. <https://doi.org/10.1093/comjnl/6.3.232>
- Skinner, B. F. (1961). The science of learning and the art of teaching. In B. F. Skinner, *Cumulative record* (Enlarged ed., pp. 145–157). Appleton-Century-Crofts. <https://doi.org/10.1037/11324-010>

נספח 1



איור 9: כלל מצבי הבחירה של השחקן השחור