דו"ח סיכום לפרויקט גמר
בקורס ארכיטקטורות מחשבים מתקדמות

שמות המגישים:
ליאור דיין 205387939
ירדן קנר 312298490

1. מבוא

- **תיאור הבעיה ורקע כללי**

הפרויקט עוסק בחיזוי קפיצות (Branch Prediction), שיטה בעלת חשיבות מכרעת בשיפור ביצועי מעבדים. חיזוי קפיצות הוא חלק חשוב בארכיטקטורת מחשבים, ותפקידו לנבא את כיוון הקפיצה של פקודות קפיצה, עוד לפני שהתוצאה נקבעה בפועל. על ידי ניבוי מוקדם האם קפיצה תתבצע או לא, חזאי הקפיצות מסייעים בשיפור זרימת הפקודות בתוך ה-pipeline של המעבד, ובכך תורמים ליעילות ומהירות המערכת כולה. תהליך זה מתרחש בשלב מוקדם של פענוח וביצוע הפקודות.

- **מטרות**

מטרת הפרויקט היא לפתח סימולטור לחיזוי קפיצות (BTB) המאפשר לבחון ולהשוות ביצועים של 4 סוגי חזאים שונים:

1. חזאי מקומי עם מכונות מצבים פרטיות.
2. חזאי מקומי עם מכונת מצבים משותפת.
3. חזאי גלובלי.
4. חזאי Tournament (היברידי).

הסימולטור מיועד לנתח ולחקור את ההבדלים בין החזאים השונים עבור תוכניות שונות ובנוסף לבדוק את השפעת שינוי הפרמטרים עבור כל חזאי בנפרד, ובכך מאפשר לנו לבחון את יכולות הדיוק בחיזוי של כל חזאי.

- **הדרך והאמצעים להשגת המטרה**

הדרך להשגת המטרות של הפרויקט כללה העמקת הידע התיאורטי על חיזוי קפיצות.
לאחר מכן, פותח סימולטור בשפת C שמדמה את פעולתם של ארבעת החזאים השונים, ולאסוף נתונים ומדדים על דיוק החיזוי של כל חזאי. הסימולטור נבדק באמצעות קבצי trace שניתנו לנו מארבע תוכניות שונות, על מנת להעריך את הדיוק והאפקטיביות של כל חזאי. בקבצי הtrace סיננו את כל הפקודות שאינן קשורות לפקודות הקפיצה. לבסוף בוצע ניתוח על בסיס מדדי החזאים, אשר נתן לנו אינדיקציות לגבי יעלותם של החזאים עבור כל אחת מהתוכניות.

2. תיאור הפתרון

הפתרון שלנו כולל תכנית מרכזית אשר פועלת על בסיס הפרמטרים הניתנים לה בקובץ קונפיגורציה נפרד. בקובץ הקונפיגורציה ניתן לבחור באיזה חזאי נרצה להשתמש (לוקאלי עם מכונות פרטיות/משותפות, גלובלי או Tournament), גודל ההיסטוריה וגודל ה-BTB. התכנית מפעילה את החזאי המבוקש עם הפרמטרים שהוגדרו ומקבלת כקלט את ארבעת הtraces.
החזאי יקבע אם התבצעה קפיצה בפועל על ידי בדיקת הכתובת של הפקודה שבאה אחרי פקודת הקפיצה, בקובץ ה-trace. אם הכתובת של הפקודה הבאה היא הכתובת של פקודת הקפיצה הנוכחית בתוספת 4, המשמעות היא שלא התבצעה קפיצה (Not Taken). לעומת זאת, אם הכתובת של הפקודה הבאה אינה בתוספת 4 מהכתובת של פקודת הקפיצה, המשמעות היא שהייתה קפיצה (Taken). החזאי ישווה בין תוצאת הקפיצה בפועל לבין חיזוי הקפיצה. אם החיזוי אינו תואם את התוצאה בפועל, נעלה את ה- number of mispredictions ב1. אנו מחזיקים 2 מונים הסופרים את מספר פקודות הקפיצה בקובץ הtrace ואת מספר ההחטאות בחיזוי. בכל מעבר על פקודת קפיצה, נעלה באחד את מספר פקודות הקפיצה, ובמקרה של חיזוי שגוי נעלה באחד את מספר ההחטאות בחיזוי. לבסוף, מוצגים אחוזי הדיוק של החזאי עבור כל trace. אחוזי הדיוק חושבו באמצעות הנוסחה:

$$Misprediction\ Rate = \frac{number\ of\ mispredictions}{total\ number\ of\ branches}$$

מרכיבי התכנית:

1. סינון קבצי הtrace:
קובץ filter_file.c אחראי לסינון פקודות קפיצה מתוך קובץ ה-trace. המטרה היא לזהות ולהוציא מהקובץ רק את השורות המכילות פקודות קפיצה רלוונטיות (כגון "bne" ,"beq" ועוד) ואת הפקודה שמגיעה מיד אחרי פקודת הקפיצה. הפונקציה קוראת את הקובץ שורה אחר שורה, מזהה פקודות קפיצה בעזרת חיפוש במחרוזות, וכותבת את השורות הללו ביחד עם הפקודה שמגיעה אחרי לקובץ פלט חדש. כך ניתן להתרכז רק במידע החיוני לחיזוי הקפיצות ולביצוע ניתוחים מדויקים על ביצועי החזאים.

2. קובץ הרצה מרכזי:
main.c הוא הקובץ המרכזי שמנהל את כל תהליך הסימולציה. התכנית מתחילה בקריאת קובץ תצורה המכיל הגדרות לחזאי, כמו מספר הביטים של היסטוריית הקפיצות (BHR), מספר הכניסות בטבלת החיזוי (BTB), וסוג החזאי שיש להפעיל (לוקאלי, גלובלי או טורניר). לאחר קריאת ההגדרות, התכנית מפעילה את קובץ הסינון (filter_file.c) כדי לסנן את פקודות הקפיצה מתוך קבצי ה-trace השונים, ולאחר מכן מפעילה את הסימולציה בהתאם לסוג החזאי שנבחר בקובץ התצורה.

3. חזאי לוקלי:
טבלת החיזוי בנויה כ-2-way set associative, כלומר כל סט מורכב משתי כניסות.
כל כניסה בסט כוללת index שמשמש למציאת הסט המתאים בטבלה, tag שמשמש לזיהוי ייחודי של הכניסה בתוך הסט המתאים, ומאפשר לחזאי לוודא אם פקודת הקפיצה נמצאת כבר בטבלה, ו-Valid bit המציין אם הכניסה בטבלה תקפה.
לניהול הכניסות, משתמשים בביט LRU (Least Recently Used) לכל סט, שמורה איזו כניסה הייתה פחות בשימוש לאחרונה.
אם LRU = 1, המשמעות היא שהכניסה השנייה הייתה פחות בשימוש וניתן להחליף אותה במידת הצורך. אם LRU = 0, הכניסה הראשונה היא זו שניתן להחליף.

מכונות פרטיות:
הקובץ local_private_FSM.c מממש חזאי לוקאלי עם מכונות מצבים פרטיות לכל כניסה בטבלת החיזוי. לכל כניסה בטבלה יש היסטוריה משלה (BHR) ומערך מונים 2-bit saturating counters.
תהליך האתחול כולל הקצאת זיכרון לכל כניסה ואתחול כל המונים למצב התחלתי של weakly-not-taken (01). התכנית מאותחלת לערכי בסיס של enries=2048 ו- BHR size=3 bits.
התכנית מאפשרת לשנות את מספר הכניסות הטבלה ואת גודל ההיסטוריה.
בכל פעם שהתכנית קוראת שורה מקובץ ה-trace, היא מזהה אם השורה מכילה פקודת קפיצה או את הפקודה הבאה אחריה. אם השורה מכילה פקודת קפיצה, הכתובת שלה נשמרת, ולאחר מכן קוראים את הכתובת של הפקודה הבאה. התכנית משתמשת בהיסטוריה הפרטית של אותה פקודת קפיצה (BHR) כדי לבצע חיזוי על סמך מערך המונים הפרטי שלה. לאחר החיזוי, התכנית משווה את תוצאת הקפיצה בפועל אל מול החיזוי. התכנית מעדכנת את המונה על פי התוצאה בפועל (מעלה או מורידה בהתאם אם הקפיצה התבצעה או לא) ומעדכנת את היסטוריית הקפיצה.
אם החיזוי לא תאם לתוצאה בפועל, היא מעדכנת את ה-number of mispredictions .

מכונות משותפות:
הקובץ local_shared_FSM.c מממש חזאי לוקאלי עם מכונות מצבים משותפות (גלובליות) לכל היסטוריות הקפיצה בטבלת החיזוי. לכל כניסה בטבלה יש היסטוריה משלה (BHR), ולכל ההיסטוריות יש מערך מונים 2-bit saturating counters אחד המשותף, כך שהחיזויים מתבצעים על בסיס מערך מידע משותף.
תהליך האתחול כולל הקצאת זיכרון לכל כניסה ואתחול מערך המונים למצב התחלתי של weakly-not-taken (01). התכנית מאותחלת לערכי בסיס של enries=2048 ו- BHR size=3 bits.
התכנית משתמשת בהיסטוריה הפרטית של אותה פקודת קפיצה (BHR) כדי לבצע חיזוי על סמך מערך המונים הגלובלי.
לאחר החיזוי, התכנית משווה את תוצאת הקפיצה בפועל אל מול החיזוי.
התכנית מעדכנת את המונה הגלובלי על פי התוצאה בפועל (מעלה או מורידה בהתאם אם הקפיצה התבצעה או לא) ומעדכנת את היסטוריית הקפיצות של אותה פקודה. אם החיזוי לא תאם לתוצאה בפועל, היא מעדכנת את ה-number of mispredictions .

בשני המקרים התכנית מעדכנת את ה-LRU של הסט כדי לציין שהכניסה שבה נעשה שימוש היא הכניסה האחרונה שהייתה פעילה.

4. חזאי גלובלי:

global.c מממש את החזאי הגלובלי. החזאי משתמש בהיסטוריה גלובלית (Global BHR) שמשותפת לכל הפקודות ובמערך של מונים (2-bit saturating counters) אשר מעדכנים את מצב החיזוי על פי התוצאה בפועל. תהליך האתחול כולל הקצאת זיכרון למונים והגדרתם למצב התחלתי של "weakly not taken" (01).

התכנית מאותחלת לערך בסיס GHR size=6 bits. התכנית מאפשרת לשנות את גודל ההיסטוריה.

Global BHR הוא רישום היסטוריה גלובלי שמשמש את כל פקודות הקפיצה ומתעדכן לאחר כל קפיצה. ערך ה- Global BHRמשמש כאינדקס למערך המונים הגלובלי, שמכיל מונים מונים 2-bit saturating counters המשמשים לחיזוי תוצאות הקפיצות. המסיכה bhr_mask מבטיחה שהעדכונים ל-Global BHR יישארו בתוך גודל קבוע, ו-counter_size מגדיר את גודל המערך בהתאם למספר הביטים של היסטוריית הקפיצות.

התכנית קוראת כל שורה מקובץ ה-trace, מזהה את פקודת הקפיצה ואת הפקודה הבאה, ומשתמשת בהיסטוריה הגלובלית המשותפת (global BHR) לכל פקודות הקפיצה. המונה המתאים נבחר מתוך מערך המונים המשותף, והחיזוי מתבצע על פי המונה. לאחר החיזוי, התכנית משווה את תוצאת הקפיצה בפועל אל מול החיזוי ומעדכנת את המונה וההיסטוריה הגלובלים. אם החיזוי לא תאם לתוצאה בפועל, היא מעדכנת את ה-number of mispredictions .

5. חזאי Tournament:

החזאי tournament הוא חזאי היברידי המשלב בין שני חזאים שונים: חזאי גלובלי וחזאי לוקאלי, ומשתמש במנגנון בוחר (chooser) כדי להחליט באיזה חזאי להסתמך עבור כל פקודת קפיצה. המנגנון הבוחר משתמש במערך מונים (2-bit saturating counters) כדי להחליט אם לחזות על סמך החזאי הגלובלי או הלוקאלי. ההחלטה מתקבלת בהתאם לדיוק של כל חזאי על פני הקפיצות האחרונות. אם חזאי אחד מצליח לחזות בצורה טובה יותר את הקפיצה האחרונה, התכנית תקדם את הבוחר צעד אחד לטובתו.

גודל הבסיס של מערך ה-chooser הוא 1024 מונים, כאשר כל מונה הוא בגודל של 2 ביטים, וכל כתובת קפיצה ממופה למיקום המתאים במערך. בתחילת התהליך, כל המונים מאותחלים לערך של "weakly favor global" (01), כלומר הם נוטים להעדיף את החזאי הגלובלי באופן ראשוני. ערך המונה נע בין 0 ל-3, כאשר ערכים נמוכים (0-1) מצביעים על העדפה לחזאי הגלובלי, וערכים גבוהים (2-3) על העדפה לחזאי הלוקאלי. המונה מתעדכן אחרי כל חיזוי לפי החזאי שהיה מדויק יותר, מה שמאפשר למערכת להתאים את הבחירה בין החזאים לפי דפוסי הקפיצות שנצפו.

3. אמצעי המחקר

- **תיאור התשתית הניסויית:**

  מימוש החזאים בשפת C, בסביבת פיתוח Visual Studio, תוך התאמה אישית לצרכי הפרויקט.

  במסגרת הניסויים נעשה שימוש בקבצי trace שנוצרו מתוכניות מוכרות כגון Coremark, Dhrystone, Linpack, ו-Fibonacci, על מנת לספק תרחישים אמיתיים לחיזוי הקפיצות.

  התכנית מחזיקה מונה שעוקב אחר מספר השגיאות בחיזוי, ובכך מספקת את רמת הדיוק של החזאי. בנוסף, נעשה שימוש בכלי ניתוח סטטיסטי לעיבוד וניתוח תוצאות הסימולציה והערכת הדיוק של החזאים השונים.

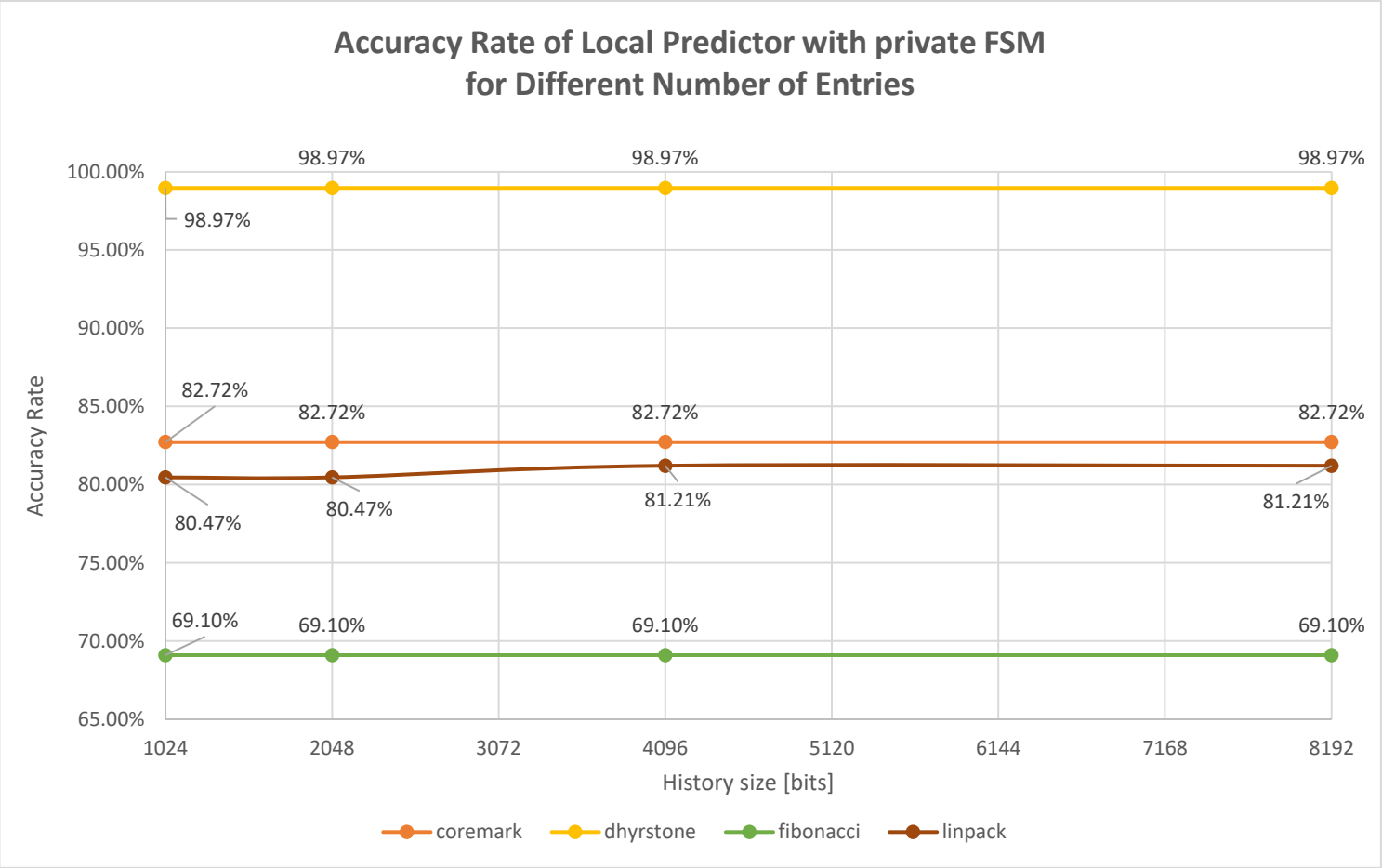
- **השיטה בה ניתחנו את התוצאות:**

  דיוק החיזוי יחושב על ידי חלוקת מספר החיזויים הנכונים בסך כל פקודות הקפיצות.

  תתבצע השוואה בין ביצועי החזאים השונים תחת אותם תנאים, כגון גודל הטבלה וגודל ההיסטוריה. כמו כן, נבצע ניתוח כדי לבדוק כיצד שינויים בפרמטרים משפיעים על דיוק החיזוי. התוצאות יוצגו באמצעות גרפים שימחישו את המגמות ואת הביצועים של כל חזאי בתנאים שונים.

4. תיאור וניתוח התוצאות הניסוייות

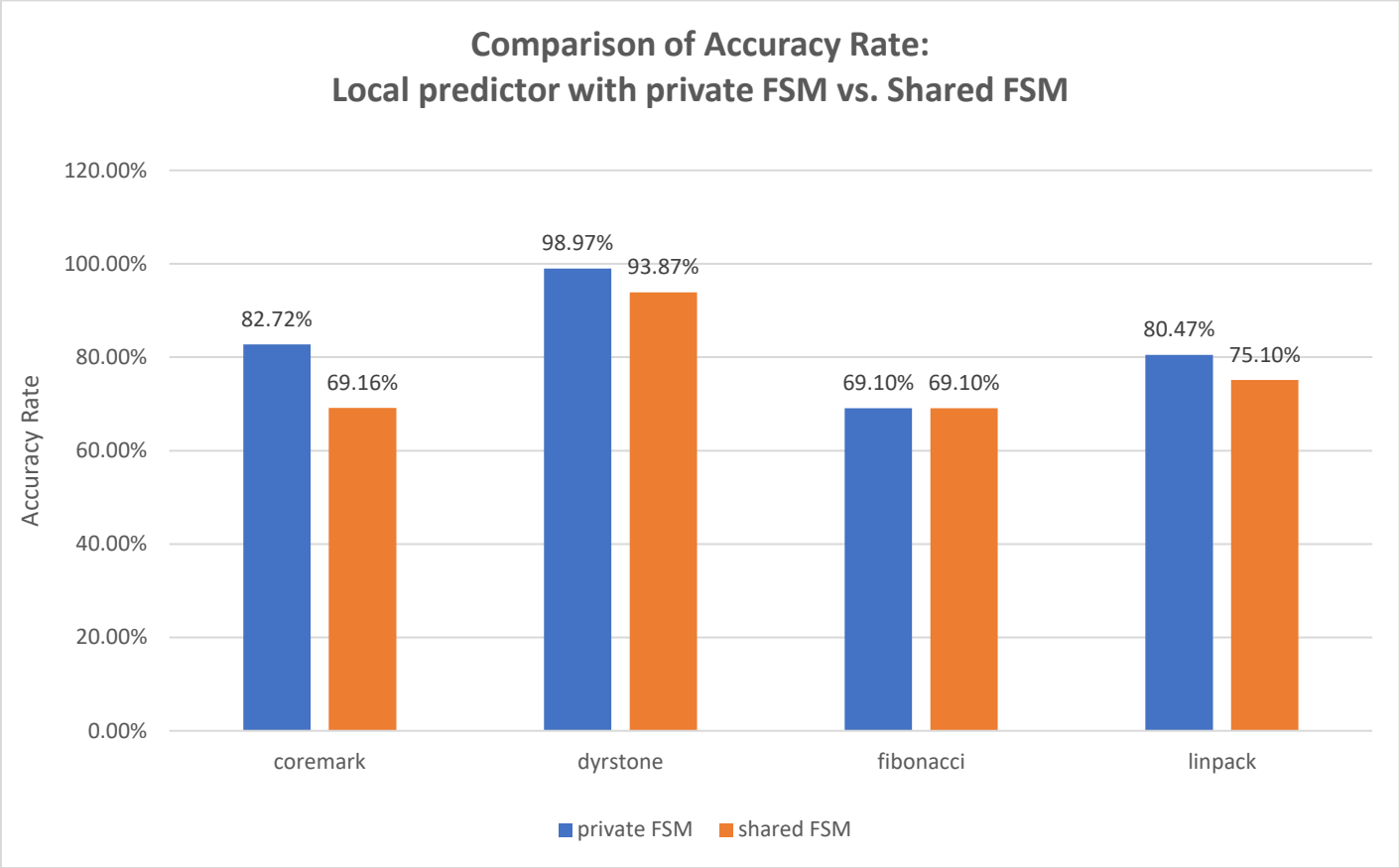
1. דיוק החזאי הלוקאלי עם נתוני הבסיס עבור מספר כניסות שונות בטבלה:



נתוני הניסוי:
השתמשנו בערך בסיס עבור גודל ההיסטוריה: 3 ביטים.

ניתוח התוצאות:
מהגרף ניתן לראות שהדיוק של החזאי הלוקאלי נשאר יציב ואינו משתנה ככל שמספר הכניסות בטבלה גדל. הסיבה לכך היא שכבר במספר מינימלי של כניסות, כמו 1024, טבלת החיזוי מסוגלת להכיל את כל כתובות הקפיצה של התוכניות ללא צורך בהחלפות תכופות בטבלה. במילים אחרות, אין צורך להגדיל את מספר הכניסות כדי לשפר את הדיוק, מכיוון שאין עומס על הטבלה.
לדוגמה, בתוכנית Fibonacci, שבה יש רק כתובת קפיצה מותנית אחת, מספר הכניסות הקטן ביותר מספיק לחלוטין כדי למנוע התנגשויות, ולכן הדיוק נשמר זהה ללא תלות בגודל הטבלה. גם בתוכניות אחרות כמו Coremark ו-Dhrystone , כאשר יש מספיק כניסות כדי לאחסן את כל כתובות הקפיצה, אין שיפור נוסף ביעילות החיזוי כתוצאה מהגדלת מספר הכניסות.
עם זאת, בתוכנית Linpack, ניתן לראות שיפור קל ביעילות החיזוי ככל שמספר הכניסות גדל, מה שמעיד על כך שבמקרה זה הגדלת מספר הכניסות מאפשרת לחזאי לאחסן יותר כתובות קפיצה ולמנוע התנגשויות והחלפות. באופן כללי, התוצאות מעידות על כך שהטבלה אינה מגיעה לנקודת עומס שבה היו נדרשות יותר כניסות כדי לשפר את הביצועים, ולכן הגדלת מספר הכניסות אינה מביאה לשיפור בדיוק החיזוי.

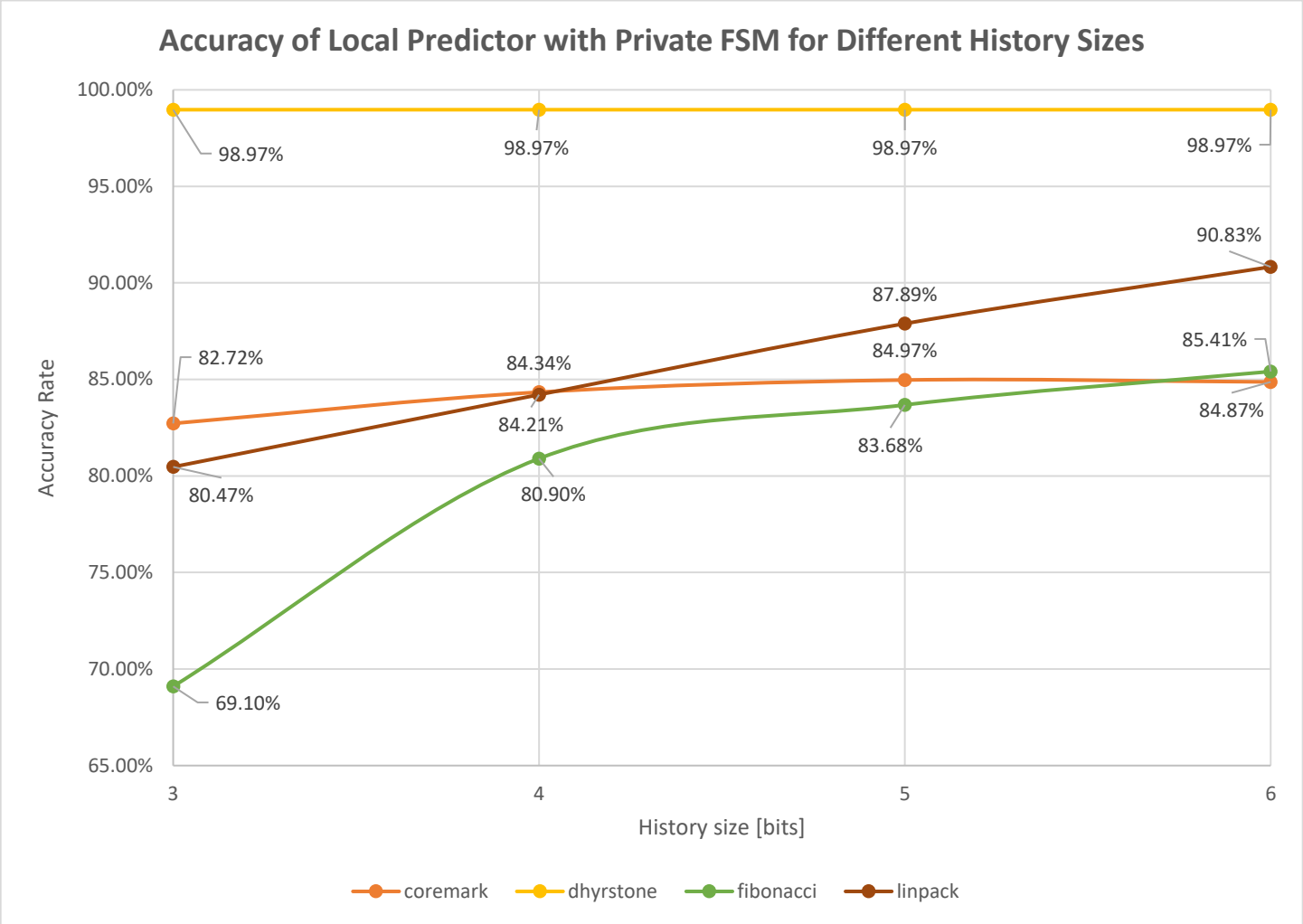
2. השוואה של דיוק החזאי הלוקאלי עם מכונות מצבים פרטיות מול מכונות מצבים משותפות:



נתוני הניסוי:
השתמשנו בערכי בסיס עבור שני החזאים: מספר כניסות בטבלה: 2048, גודל ההיסטוריה: 3 ביטים.

ניתוח התוצאות:
מכונת מצבים פרטית מאפשרת לשמור זיכרון ספציפי עבור כל פקודת קפיצה בנפרד, בעוד שמכונת מצבים משותפת משתמשת באותו מערך מונים עבור כלל פקודות הקפיצה. מהגרף ניתן לראות כי ברוב התוכניות יש שיפור באחוזי הדיוק עם שימוש במכונות מצבים פרטיות לעומת מכונות מצבים משותפות.
החזאי עם מכונות מצבים פרטיות מציג ביצועים טובים יותר כיוון שהוא מאפשר התאמה מדויקת יותר לכל פקודת קפיצה, מה שמקטין את הסיכון להתנגשויות בין פקודות שונות המשתמשות באותו מנגנון חיזוי. לעומת זאת, במכונות מצבים משותפות, קיימת סבירות להתנגשות בין פקודות קפיצה שונות שמשתמשות באותה מכונת מצבים, מה שמוביל לירידה בדיוק החיזוי. יוצאת הדופן היא תוכנית Fibonacci, בה יש רק כתובת קפיצה אחת, ולכן אין הבדל בתוצאות בין שימוש במכונת מצבים פרטית או משותפת, כי אין תחרות על משאבים ואין צורך בהתאמות מיוחדות בין קפיצות שונות.
במסקנה, היתרון של מכונת מצבים פרטית מתבטא בתוכניות עם מספר רב של קפיצות ודפוסי קפיצה מגוונים, בעוד שבתוכניות פשוטות עם מספר מוגבל של קפיצות אין הבדל משמעותי בביצועים בין שתי הגישות.

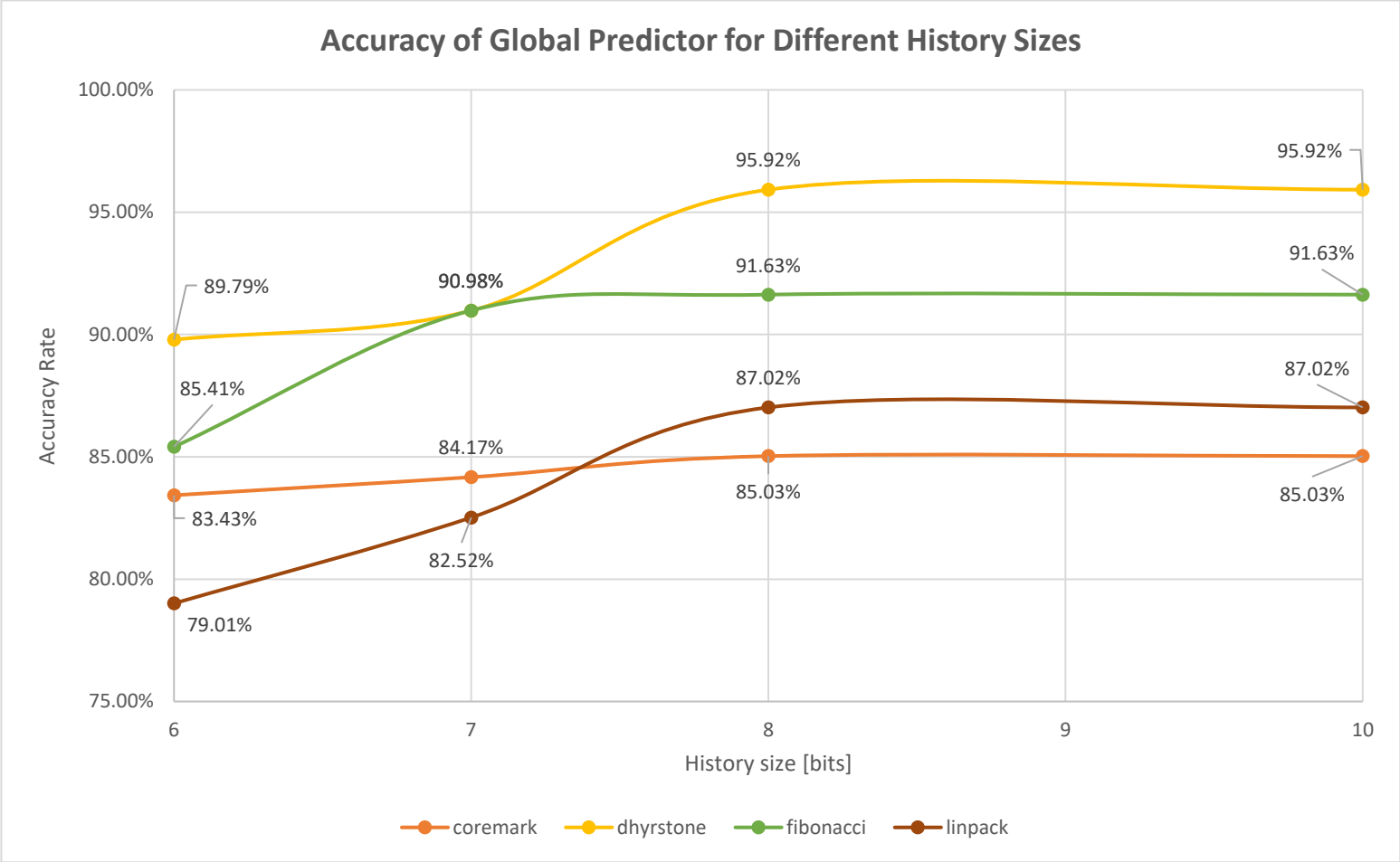
3. דיוק החזאי הלוקאלי עם נתוני בסיס עבור גדלי היסטוריה שונים:



נתוני הניסוי:
השתמשנו בערך הבסיס עבור מספר הכניסות בטבלה: 2048.

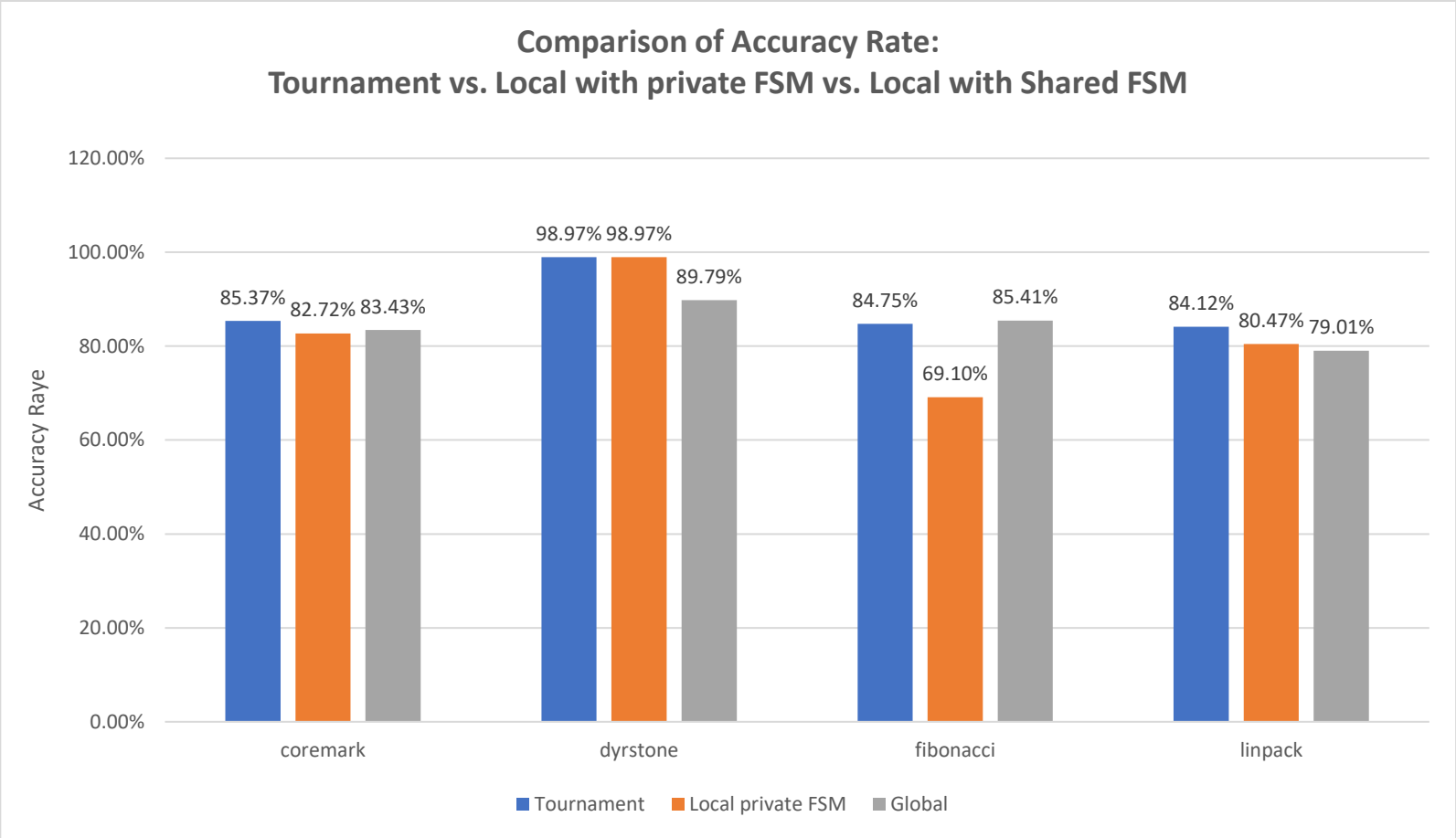
תוצאות הניסוי:
בחזאי לוקאלי, הגדלת גודל ההיסטוריה מאפשרת לחזאי לזכור דפוסי פעולה ארוכים יותר של פקודות הקפיצה.
התוצאות מראות כי ככל שגודל ההיסטוריה גדל, ישנו שיפור בדיוק החיזוי בתוכניות מסוימות, אך לא בכולן. לדוגמה, בתוכניות כמו Fibonacci ו-Linpack, הדיוק של החזאי הלוקאלי משתפר בצורה ניכרת ככל שגודל ההיסטוריה גדל. זאת מכיוון שתוכניות אלו מכילות קפיצות שחוזרות על עצמן או קפיצות שבהן המידע מהעבר משפיע על תוצאות עתידיות. כאשר יש לחזאי הלוקאלי יותר היסטוריה להסתמך עליה, הוא מצליח לנבא בצורה טובה יותר את ההתנהגות של הקפיצות הללו.
לעומת זאת, בתוכנית כמו Dhrystone, הגדלת גודל ההיסטוריה לא משפיעה על הדיוק, מכיוון שהתוכנית אינה תלויה בהיסטוריה ארוכה של קפיצות. כלומר, הקפיצות בתוכנית זו אינן דורשות היסטוריה רחבה.
ההשפעה הכללית של הגדלת גודל ההיסטוריה על החזאי הלוקאלי היא בכך שבמקרים שבהם יש חשיבות לקפיצות קודמות, היסטוריה ארוכה יותר משפרת את הדיוק. עם זאת, בתוכניות שבהן הקפיצות אינן תלויות בהיסטוריה ארוכה, ההגדלה אינה תורמת לשיפור בביצועים.

4. דיוק החזאי הגלובלי עם נתוני בסיס עבור גדלי היסטוריה שונים:



תוצאות הניסוי:
ככל שגודל ההיסטוריה גדל, החזאי הגלובלי מצליח לשפר את דיוקו במרבית התוכניות. החזאי הגלובלי מאחסן את ההיסטוריה המשותפת של כל פקודות הקפיצה, כך שהוא יכול לנצל דפוסים רחבים יותר ולהתאים את התחזיות שלו גם כאשר יש תלות בין פקודות קפיצה שונות. בתוכניות כמו dhrystone ו-fibonacci, ניתן לראות שיפור ניכר בדיוק כאשר גודל ההיסטוריה גדל, במיוחד לאחר שהיסטוריה ארוכה יותר מאפשרת לחזאי לנצל טוב יותר את התבניות שמצטברות לאורך זמן. בתוכנית linpack, השיפור גם הוא ברור, והחזאי מצליח להגיע לדיוק גבוה יותר ככל שהוא לומד יותר מהיסטוריית הפקודות. לעומת זאת, בתוכנית coremark, ההשפעה של גודל ההיסטוריה פחות משמעותית והדיוק מתייצב אחרי גודל מסוים. הדבר מצביע על כך שבחלק מהתוכניות יש יתרון ברור להיסטוריה רחבה יותר, בעוד באחרות ההשפעה מוגבלת יותר.

5. השוואה בין חזאי Tournament לחזאים הגלובלי והלוקאלי עם נתוני בסיס:



נתוני הניסוי:
השתמשנו בנתוני הבסיס עבור החזאים השונים:
חזאי לוקאלי: מכונות מצבים: פרטיות, מספר כניסות בטבלה: 2048, גודל ההיסטוריה: 3 ביטים.
חזאי גלובלי: גודל היסטוריה: 3 ביטים.
חזאי Tournament: גודל היסטוריה של חזאי לוקאלי: 3 ביטים, גודל היסטוריה של חזאי גלובלי: 6 ביטים,
גודל מערך ה-chooser: 1024.

תוצאות הניסוי:
החזאי Tournament מציג את רמת הדיוק הגבוהה ביותר מבין שלושת החזאים. תוצאות אלו מדגישות את היתרון של החזאי ההיברידי, המסוגל לשלב בין הגישות של החזאים הגלובלי והלוקאלי ולנצל את היתרונות של כל אחד מהם. היכולת של החזאי ההיברידי לבחור באופן דינמי בין שני החזאים לכל פקודת קפיצה מאפשרת לו להתאים את החיזוי לדפוסי הקפיצות השונים בתוכנית, מה שמוביל לשיפור משמעותי בדיוק הכולל.
הגרף מדגים זאת היטב: בתוכניות כמו Coremark ו Linpack, -החזאי ההיברידי מצליח להתאים את עצמו לדפוסי הקפיצות המגוונים ומציג דיוק גבוה יותר מאשר החזאים האחרים, אשר מסתמכים על שיטה יחידה. החזאי הגלובלי מציג תוצאות טובות יחסית בתוכניות עם דפוסי קפיצה מורכבים ומשתנים כמו Dhrystone , אך מתקשה להתמודד עם תוכניות שבהן דפוסי הקפיצה פשוטים או עקביים, כמוFibonacci .
המסקנה הברורה היא שהחזאי ההיברידי, בזכות מנגנון הבחירה הדינמי שלו, מצליח לבצע התאמה בזמן אמת לדפוסי הקפיצה בתוכנית, ולכן מתעלה בביצועים על שני החזאים האחרים.

לסיכום תוצאות המחקר:

טבלאות המציגות את תוצאות הדיוק בכל החזאים והפרמטרים השונים, מסודרים לפי קבצי ה- trace השונים.
עבור כל ניסוי מוצג האחוז שגיאות בחיזוי Misprediction Rate והאחוז דיוק החזאי Accuracy Rate.
על סמך נתונים אלו בנינו את הגרפים השונים שהוצגו בסעיפים הקודמים.

		Entry	History	Misprediction rate	Accuracy Rate
dhrystone	Private FSM	1024	3	1.03%	98.97%
		2048	3	1.03%	98.97%
		4096	3	1.03%	98.97%
		8192	3	1.03%	98.97%
		2048	3	1.03%	98.97%
		2048	4	1.03%	98.97%
		2048	5	1.03%	98.97%
		2048	6	1.03%	98.97%
	Shared FSM	2048	3	6.13%	93.87%
	Global	-	6	10.21%	89.79%
		-	7	9.02%	90.98%
		-	8	4.08%	95.92%
		-	10	4.08%	95.92%
	Tournament	BHR=3 , GHR=6		1.03%	98.97%

		Entry	History	Misprediction rate	Accuracy Rate
coremark	Private FSM	1024	3	17.28%	82.72%
		2048	3	17.28%	82.72%
		4096	3	17.28%	82.72%
		8192	3	17.28%	82.72%
		2048	3	17.28%	82.72%
		2048	4	15.66%	84.34%
		2048	5	15.03%	84.97%
		2048	6	15.13%	84.87%
	Shared FSM	2048	3	30.84%	69.16%
	Global	-	6	16.57%	83.43%
		-	7	15.83%	84.17%
		-	8	14.97%	85.03%
		-	10	14.97%	85.03%
	Tournament	BHR=3 , GHR=6		14.63%	85.37%

		Entry	History	Misprediction rate	Accuracy Rate
linpack	Private FSM	1024	3	19.53%	80.47%
		2048	3	19.53%	80.47%
		4096	3	18.79%	81.21%
		8192	3	18.79%	81.21%
		2048	3	19.53%	80.47%
		2048	4	15.79%	84.21%
		2048	5	12.11%	87.89%
		2048	6	9.17%	90.83%
	Shared FSM	2048	3	24.90%	75.10%
	Global	-	6	20.99%	79.01%
		-	7	17.48%	82.52%
		-	8	12.98%	87.02%
		-	10	12.98%	87.02%
	Tournament	BHR=3 , GHR=6		15.88%	84.12%

		Entry	History	Misprediction rate	Accuracy Rate
fibonacci	Private FSM	1024	3	30.90%	69.10%
		2048	3	30.90%	69.10%
		4096	3	30.90%	69.10%
		8192	3	30.90%	69.10%
		2048	3	30.90%	69.10%
		2048	4	19.10%	80.90%
		2048	5	16.32%	83.68%
		2048	6	14.59%	85.41%
	Shared FSM	2048	3	30.90%	69.10%
	Global	-	6	14.59%	85.41%
		-	7	9.02%	90.98%
		-	8	8.37%	91.63%
		-	10	8.37%	91.63%
	Tournament	BHR=3 , GHR=6		15.25%	84.75%

מהטבלאות ניתן לראות כי אחוזי הדיוק הגבוהים ביותר נצפו בחזאי ההיברידי (Tournament), שמציג ביצועים טובים מאוד.
אחוזי דיוק גבוהים נצפו גם בחזאי הגלובלי, במיוחד כאשר גודל ההיסטוריה גדל. בחזאי הלוקאלי עם מכונות מצבים פרטיות (Private FSM), הדיוק היה גבוה משמעותית בהשוואה לחזאי עם מכונות מצבים משותפות (Shared FSM), שהציגו דיוק נמוך יותר באופן יחסי.

5. סיכום

- **סיכום הפרויקט:**

הפרויקט שלנו התמקד בפיתוח סימולטור לחיזוי קפיצות. לפני בניית הסימולטור, התעמקנו בהבנה של סוגי החזאים השונים ודרכי פעולתם באמצעות מצגות הקורס ומחקר נוסף.
הפרויקט עסק בבחינת ביצועים ויכולת דיוק של שלושה סוגי חזאים: לוקאלי, גלובלי, ו-Tournament.
הרצנו סימולציות על החזאים, ניתחנו כיצד פרמטרים שונים כגון מספר הכניסות בטבלה, גודל ההיסטוריה ומכונות מצבים פרטיות או משותפות משפיעים על דיוק החיזוי של כל חזאי.
הראינו כי קיימת חשיבות בהתאמת הפרמטרים השונים לסוגי חזאים שונים. בנוסף על כך, בחזאי לוקאלי ראינו כי מכונות מצבים פרטיות לרוב מניבות תוצאות דיוק טובות יותר מאשר מכונות מצבים משותפות.
לבסוף, ראינו כי חזאי היברידי המשלב בין חזאי לוקאלי לגלובלי מספק את רמות הדיוק הגבוהות ביותר מבין כל החזאים.

- **סיכום של התרומה של עבודה זו:**

הפרויקט תרם באופן משמעותי להבנה שלנו בתחום חזאיי הקפיצות. עם זאת, החוויה הלימודית המשמעותית ביותר נבעה מהפיתוח עצמו של החזאים השונים.
ניתן לראות שחזאי קפיצות תורמים רבות לשיפור זמני ריצה וביצועי המערכת. באופן כללי, מאוד נהננו מתהליך הלמידה והפיתוח.

- **חשיבה ביקורתית:**
  - **מה היה טוב במימוש:**

הבנה מעמיקה של החומר לפני תחילת הפיתוח עצמו הייתה הכרחית ומנעה טעויות ובלבול.
תהליך המימוש שלנו היה הדרגתי. התחלנו ממימוש החזאי הלוקאלי עם מכונות מצבים פרטיות, אשר בהשוואה לשאר החזאים, הוא הרחב ומפורט ביותר.לאחר מימושו והגעה לתוצאות דיוק טובות, המשכנו למימוש חזאי לוקאלי עם מכונות מצבים משותפות, דבר שהצריך שינוי לא מאוד משמעותי של צמצום מערי המונים למונה מערך אחד. מכאן, הדרך אל מימוש החזאי הגלובלי כבר היה יותר חלק. מימוש החזאי ההיברידי דרש לאחד בין 2 חזאים שכבר מימשנו.
חשיבה מקדימה ובניית תכנית פעולה לקראת המימוש סייעה לנו מאוד ותרמה להבנה מעמיקה אף יותר.

  - **מה ניתן לשפר:**

אופן המימוש: בהתחלה עבדנו עם קבצי קוד נפרדים שכל אחד מהם הופעל בנפרד. רק לקראת סוף הפרויקט איחדנו את הכל לתכנית מרכזית אחת דבר שדרש מאיתנו זמן רב שהיה יכול להיחסך.