מבוא לבינה מלאכותית 236501
תרגיל בית 2

יוני בן־צבי 203668900 דני פריימק 307003434

חלק א'

שאלה 3

השחקן הבסיסי ReflexPlayer בוחר את המצב הבא ע"י התבוננות בקבוצת המצבים העוקבים החוקיים שאליה יכול לעבור מהמצב הנוכחי, בחירת תת־קבוצת המצבים שתניב את הניקוד הגבוה ביותר מתוכה, ובחירה אקראית של מצב כלשהו מתוך תת־קבוצה זו. ההיוריסטיקה שבה הוא משתמש מחזירה את הניקוד של המצב הנבחן כעת.

חלק ב'

שאלה 1

ההיוריסטיקה שמימשנו בקובץ submission.py מחזירה ערך ∞ במקרה שהמצב שקיבלה מהווה ניצחון וערך $-\infty$ במקרה של הפסד. אחרת, ההיוריסטיקה מחזירה את סכום ששת הבאים (המרחקים לפי manhattanDistance):

1. ניקוד המצב.
2. אם רוב הרוחות לבנות (נאכלה קפסולה לאחרונה) יוחזר 300 חלקי מרחק הרוח הקרובה ביותר לפקמן. אם רוב הרוחות אינן לבנות אז במידה ומרחק הרוח הקרובה ביותר הוא בין 1 ל־3, כולל, יוחזר -50 חלקי מרחק הרוח.
3. אם יש רוחות וקיימת קפסולה במרחק בין 1 ל־ 9, כולל, מפקמן, יוחזר 30 חלקי מרחק הקפסולה הקרובה ביותר.
4. במידה ונותר אוכל (לא ניצחון) יוחזר 5 חלקי מרחק האוכל הקרוב ביותר.
5. 1 חלקי מספר הקירות סביב פקמן או 1.5 במידה ואין סביבו קירות.
6. ערך בינארי רנדומלי (המטרה תובהר בסעיף הבא).

שאלה 2

המוטיבציה להיוריסטיקה שהגדרנו היא ההבנה שלפרמטרים אליהם התייחסנו ישנה השפעה על הסיכוי לסיום המשחק עם ניקוד גבוה יותר מאשר להיוריסטיקה שמתייחסת רק לניקוד המצב. פירוט ע`פ המספור מעלה:

1. התחשבות בניקוד המצב מהווה כמובן פקטור חשוב בקביעת טיב המצב במשחק שמוכרע לפי סך הנקודות בסיומו ולכן נעדיף ניקוד גבוה בדומה להיוריסטיקה הפשוטה שסופקה לנו.
2. נשאף לאכול רוחות לבנות כדי להרוויח את 200 הנקודות על אכילתן ולכן התחשבנו במידע זה כך שהשחקן שואף להתקרב לרוחות במקרה זה. לעומת זאת, כדי להימנע מהפסד נתנו ערך שלילי לפרמטר המתייחס למרחק מהרוח הקרובה ביותר כאשר רוב הרוחות לא לבנות (לא ניתנות לאכילה).
3. בשל בונוס 200 הנקודות על אכילת רוח לבנה החלטנו שלרוב כדאי להתקדם לכיוון קפסולה במידה וישנן כאלו קרובות יחסית.
4. כאשר אין אוכל במצב עוקב רצינו שפקמן ינסה להתקרב לאוכל כלשהו.
5. פרמטר נוסף שראינו שמסייע לפקמן, אמנם באופן מועט, הוא מספר הקירות שסביבו. כאשר יש סביב השחקן פחות קירות יש לו יותר אפשרויות תנועה ולכן סיכוי טוב יותר לברוח מרוחות ולעיתים גם להתקרב לאוכל.

6. הוספת הערך הרנדומלי הקטן פותר מקרים של היתקעות על־ידי שבירת שוויון בין מצבים עוקבים בעלי ערך זהה.

אנו צופים כי ההיוריסטיקה שלנו תשפר את ביצועי השחקן ביחס להיוריסטיקה המתייחסת לניקוד בלבד בשל כך שהיא נותנת לפרמטרים נוספים להשפיע על אופן פעולת השחקן, ולפי הבנתנו ובדיקותינו אכן משפיעים באופן חיובי על ביצועיו.

חלק ג'

שאלה 1

שתי הנחות עליהן חשבנו:

- הנחה ראשונה היא שקיים סדר בקבלת ההחלטות של סוכני המשחק. כלומר, שישנו סדר בין הסוכנים לפיו מתקבלות ההחלטות כיצד לשחק, על אף שבפועל לא קיים סדר כנ"ל ביניהם וכן במשחק הפקמן ההחלטות כיצד לשחק מתקבלות בו זמנית (במובן שהמשחק אינו משוחק בתורות, כמו לדוגמא שחמט).
- הנחה נוספת היא שקיים יותר מסוכן אחד, להלן השחקן. כלומר, שישנם בהכרח יריבים/רוחות, למרות שניתן לשחק גם כאשר אין כאלו כלל.

ההנחה הראשונה אינה נכונה מהסיבה שפקמן אינו משחק תורות וכל הסוכנים אמורים לקבל את החלטתם כיצד לשחק בו זמנית ולכן לא קיים סדר בין הסוכנים. לגבי ההנחה השנייה אליה התייחסנו, כפי שנאמר מעלה, אף היא אינה בהכרח נכונה כי ניתן לשחק גם ללא רוחות ואז ישנו סוכן יחיד במשחק, השחקן.

שאלה 3

דרך נוספת למימוש מינימקס עבורה לא נוצרת שכבה נוספת לכל רוח היא שלכל צומת מקסימום שאינו מצב מטרה (אינו עלה) יווצר בן (צומת מינימום) עבור כל מהלך חוקי של השחקן, כמו קודם בדיוק. עבור צומת מינימום שאינו מצב מטרה יווצר בן (תמיד צומת מקסימום הפעם) עבור כל אחד מהצירופים האפשריים של מהלכי הרוחות, כלומר $\prod_{i=1}^{N} k_i$ בנים שונים, כאשר N הוא מספר הרוחות, ו־ k_i הוא מספר הצעדים החוקיים של הרוח ה־ i.

יתרונות השיטה שמימשנו:

- מקדם הסיעוף קטן משמעותית עבור מספר רוחות גדול.
- פשוטה יותר להבנה ולמימוש, מאחר והבעיה פורקה כעת לתת־בעיות זהות קטנות יותר (כל צומת נוצר ע"י ביצוע מהלך יחיד).
- מתייחסת לכל רוח בנפרד (יכול אולי לעזור כאשר ישנן רוחות מסוגים שונים).

יתרונות השיטה השנייה:

- יוצרת מבנה עץ משחק 'קלאסי' של מינימקס (כמו שאנו מכירים, ללא הכללות ושינויים), בו מופיעות שכבות מינימום ומקסימום בזו אחר זו לסירוגין.
- עבור עומקים גדולים, שיטה זו מאפשרת עומק רקורסיה קטן פי N (כאשר N הוא מספר הרוחות כמקודם).
- כמו־כן, עבור משחקים שבהם יש k־ים גדולים (כאשר k_i הוא מספר הצעדים החוקיים של כל סוכן), נקבל כי בשיטה השנייה, כאשר אנו בצומת מינימום, מתבצע חישוב מינימום על כל $\prod_{i=1}^{N} k_i \leq (\max_i (k_i))^N$ הבנים שלו, כפי שתיארנו. לעומת־זאת, בשיטה הראשונה שמימשנו, אותו החישוב גם־כן מתבצע, אבל יש חישוב מינימום נוסף על k_1 בנים, כלומר חישוב המינימום של התוצאות שהתקבלו מהפעלה של k_1 הפעולות החוקיות של הרוח הראשונה. כמובן שמבחינת סיבוכיות התוספת הינה זניחה (הוספת סיבוכיות ליניארית לסיבוכיות שעלולה להיות אקספוננציאלית), אבל היא קיימת.

חלק ד'

שאלה 1

מבנה העץ החדש שהוגדר עלול להשפיע על אלגוריתם $\alpha\beta$, ויכול גם לא. כלומר, אם הרוח בוחרת את צעדיה ללא תלות במצב הרוחות האחרות באותו gameState, אזי הגיזום יתבצע באותה הצורה כמו באלגוריתם $\alpha\beta$ עבור רמת מינימום יחידה בין כל שתי רמות מקסימום. אחרת, אם הרוח בוחרת את צעדיה כתלות במצב הרוחות האחרות באותו רגע, הגיזום עלול להשתנות שכן סדר הרוחות כעת חשוב, ולכן הגיזום עלול להתבצע בשכבה נמוכה או גבוהה יותר (מתוך שכבות המינימום), כתלות בסדר בין הרוחות. נדגיש כי כמובן יש חשיבות למיקום הגיזום, שכן גיזום מוקדם יותר (יותר גבוה בעץ) של תת־עץ יכול, בפוטנציה, לחסוך יותר בדיקות מאשר גיזום מאוחר (יותר נמוך בעץ).

שאלה 3

מבחינת בחירת מהלכים, הסוכנים אמורים להתנהג אותו דבר משום שכפי שלמדנו, אלגוריתם גיזום אלפא־בטא משמש לשיפור זמן הריצה ע"י אלימינציה מוקדמת של מהלכים שערכם בוודאות לא ישפיע על ערכי המינימקס של אבותיהם ולכן יחסוך פיתוח של צמתים מיותרים (במובן זה שלא ישפיעו על ערכי המינימקס שיפעפעו מעלה בעץ). אם־כן, אופן בחירת המהלכים לא אמור להשתנות מהאופן בו עובד אלגוריתם אלפא־בטא וכן זמן הריצה אמור להשתפר כפי שהוסבר.

חלק ה'

שאלה 2

השינוי ביחס לשני הסוכנים הקודמים הוא שכעת הסוכן מקבל החלטות בהתבסס על ההסתברות שרוח תבצע מהלך מסוים. במשחק ללא רוחות אין כמובן שום הבדל בין הסוכנים. במקרה הספציפי של סעיף זה, הרוחות פועלות רנדומלית והתפלגות ביצוע כל מהלך שלהן היא אחידה. ציפייתנו היא שביצועי הסוכן החדש יהיו טובים יותר, מאחר והוא לא מניח הנחה שגויה על התנהגות הרוחות, בשונה מהסוכנים הקודמים. כלומר, הסוכנים הקודמים הניחו שהרוחות יעדיפו לבצע מהלך שפוגע בשחקן ולא מהלך רנדומלי שכלל לא תלוי במצב המשחק הנוכחי. לכן, הסוכנים הקודמים יקבלו החלטות המתאימות לאסטרטגיה שאינה תואמת את המציאות ולכן סביר שאופן בחירת המהלכים שלהם יהיה פחות טוב. כמו־כן, סוכן ה־Expectimax פחות זהיר שכן אינו מסתמך על כוונת הרוחות להרע לו, אבל גם בעל סיכוי טוב יותר לקבל ניקוד גבוה יותר, מאחר והוא לוקח יותר סיכונים (כמו ללכת לכיוון אוכל שנמצא ליד רוח) שלרוב לא יתממשו שכן הרוחות פועלות באופן רנדומלי.

לדוגמא, סוכן ה־Expectimax עלול להתקרב יותר מדי לרוח כי הוא אינו מסתמך על כך שתלך לכיוונו, ואם היא אכן נוקטת בצעד זה, הסוכן יפסל. הדוגמא ההפוכה היא שהסוכן יכול להסתמך על כך שהרוח אינה תתקוף אותו בסבירות גבוהה כדי לאכול אוכל הצמוד אליה.

חלק ו'

שאלה 1

ההסתברות עבור הפעולה ה־ i הינה:

$$p\left(a_i\right) = \begin{cases} \frac{\text{best\_prob}}{\text{מספר הפעולות האופטימליות}} + \frac{1-\text{best\_prob}}{\text{מספר הפעולות החוקיות}} & i \text{ היא פעולה אופטימלית} \\ \frac{1-\text{best\_prob}}{\text{מספר הפעולות החוקיות}} & i \text{ אינה פעולה אופטימלית} \end{cases}$$

ומאחר וישנה חלוקה לשני מקרים, כשהראשון עבור מצב בו הרוחות רודפות (צבעוניות) והשני עבור מצב שבו הן נרדפות (לבנות), נקבל כי best_prob הינו ערך קבוע שמאותחל ביצירת הרוח מסוג DirectionalGhost (דיפולטית הוא 0.8) והוא מוגדר באופן הבא:

1. אם הרוחות רודפות, best_prob מייצג את רמת החשיבות שהרוח נותנת לרדיפה אחרי פקמן. פעולה אופטימלית במקרה זה מוגדרת להיות פעולה שהכי מקרבת את הרוח לפקמן.
2. אם הרוחות נרדפות, best_prob מייצג את רמת החשיבות שהרוח נותנת לבריחה מפקמן. פעולה אופטימלית במקרה זה מוגדרת להיות פעולה שהכי מרחיקה את הרוח מפקמן.

נעיר כי חישוב ישיר אכן מראה כי סכום כל ההסתברויות הוא 1.

שאלה 3

ההבדל היחיד בין המימושים הוא בהתפלגות ההסתברויות של הפעולות החוקיות של רוח במצב משחק נתון. כאמור, ההתפלגות במימוש הראשון היא יוניפורמית, בעוד ההתפלגות במימוש השני היא ההתפלגות שתוארה בשאלה 1.

שאלה 4

השיפור הבסיסי ביותר שנוכל להכניס הוא לתת לרוחות לבחור מהלכים באמצעות אלגוריתם $\alpha\beta$. זהו שיפור מאחר והאלגוריתם משפר את ביצועי כל סוכן, ובפרט את הרוחות, כאשר נבחר פונקציית הערכה היוריסטית אינדיקטיבית, כלומר שמחזירה ערכים בהתאם לטיב המצב. רעיונות לבניה של פונקציה כזו יהיו:

1. במידה והרוחות רודפות:

(א) אם יש יותר מרוח אחת, מימוש שיתוף פעולה ביניהן שיביא אותן למצב שהן מאגפות את פקמן בתדירות גבוהה ככל הניתן. נדגיש כי איגוף פקמן מועיל בהריגתו (ופוגע משמעותית בניקודו), משום שמוביל למצבים מהם פקמן לא יכול לחמוק.

(ב) אם פקמן נמצא באיזור בלוח ללא אוכל וללא קפסולות, מימוש התנהגות שתשאיר אותו תקוע שם עד שיבחר למות, בו־בזמן הניקוד שלו ימשיך לרדת, מאחר והשארת פקמן באיזור הנ״ל רק תגרום לירידה בניקודו.

(ג) מימוש התנהגות שתמנע משתי רוחות להיות באותה משבצת ברגע נתון, כי הלכה למעשה הן הופכות לרוח אחת במצב כזה וככל שיש יותר רוחות כך קשה יותר לפקמן לנצח ולנוע בחופשיות בלוח לכן עדיף לרוחות להימנע מהמצב המתואר לעיל.

(ד) אם נותר אוכל בודד במסך, וכן לא נותרו קפסולות, אז באופן אידאלי הרוחות ינועו סביב האוכל ויאלצו את פקמן לבחור באחת משתי אפשרויות: מוות או שיטוט בלוח תוך כדי ירידת ניקודו.

(ה) בנוסף לרדיפה אחר פקמן, מתן דגש מיוחד על מניעת אכילת קפסולות על־ידו.

2. במידה והרוחות נרדפות:

(א) בנוסף לבריחה רגילה מפקמן, שישאפו להתרחק אחת מן השניה ככל הניתן. בכך שיתרחקו זו מזו במצב זה, סביר שיקשו על פקמן לאכול אותן ולצבור את הניקוד על אכילתן כאשר הן לבנות.

חלק ז'

נגדיר את השערת האפס H_0: תוחלת הניקוד הסופי של סוכן ה־ReflexAgent עם הפונקציה ההיוריסטית המשופרת μ_{better} גבוהה מתוחלת הניקוד הסופי של סוכן ה־ReflexAgent עם הפונקציה ההיוריסטית המקורית μ_{original}.

נגדיר את ההשערה החלופית H_1: תוחלת הניקוד הסופי של סוכן ה־ReflexAgent עם הפונקציה ההיוריסטית המקורית μ_{original} גבוהה מתוחלת הניקוד הסופי של סוכן ה־ReflexAgent עם הפונקציה ההיוריסטית המשופרת μ_{better}.

נגדיר את המבחן: נסמן ב־μ'_{original} ו־μ'_{better} את התוחלות הנמדדות בהרצת מס' גדול של משחקים של הסוכן המקורי והמשופר בהתאמה. כעת, אם מתקיים

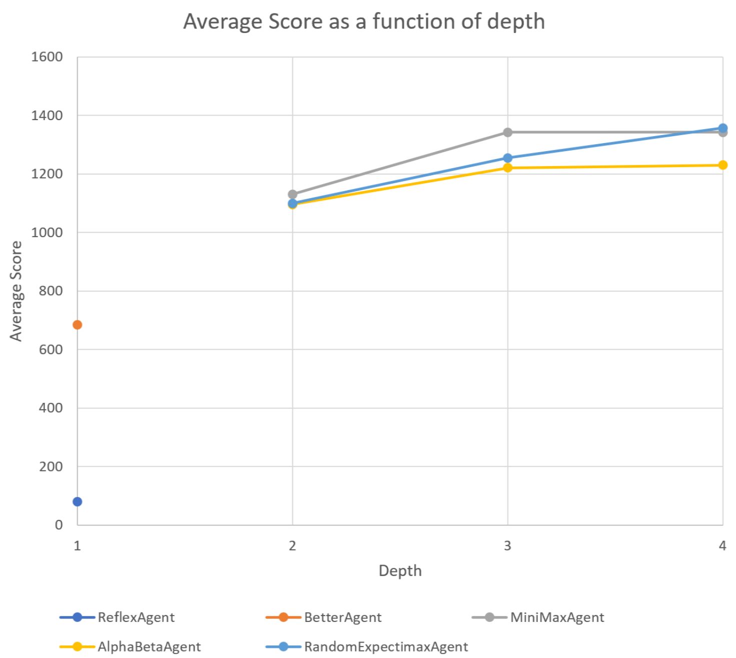
$$\mu'_{\text{original}} - \mu'_{\text{better}} + 200 \geq 0$$

אזי לא נדחה את השערת האפס. אחרת, נדחה אותה.

חלק ח'

שאלה 2

ממוצעי הניקוד של כל סוכן כתלות בעומק מתוארים בתרשים והטבלה הבאים:



איור 1: הניקוד הממוצע כתלות בעומק

	$d=1$	$d=2$	$d=3$	$d=4$
ReflexAgent	80.9	–	–	–
BetterAgent	684.1	–	–	–
MinMaxAgent	–	1130.5	1341.9	1342.2
AlphaBetaAgent	–	1095.5	1221	1229.7
RandomExpectimaxAgent	–	1099.6	1254.2	1356.5

טבלה 1: הניקוד הממוצע כתלות בעומק

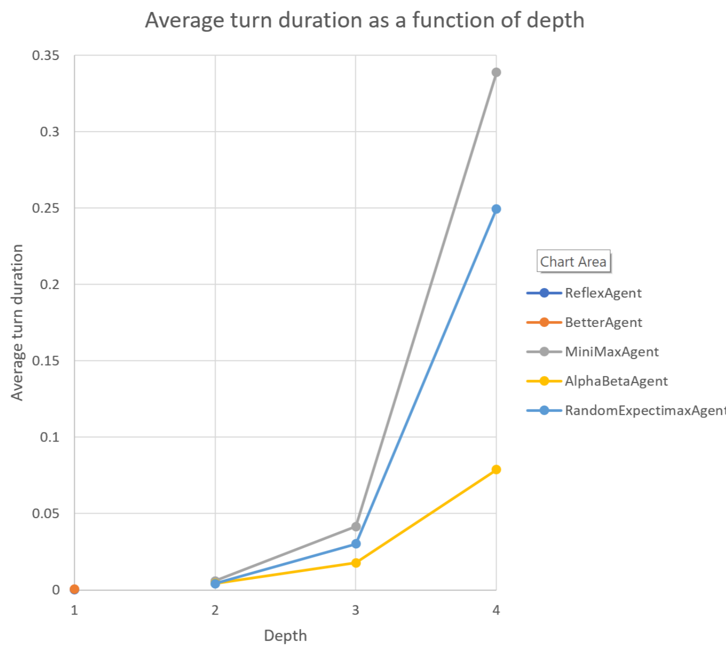
שאלה 3

מסקנותינו מתוצאות הניקוד הן:

- ההבדל בין ה־ ReflexAgent וה־ BetterAgent הוא כצפוי משמעותי (לטובת ה־ BetterAgent), וניתן לראות זאת בתוצאות.
- ניתן לראות כי אכן יש מגמת עליה בתוצאות ככל שהעומק עולה, אם כי העליה לא מאד משמעותית במעבר מעומק 3 לעומק 4, עבור כל הסוכנים המינימקס והן עבור סוכן ה־$\alpha\beta$. ההסבר שלנו לעובדה זו הוא שהרוחות, כמו שכבר ציינו בעבר, אינן משחקות לפי Minimax בעצמן אלא באופן רנדומלי, ולכן תכנון־יתר קדימה אינו בהכרח טוב יותר, כי הוא מסתמך יותר ויותר על הנחה שגויה על התנהגותן של הרוחות. עבור סוכן ה־Expectimax, העליה במעבר מעומק 3 לעומק 4 היא משמעותית יותר מאשר בסוכני המינימקס כי הוא אכן מסתמך על צורת התנהגות נכונה יותר של הרוחות, ולכן עומק גדול יותר אכן טוב מניב תוצאות טובות יותר.
- למרות שלמדנו שסוכן ה־$\alpha\beta$ אכן אמור לקצץ תת־עצים שאינם אופטימליים, אנו רואים שבפועל התוצאות עבור סוכן ה־ $\alpha\beta$ נמוכות מתוצאותיו של סוכן המינימקס. ההסבר שלנו לכך הוא שמאחר ונכונות הגיזום באלגוריתם $\alpha\beta$ היא עבור עלים של עץ החיפוש ולא עבור ערכים היוריסטיים (הנובעים מעומק מוגבל), אנו מקבלים גיזום של תת־עצים שכן עלולים להניב תוצאות טובות, כי איננו יודעים במדויק את ערכי העלים האמיתיים שבהם.
- ניתן לראות שאלגוריתם ה־Expectimax אכן טוב יותר משאר האלגוריתמים. זוהי תוצאה הגיונית מאחר והוא היחיד שבאמת חוזה את התנהגות הרוחות באופן רנדומלי, כפי שהיא במציאות.

שאלה 4

ממוצעי הזמנים לתור משחק יחיד כתלות בעומק מתוארים בתרשים והטבלה הבאים:



איור 2: ממוצע הזמנים לתור משחק יחיד כתלות בעומק

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$
ReflexAgent	0.00015	–	–	–
BetterAgent	0.0004	–	–	–
MinMaxAgent	–	0.00586	0.04149	0.33912
AlphaBetaAgent	–	0.00431	0.01779	0.07868
RandomExpectimaxAgent	–	0.00419	0.03019	0.24946

טבלה 2: ממוצע הזמנים לתור משחק יחיד כתלות בעומק

שאלה 5

ניתן לראות כי קיים הבדל בזמן הריצה של פונקציית היוריסטיקה המשופרת שכתבנו לעומת הפונקציה המקורית. זו כמובן תוצאה צפויה שכן חישובים רבים יותר מתבצעים בה. כמו־כן, שאר הסוכנים, שעובדים בעומקים גדולים יותר משני הראשונים, אכן צורכים זמן ריצה ארוך יותר משמעותית, כמצופה.

באופן כללי, הגדלת העומק אכן הגדילה את זמן הריצה לכל סוגי הסוכנים, באופן מונוטוני, כפי שציפינו. כמו־כן, ניתן לראות בבירור כי המעבר מאלגוריתם מינימקס לאלגוריתם $\alpha\beta$ אכן חסך זמן־ריצה רב, כפי שציפינו. ניתן לראות כי סוכן ה־RandomExpectimaxAgent נמצא בין $\alpha\beta$ לבין מינימקס.

שאלה 6

	RandomGhost	DirectionalGhost
RandomExpectimaxAgent	2310.6	720.2
DirectionalExpectimaxAgent	2139	1181.6

טבלה 3: השוואה בין תוצאות RandomExpectimaxAgent ל־ DirectionalExpectimaxAgent כתלות בסוג הרוחות (לוח trickyClassic ועומק 4)

ניתן לראות כי אכן, כמצופה, כל סוכן משחק טוב יותר כאשר מתאימים לו את הרוח איתה הוא מתוכנן לעבוד, לעומת הרוח שאינו מתוכנן לעבוד איתה. כמו־כן, ניתן לראות כי גם הסוכן שמתוכנן לעבוד עם רוח מסויימת מפיק תוצאות טובות יותר מהסוכן שאינו מתוכנן לעבוד עם הרוח הזו.

שאלה 7

תוצאות 100 ריצות עבור כל שחקן עם הגבלת עומק 4 (החל מהשחקן השלישי) על minimaxClassic:

שחקן	ניקוד ממוצע	זמן־ריצה ממוצע
ReflexAgent	161.14	0.0001
BetterAgent	-48.29	0.0002
MiniMaxAgent	409.6	0.0098
AlphaBetaAgent	338.63	0.005
RandomExpectimaxAgent	302.72	0.0099

טבלה 4: 100 ריצות של כל שחקן על minimaxClassic עם עומק 4

כפי שניתן לראות מהתוצאות מעלה, השחקן ששיחק הכי טוב הוא שחקן MiniMaxAgent והשחקן ששיחק הכי גרוע הוא BetterAgent. ניכר שבלוח זה ובתנאי השאלה שחקן ה־ MiniMaxAgent טוב בהרבה משחקן ה־ RandomExpectimaxAgent בשונה מלוחות אחרים. מאפיין בולט של הלוח: מטיב עם שחקן המשתמש באסטרטגיית MiniMaxAgent.

שאלה 8

תוצאות 100 ריצות עבור כל שחקן עם הגבלת עומק 4 (החל מהשחקן השלישי) על הלוח trappedClassic:

שחקן	ניקוד ממוצע	זמן־ריצה ממוצע
ReflexAgent	-501.64	0.0001
BetterAgent	46.02	0.0002
MiniMaxAgent	-243.01	0.0009
AlphaBetaAgent	-346.33	0.0004
RandomExpectimaxAgent	-243.03	0.0008

טבלה 5: 100 ריצות של כל שחקן על trappedClassic עם עומק 4

כפי שניתן לראות מהתוצאות מעלה, השחקן ששיחק הכי טוב הוא שחקן BetterAgent והשחקן ששיחק הכי גרוע הוא ReflexAgent. בלוח זה ובתנאי השאלה שחקן המינימקס ושחקן האקספקטימקס משחקים באופן זהה לחלוטין. מאפיינים של הלוח: מטיב עם שחקן BetterAgent וגרוע עבור שאר השחקנים ובמיוחד עבור ReflexAgent.

שאלה 9

נחלק לפי שאלות:

1. באילו מקרים ההיוריסטיקה המשופרת מתגברת על ההיוריסטיקה הפשוטה, אם בכלל? בכל השלבים פרט לשלבים MiniMax,testClassic ניתן לראות שיפור משמעותי במעבר מההיוריסטיקה המקורית להיוריסטיקה המשופרת בסוכנים ReflexAgent ו־ BetterAgent. ספציפית ב־ testClassic ההבדל הוא זניח מאד.

2. השחקנים הטובים ביותר בכל לוח מוצגים להלן:

השלב	הסוכן הטוב ביותר	התוצאה המקסימלית
capsuleClassis	MiniMax	1049.86
contestClassic	RandomExpectimax	2450.29
mediumClassic	RandomExpectimax	2052.71
minimaxClassic	MiniMax	511.71
openClassic	RandomExpectimax	1395.57
originalClassic	MiniMax	2903.14
smallClassic	RandomExpectimax	1659.43
testClassic	$\alpha\beta$	548.29
trappedClassic	BetterAgent	88.86
trickyClassic	RandomExpectimax	2484.86

טבלה 6: השחקנים הטובים ביותר בכל לוח

3. איך הלוחות משפיעים על השחקנים השונים? באופן גורף, ניתן לראות שבשלבים קטנים, העמקת־יתר אינה עוזרת ואף פוגעת בניקוד הסופי. ניתן לשער כי הסתכלות עתידית רחוקה מדי אינה תורמת להחלטה טובה של סוכן הפקמן מאחר והרוחות מתנהגות באופן רנדומלי, ומאחר והמרחקים מפקמן לאורך כל המשחק מאד קטנים, כל צעד הוא משמעותי, וטעויות רבות שנובעות מהחלטה רנדומלית של הרוחות עלולות לגרום לפקמן להפסיד. עבור המסך openClassic, מאחר ואין קירות וקפסולה בודדת, ההיוריסטיקה, שתוכננה למסכים עשירים (יותר קירות, יותר קפסולות, יותר מסדרונות וכו'), הופכת לפחות יעילה מאחר והיא "מתוחכמת מדי" ולמעשה הפרמטרים שבהם היא מתחשבת אינם קיימים. עבור השלב trappedClassic, ניתן לראות כי למעשה הניקוד כמעט ואינו תלוי בשחקן, אלא בבחירה הרנדומלית של הרוח השמאלית לשחקן. כלומר, אם היא בוחרת להתקדם לעבר השחקן, ההפסד מובטח, אחרת, במידה והשחקן לא משנה כיוון, הניצחון מובטח. כל היוריסטיקה שמתייחסת למיקום האוכל ובורחת מרוחות באופן בסיסי תצליח לנצח את השלב, כאשר הרוח השמאלית בוחרת ללכת שמאלה. עבור שאר השלבים, ניתן לראות כי האלגוריתמים מתנהגים כצפוי. כלומר, העמקה מגדילה את התוצאה, ואלגוריתמים משופרים יותר מניבים ניקוד גבוה יותר.

4. האם הגבלות העומק השפיעו על התוצאה? לפעמים כן ולפעמים ולא. יש לוחות שבהם עומק גדול יותר השפיע לטובה, יש כאלה בהם השפיע לרעה, ויש כאלו שההעמקה לא שינתה בהם את התוצאה באופן מהותי. לדוגמא, בשלב capsuleClassic, עבור כל אחד מהסוכנים, הגדלת העומק מ־ 3 ל־ 4 הניבה תוצאה נמוכה יותר. ניתן לראות מגמה זהה בשלבים minimaxClassic,openClassic,trappedClassic. בשאר השלבים האחרים ניתן לראות לסירוגין מגמה של עליה בתוצאה כתוצאה מעליה בעומק או חוסר־שינוי משמעותי.

5. מה היה קורה אם היו מגבלות זמן במקום מגבלות עומק? ניתן לדמיין מצב שבו ניקח היוריסטיקה קלה לחישוב (לדוגמא ההיורסטיקה הפשוטה שקיבלנו) ומאחר וההגבלה כעת היא על הזמן, ניתן להפעיל את אלגוריתם $\alpha\beta$ עם ההיוריסטיקה הפשוטה הנ"ל, ומאחר וזמן החישוב שלה קצר, היא תגיע לעומקים גדולים יותר במהלך פיתוח העץ, ויתכן והיא תניב תוצאות טובות באופן מפתיע, לעומת היוריסטיקות מסובכות יותר לחישוב, אשר בעקבות זמן־הריצה שלהן, יניבו פיתוחים לעומקים קטנים יותר בעץ. לכן, לאו־דווקא נראה תוצאות טובות יותר עבור היוריסטיקות טובות יותר, כאשר אנו עובדים עם אלגוריתם anytime לעומת אלגוריתם מוגבל־עומק.

חלק ט'

הסוכן שבחרנו לטובת התחרות ישתמש בהיוריסטיקה המשופרת שהצגנו בתחילת התרגיל, ויפעיל אותה בעזרת אלגוריתם MiniMax עם הגבלת עומק ל־ 3. ההסברים להיוריסטיקה שבחרנו מופיעים בדו"ח. הסיבה לבחירה הייתה מהתבוננות בתוצאות שקיבלנו בסעיפים הקודמים, ומשיקולים של איזון בין זמן ריצה סביר (מאחר והתחרות מוגבלת בזמן ריצתה) לבין ניקוד גבוה.