

**הפקולטה למדעי ההנדסה**

**המחלקה להנדסת תעשיה וניהול**

**סמסטר ב', תשפ"ד**

**FMC\_RTAהקצאת משימות לסוכנים מבוסס על**

**FMC מבוזר וחזרתי.**

2022-01-061

מאת : רון שחר

מנחה אקדמי: פרופ' רועי זיוון

אב ה'תשפ"ד אוגוסט 2024

תוכן עניינים

[1.מבוא 3](#_Toc174467777)

[2.סקר ספרו 4](#_Toc174467778)

[2.1. בעיית אר"ן (אירוע רב נפגעים) 4](#_Toc174467779)

[2.2. SOMAOP 4](#_Toc174467780)

[2.3. בעיית General Task Allocation Problem (GTAP) 6](#_Toc174467781)

[2.4. Dynamic GTAP 7](#_Toc174467782)

[2.5. FMC (‏fisher market clearing) 8](#_Toc174467783)

[2.6. (FMC ATA) 9](#_Toc174467784)

[3.שיטה 12](#_Toc174467785)

[3.1. תיאור המצב הקיים 12](#_Toc174467786)

[3.2. הגדרת המודל התיאורטי 13](#_Toc174467787)

[3.3. השערות המחקר 14](#_Toc174467788)

[3.4. תכנון הניסוי 15](#_Toc174467789)

[3.5. היוריסטיקה משופרת 15](#_Toc174467790)

[3.6. הקדמה לבעיה חלוקת סוכנים למשימות (FMC\_TA) 16](#_Toc174467791)

[3.7. הסימולטור 16](#_Toc174467792)

[3.8. (FMC RTA) 17](#_Toc174467793)

[3.8.1. FMC RTA Task Agents **17**](#_Toc174467794)

[3.8.2. FMC RTA Active Agents **19**](#_Toc174467795)

[3.8.3. FMC RTA Main Loop **21**](#_Toc174467796)

[3.9. קשיים 21](#_Toc174467797)

[3.9.1. הפיכת האלגוריתם לחזרתי : **21**](#_Toc174467798)

[3.9.2. אינטגרציה עם מערכת קיימת (הסימולטור) **22**](#_Toc174467799)

[3.9.3. מציאת והתאמת אלגוריתם FMC\_TA לסימולציה מבוזרת חזרתית **22**](#_Toc174467800)

[*4.*יישום הפרויקט ותוצאותיו*.* 23](#_Toc174467801)

[4.1. השוואה בין הגרסאות השונות של FMC\_TA שיתוף פעולה נמוך 23](#_Toc174467802)

[4.2. השוואה בין אלגוריטמים מבוססים FMC,RPA,DSRM שיתוף נמוך. 25](#_Toc174467803)

[4.3. השוואה בין הגרסאות השונות של FMC\_TA שיתוף פעולה גבוה 26](#_Toc174467804)

[4.4. השוואה בין אלגוריטמים מבוססים FMC,RPA,DSRM שיתוף פעולה גבוה 27](#_Toc174467805)

[5.סיכום 28](#_Toc174467806)

[5.1. סיכום הישגי הפרויקט ותוצריו 28](#_Toc174467807)

[5.2. תובנות מרכזיות והפקת לקחים 28](#_Toc174467808)

[5.3. המלצות להמשך מחקר או פיתוח 29](#_Toc174467809)

[5.4. בנימה אישית 29](#_Toc174467810)

[ביבליוגרפיה 30](#_Toc174467811)

# מבוא

כיום, בעולם המודרני אנו משתמשים באופן ישיר או עקיף בתוכנות ואפליקציות המבוססות על פתרון בעיות הכוללות יישומים בסביבות בהן ישויות אוטונומיות משתפות פעולה למיקסום מטרה כללית (COP). בבעיה יותר ממוקדת המבוססת על הקצעת סוכנים מספקי שירות למטלות דורשות שירות, אותם סוכנים פעילים מחליטים לאילו סוכנים שדורשים שירות לספק אותו ובאיזה סדר. התועלת נגזרת מאיכות השירות, הזמן שלקח לספק אותו ושיתוף הפעולה בין הסוכנים. הפתרון לבעיה הוא לוח זמנים לכל סוכן, עם מטרה למקסם את התועלת הגלובלית של הצוות. בעיה זו נקראת בעיית SOMUP. ניתן למצוא מימוש של בעיה זו בתחומים רבים כגון: רפואה, רפואת חירום, צבא, הצלה, תעשייה ועוד.

בעקבות התפתחות טכנולוגיות ה- (Internet Of Things) IOT, תחום שעוסק ברשת של אובייקטים פיזיים המחוברים לאינטרנט, המאפשרת להם לתקשר ולשתף מידע ביניהם ועם מערכות מרוחקות באמצעות טכנולוגיות תקשורת. בעזרת חיישנים, מערכות חשמליות, מחשבים ותוכנה מתקדמת, מכשירים אלה יכולים לאסוף נתונים, לנהל פעולות, ולבצע פעולות אוטומטיות המבוססות על המידע שנאסף. התפתחות תחום זה יוצרת סביבה תומכת בשימוש במערכות מבוזרות (Distributed Systems) שהן אוסף של מחשבים או צמתים עצמאיים הפועלים יחד כמערכת קוהרנטית אחת. צמתים אלו מתקשרים ומתאמים את פעולותיהם על ידי העברת מסרים להשגת מטרה משותפת.

בפרויקט זה נחקור את הפוטנציאל לשיפור של אחד מהאלגוריתמים ההיריסטיים לפתרון בעיה SOMUP. כאשר נפתח אלגוריתם באמצעות יישום השוואה של ווריאציה חזרתית של אלגוריתם חלוקת סוכנים למשימות מבוסס על פתרון מבוזר של FMC (Fisher Market Clearing) באמצעות שימוש באלגוריתם המבוזר של זנג. במחקר נשתמש בסימולטור האבסטרקטי לפתרון בעיות אירוע רב נפגעים (אר"ן) וכך נשווה את האלגוריתמים הנחקרים עם אלגוריתמים עדכניים אחרים במצבים משתנים ולפי מדדי הצלחה שונים.

כדי לפתור את הבעיה הדינמית באמצעות פתרון לבעייתSOMUP, יש לחלק את הבעיה לכמה תתי בעיות סטטיות, כלומר כל פעם שיש שינוי במצב. במקרה של הסימולציה מדובר בזיהוי של סוכן בודד המסיים לבצע תת משימה. אחת המגבלות של הפתרון הקיים (הלא חזרתי) היא שהוא מגביל את קצב "ריענון הפתרון" לקצב הופעת הבעיות. בווריאציה הנחקרת נשתמש באינטרוול המינימלי המשפיע על שינוי התועלת של הבעיה, שהוא עזיבת/סיום משימה של סוכן בודד, כדי להתגבר על החיסרון הקיים

# סקר ספרות

## בעיית אר"ן (אירוע רב נפגעים)

בעיית אר"ן היא בעיה של חלוקת צוותי טיפול (Service Providers - SP) לנפגעים. צוותי החילוץ (Service Requesters - SR) צריכים לשאוף לאופטימיזציה של מטרה גלובלית. בבעיה זו ישנן מספר יחידות חילוץ הפועלות במקביל. הן צריכות לפעול במטרה משותפת, לסייע זו לזו ולהגיע לתוצאה המיטבית המתאפשרת. נושא זה בעל משמעות רבה, מכיוון שכל יחידת חילוץ עשויה להיות מושקעת בצורה שונה וכל אחת יכולה להיות מושפעת מקשיים ייחודיים. בנוסף, יש להתחשב בהתנהגות המערכת המבוזרת ובקואורדינציה במצבי חירום. לעיתים קרובות אין גורם מרכזי אחד שמתעסק עם תיאום של חלוקת צוותי טיפול. במקום זאת, ישנם מספר גורמים ויחידות הפועלים באופן עצמאי או בהתבסס על תיאום אזורי . זה יכול ליצור אתגרים בניהול התקשורת, בהתאמת משאבים ובהבנת המצב הכללי, מה שדורש מגוון פתרונות טכנולוגיים ואלגוריתמיים להתמודדות עם האתגרים הללו[[4](#_ביבליוגרפיה)].

כל אחד ממבקשי השירות (האירוע) מאופיין באמצעות : תנאים סביבתיים, מיקום, חומרת האירוע והשירות הנדרש. כל נותן שירות מתאפיין במשאבים ובשירותים שהוא מסוגל לספק (כגון אנשי צוות, רכבים, ציוד ומכשור), מה שעשוי להשפיע על יכולת התגובה והצורך בעזרה חיצונית. בפתרון הבעיה יש להתייחס למספר מאפיינים שצצים מתוך הבעיה:**דחיפות ועדיפות**: בעיית הדחיפות והעדיפויות מתייחסת לכך שבמצבי חירום, לעיתים ישנם מקרים שבהם יש צורך לטפל במספר בקשות לעזרה במקביל, וכל אחת מהן עשויה להיות עם דחיפות שונה. האתגר הוא להפיק את המקסימום מהמשאבים הזמינים ולהגיב בצורה המיטבית ביותר לכל בקשה, תוך שימור הסדר והייעול בתהליך התגובה.**תקשורת**: תקשורת מהירה ויעילה היא מרכיב מרכזי בתהליך התגובה למצבי חירום. מערכות תקשורת יעילות מסייעות בהעברת מידע חיוני בזמן אמת, כך שמגיבים יכולים להתמודד עם מצבי חירום באופן מהיר ומתוכנן.**קואורדינציה מבוזרת**: בסביבת חירום ישנם מספר גורמים המעורבים בתהליך התגובה. כל גורם יכול להיות מרכזי במקרה מסוים, ולכן חשוב להבטיח תיאום וקואורדינציה יעילים ביניהם כדי לאפשר פעולה ממוקדת ויעילה.**מערכת דינמית**: מצבי החירום עשויים להשתנות במהירות ולכן חשוב שהמערכות יהיו גמישות ויתאימו את עצמן למצב הנוכחי באופן מהיר. יש לתת עדיפות להתאמה לפי דרישות המצב ולהשתנות בהתאם. [[3](#_ביבליוגרפיה)]

## SOMAOP Service Oriented Multi-Agent Systems

מערכות מרובות סוכנים מבוססות שירות מציעות גישה חדשנית לפתרון בעיות אופטימיזציה במערכות מבוזרות. גישה זו משלבת את העקרונות של מערכות מבוססות סוכנים (MAS) עם ארכיטקטורות מבוססות שירות (SOA), במטרה לנצל את היתרונות של שתי הגישות ולהתגבר על מגבלותיהן.

עקרונות ומבנה המערכת של הגישה SOMAOP מבוססת על ארבעה שלבים מרכזיים:

**פירוק הבעיה למרכיבים פשוטים:** בעיות אופטימיזציה מורכבות מפורקות למרכיבים עצמאיים, שניתן לטפל בהם באופן מקומי על ידי סוכנים אוטונומיים. כל סוכן אחראי לפתור תת-בעיה מסוימת ולתקשר עם סוכנים אחרים כדי להשיג פתרון כולל.קישור המרכיבים המבוזרים: המרכיבים המבוזרים מחוברים זה לזה דרך רשת של שירותים. ארכיטקטורת השירותים מאפשרת לכל סוכן להציע ולצרוך שירותים בצורה שקופה, מה שמאפשר גמישות ושיתוף פעולה אפקטיבי.

הנגשת מנגנונים להתאמה דינמית: המערכת כוללת מנגנונים להתאמה דינמית של השירותים והסוכנים לשינויים בסביבה ובדרישות. זה מאפשר למערכת להגיב במהירות לשינויים ולשמור על ביצועים אופטימליים. שילוב טכנולוגיות תומכות: שימוש בטכנולוגיות מתקדמות כמו למידת מכונה, בינה מלאכותית ורשתות חכמות כדי לתמוך בתפקוד המערכת ולהבטיח התאמה דינמית ומורכבות נמוכה. [[6](#_ביבליוגרפיה)]

יתרונות השילוב בין MAS ל-SOA השילוב בין MAS ל-SOA מביא עמו יתרונות רבים: **התאמה דינמית**: יכולת המערכת להגיב לשינויים ולהסתגל במהירות לתנאים חדשים. **אינטראופרביליות:** סוכנים יכולים לתקשר ולשתף פעולה בצורה שקופה, מה שמאפשר גמישות גבוהה יותר. **רובסטיות:** המערכת עמידה בפני תקלות ונפילות, הודות להתנהגות האוטונומית של הסוכנים. דוגמאות לשימושים מעשיים מערכות SOMAOP מוצאות שימוש בתחומים רבים ומגוונים: רשתות חשמל חכמות: ניהול אנרגיה מבוזר ותגובה מהירה לשינויים בצריכה ובייצור חשמל. המערכת יכולה לנהל את זרימת האנרגיה בצורה אופטימלית, להפחית עומסים ולשפר את היעילות האנרגטית. תחבורה חכמה: מערכות ניהול תנועה מסתגלות שמפחיתות עומסים ופליטת גזים. המערכת יכולה להציע מסלולי נסיעה אופטימליים בזמן אמת, להגיב לשינויים בתנאי הדרך ולשפר את חווית הנסיעה. ייצור מתקדם: התאמת מערכות ייצור לשינויים בדרישות ובקצב הייצור. המערכת יכולה לנהל את תהליכי הייצור בצורה אופטימלית, להבטיח גמישות ויעילות ולהגיב במהירות לשינויים בדרישות השוק.[[6,8](#_ביבליוגרפיה)]

## בעיית General Task Allocation Problem (GTAP)

בעיה כללית של הקצאת משימות (GTAP)

בעיית הקצאת משימות כוללת קבוצה של סוכנים , קבוצת משימות

וקבוצת שירותים . כל סוכן מספק תת-סט של שירותים, וכל משימה מכילה תת-סט של שירותים נדרשים. נסמן ב- תת-משימה של המשויכת לשירות מסוים . עבור כל תת-משימה קיימת עבודה נדרשת המציינת את העבודה של שירות מסוים שצריך ליישם על במאמץ משולב להשלמת המשימה הזו. לכן, מושלמת רק אם לכל אחת מתת-המשימות שלה הושלמה הכמות המתאימה של העבודה על ידי סוכנים המחזיקים בשירותים הנדרשים.

לכל משימה ולכל סוכן יש מיקום פיזי. קבוצת כל המיקומים האפשריים מסומנת על ידי . נסמן ב- את הזמן הנדרש לנסיעה בין שני מיקומים. הקצאת משימות לסוכנים מסומנת על ידי מטריצת , שבה הערך מייצג את חלק תת-המשימה שהוקצתה לסוכן .

סוכנים יכולים לבצע רק תת-משימה אחת בכל פעם ולהשתמש רק בשירות אחד. נסמן ב- את מספר תת-המשימות שהוקצו לסוכן . הלוח הזמנים של מסומן על ידי והוא מכיל רצפי שלישיות המפרטות את תת-המשימה המסוימת, ואת זמן ההתחלה והסיום ליישום אותו שירות על ידי הסוכן, בהתאמה. סוכנים מרובים יכולים לחלוק תת-משימה. כמות הזמן שסוכן חייב לבצע במשימה שווה לחלוקת העבודה .

התועלת שהסוכנים מפיקים מיישום שירות למשימה מסוימת תלויה במספר הסוכנים המנהלים אותה במקביל. זה מסומן על ידי פונקציית היכולת הלא שלילית . נסמן ב- את הזמן ש- סוכנים עובדים ביחד על בפתרון (לוח זמנים) לבעיה. לכן הוא החלק היחסי של המשימה שמתבצע על ידי סוכנים במקביל. התועלת הראשונית שניתן להפיק על ידי הסוכנים להשלמת ביצוע ב- היא:

כאשר היא כמות הסוכנים המוגבלת הנדרשת לטיפול ב-. התועלת הראשונית הכוללת לביצוע כל השירותים של ב- היא:

התועלת המתקבלת לביצוע המשימה תלויה גם בפונקציית המועד

, שהיא לא יורדת עם . לכן, התועלת עבור משימה , שמנוהלת בזמן התחלה , היא:

[[1](#_ביבליוגרפיה)]

## Dynamic GTAP

הבעיה הדינמית מיוצגת כסדרת בעיות סטטיות, כאשר כל בעיה מתחוללת כאשר משימה חדשה מתקבלת. בבעיה הדינמית, משימות עולות במהלך הזמן. נסמן ב- את הזמן שבו מתחילה המשימה . לכן, התועלת המופחתת עבור ביצוע משימה תלויה בזמן ההתחלה שלה:

המשימה הנוכחית (אם קיימת) שנמצאת בביצוע על ידי הסוכן והשירות הנוכחי שהוא משתמש בו, מסומנים ב- ו- בהתאמה. הסוכנים יכולים להפסיק את ביצוע המשימה הנוכחית שלהם. עונש להפסקת משימה, , תלוי במשימה הנוכחית שהופסקה ובכמות העבודה שנותרה עבור השירות בעת נטישת המשימה, . התועלת הניתנת עבור היא:

כאשר היא המשימה הראשונה במערכת השעות של הסוכן. התועלת של הקבוצה עבור הפתרון היא:

בעיה זו ניתן לפתור באופן מרכזי או ביזורי. ביישום מרכזי, כל המידע מועבר ליחידה מרכזית שפתרה את הבעיה ומעבירה את ההקצאה שהיא יוצרת לסוכנים. ביישום ביזורי, הסוכנים פותרים את הבעיה באמצעות אלגוריתם של העברת הודעות. [[6](#_ביבליוגרפיה)]

## FMC (‏fisher market clearing)

ניקוי השוק של פישר (Fisher Market Clearing) הוא מודל כלכלי המכיל קונים, כאשר כל קונה מחזיק בסכום כסף מסוים, ו- סחורות. מטריצת בשם מייצגת את העדפות הקונים על המוצרים, כאשר הערך מציין את ההעדפה של קונה לסחורה .

פתרון השוק הוא וקטור מחירים , אשר מציין מחיר לכל סחורה . וקטור מחירים זה מאפשר לכל קונה לבזבז את כל כספו על סחורות עם מקסימום ערך למחיר , בעוד שכל הסחורות בשוק נמכרות. הקצאה בפישר מרקט היא מטריצה , בה כל רשומה

היא החלוקה של הסחורה המוקצת לקונה על פי מחירי השוק .

בנוסף, הקצאות בפישר מרקט הן פארטו-אופטימליות וגם "חסרות קנאה". המשמעות של פארטו-אופטימליות היא שלא ניתן לשפר את מצבו של קונה אחד מבלי לפגוע במצבו של קונה אחר. המשמעות של "חסרות קנאה" היא שכל קונה מרוצה מההקצאה שלו ולא מעדיף את ההקצאה של קונה אחר, בהנחה שכל הקצאות הכסף היו שוות.

מודל ניקוי השוק של פישר משמש כבסיס לפתרון בעיות הקצאה שונות ומורכבות, והוא מאפשר לבצע חלוקה הוגנת ויעילה של משאבים בין משתתפים רבים. במקרים רבים, מודל זה משולב עם אלגוריתמים חישוביים מתקדמים כדי למצוא את פתרון השוק בצורה מהירה ויעילה.[[2,7](#_ביבליוגרפיה)]

## (FMC ATA) FMC Asynchronous Task Allocation

FMC ATA הוא אלגוריתם מבוזר אסינכרוני המיועד להקצאת משימות בשוק פישר. כמו ב-FMC TA, גם ב-FMC ATA ישנם שני סוגים של סוכנים: סוכנים שמספקים שירותים (פעילים) וסוכנים שדורשים שירותים (משימות). גרף התקשורת הוא דו-חלקי, כלומר, השכנים של כל סוכן פעיל הם רק סוכני משימה ולהפך.

|  |
| --- |
|  |
|  |

כל סוכן משימה המייצג משימה , מכיל תצוגה מקומית .

היא קבוצת סוכנים פעילים שיכולים לבצע לפחות מיומנות אחת כחלק מביצוע . ו- הם מטריצות של הקצאות והצעות של סוכנים שכנים למיומנויות הנדרשות למשימה . הוא וקטור מחירים כאשר , ו- היא המטריצה של הזמנים המוקדמים המינימליים שבהם הסוכנים ב- יכולים לבצע את תת המשימות.

המחיר עבור כל משימה משנית הוא סכום ההצעות האחרונות הגבוהות ביותר עבור משימה זו שהגיעו מכל אחד מהסוכנים הפעילים השכנים. כל הודעה שנשלחת מ- ל- כוללת , כאשר ו- מציינים את הסוכן הפעיל השולח ואת סוכן המשימה המקבל. כאשר הוא ההצעה של לשימוש במיומנות , ו- הוא הזמן המוקדם ביותר ש- יכול לבצע את המשימה המשנית.

אלגוריתם 1 מציג את פעולות סוכן המשימה כאשר הוא מטפל בהודעות נכנסות. ראשית, לכל הודעה חדשה, מטריצת מתעדכנת עם ההצעה החדשה (שורה 4). לאחר מכן, המחירים לכל מיומנות מחושבים על ידי ב- (שורה 5); וההקצאות החדשות ב- נקבעות על ידי (שורה 6). שורות 7 ו-8 מתייחסות לתהליך התזמון, המשולב לחישוב רציף אחד. הזמן מתעדכן ב- והזמן המוקדם ביותר שסוכנים מוקצים לתת-משימה יכולים לבצע בו זמן מקביל, , מתעדכן עם הזמן המקסימלי בשורה . אלגוריתם של סוכן המשימה ממשיך לרוץ עד שהמחירים לכל המיומנויות מתקרבים, (בניסויים שלנו השתמשנו ב-. כאשר הם מתקרבים, אינדיקטור של התקרבות מתעדכן (שורה 9). לבסוף, הודעות נשלחות לכל עם ההקצאות המעודכנות , הזמן המוקדם לשיתוף , ואינדיקטור התקרבות (שורה 10).

|  |
| --- |
|  |
|  |

אלגוריתם 2 מציג את פעולות הסוכן הפעיל כאשר הוא מקבל הודעות. ראשית, הסוכן מבדיל בין שני סוגי הודעות ומגיב בהתאם. אם סוג ההודעה הוא HSM, המשימה החדשה מתווספת לקבוצת והתועלת האישית מחושבת עבור כל אחת מהמיומנויות של ו- (שורות 5-6). אם סוג ההודעה הוא הודעה סטנדרטית (כלומר, המשימה כבר קיימת ב-: מתעדכן עם , הסימן המצבי מתעדכן עם , והזמן המוקדם לשיתוף מתעדכן ב- (שורות 8).

לאחר עדכון התצוגה המקומית שלו, הסוכן ממשיך לחשב את ההצעות שלו כך:

עבור משימות חדשות, שבהן עדיין לא קיימת הקצאה בתצוגה המקומית של הסוכן, אנו מניחים

(שורות 9).

השלבים הבאים של אלגוריתם הסוכן הפעיל זהים לשלב השני ב-FMC TA. הסוכן הפעיל מחשב את לוח הזמנים שלו רק למשימות ישנות. הלוח ההתחלתי מוגדר על ידי מיון כל ההקצאות למשימות ב- המשימות שהוקצו לסוכן פעיל לפי התמורה המרבית למחיר, כלומר,

(שורה 10).

לפי הלוח ההתחלתי, נחשב זמן ההגעה של הסוכן הפעיל לכל אחת מהמשימות שהוקצו לו. חישוב הזמן להגעה למשימה הראשונה מתייחס רק לזמן הנסיעה. חישוב הזמנים למשימות שהוקצו מתייחס, בנוסף לזמן הנסיעה, לזמן שהסוכן הפעיל מבצע משימות קודמות (שורה 11). לאחר מכן, עבור כל תת-משימה ב-, הסוכן בודק האם הזמן גדול מהזמן שנקבע להקצאה. במקרים אלה, הסוכן מנסה לקדם בתור את המשימות שבהן אין צורך לשיתוף, והזמן הסופי של הגעה למשימה נקבע (שורה 12). לבסוף, כל שולח הודעות לכל סוכן משימה שכנו ב-, עם ההצעות המעודכנות שלו וזמני ההגעה שלו , כפי שנמצאים בלוח הזמנים המעודכן

(שורה 13).[[2](#_ביבליוגרפיה)]

# שיטה

## תיאור המצב הקיים

כיום ישנם אלגוריתמים רבים המיועדים לפתרון בעיית ההקצאה המשימות במערכות רב-סוכנים (Multi-agent Task Allocation).בסקירה הספרותית שלנו, התמקדנו במשפחה של אלגוריתמים המבוססים על מודל ניקוי השוק של פישר, מרכזיים ומבוזרים, כאשר כל אחד מהם יכול להיות סינכרוני או אסינכרוני.

בנוסף לאלגוריתמים אלו, קיימות גישות נוספות המתמקדות בשיטות למידה מתוגברת (Reinforcement Learning) ובאלגוריתמי חיזוק (Reinforcement Methods). גישות אלו מציעות דרכים חדשניות ויעילות להתמודדות עם חלוקת משימות בצורה שממקסמת את הרווח הכולל או את תועלת הקבוצה, תוך התחשבות במגבלות המשאבים הזמינים.

אחת הגישות הפופולריות היא DSRM (Dynamic Stochastic Resource Management), המספקת פתרונות יעילים וקרובים לאופטימליים במצבים שבהם הפתרון האופטימלי אינו בר-השגה בזמן סביר. גישה נוספת היא RPA (Robust Planning Algorithm), המציעה יציבות וביצועים גבוהים בתנאים דינמיים ולא וודאיים.

בעת בחירת האלגוריתם המתאים לפתרון בעיית הקצאת המשימות במערכות רב-סוכנים, יש לקחת בחשבון מספר גורמים מרכזיים:**תועלת (Utility)** : מדד הביצוע משמש להשוואת מצבים התוך האלגוריתם ובין אלגוריתמים שונים. **סקלביליות**: היכולת של האלגוריתם להתמודד עם מספר גדול של סוכנים ומשימות. **זמן חישוב**: הזמן הנדרש לאלגוריתם להגיע לפתרון, במיוחד בתנאים של זמן אמת. **יכולת התאמה לשינויים**: היכולת של האלגוריתם להסתגל לשינויים בסביבה הדינמית של המערכת .לצד הגישות הנ"ל, יש לציין גם את השימוש בפרדיגמות של מתכנני ניהול תורים (Queue Management Planners) ואלגוריתמים מבוססי תורות .(Game-Theoretic Algorithms) גישות אלו מספקות כלים להתמודדות עם קונפליקטים ותחרות בין הסוכנים על משאבים, תוך התחשבות בתועלת הכללית של הקבוצה.

בסופו של דבר, הבחירה באלגוריתם המתאים תלויה בצרכים הספציפיים של הבעיה, בסביבה שבה פועלים הסוכנים ובמטרות שברצוננו להשיג. על ידי שילוב והתאמה של גישות שונות, ניתן למצוא פתרונות יצירתיים ויעילים יותר לבעיית הקצאת המשימות במערכות רב-סוכנים המורכבות.

## הגדרת המודל התיאורטי

שימוש באלגוריתם הקצאת משימות לסוכנים מבוסס FMC (Fisher Market Clearing) מבוזר וחזרתי עבור סימולטור אירוע רב נפגעים (אר"ן) מציע פתרון יעיל וגמיש לניהול ותיאום בין סוכנים שונים בזמן אמת. באירועים מסוג זה, יש צורך בתגובה מהירה ובתיאום מדויק בין משאבים רפואיים, צוותי חילוץ והצלה, וניהול אירועי תשתית.

האלגוריתם FMC מבוזר מאפשר חלוקה דינמית של משימות בין סוכנים על בסיס התמחויותיהם, זמינותם ויכולת הביצוע שלהם. האלגוריתם מבוסס על עקרונות ניקוי השוק של פישר, שבו כל סוכן מקבל תקציב ויכול להציע הצעות עבור משאבים בהתאם לערך שהם מקנים להם. בסופו של דבר, התקציבים מותאמים כך שהשוק מתנקה והמשאבים מחולקים בצורה אופטימלית.

באירוע רב נפגעים, כל סוכן (כגון אמבולנס, צוות רפואי או יחידת חילוץ) יקבל תקציב משאבים המבוסס על קריטריונים של דחיפות, צורך רפואי וזמינות משאבים. האלגוריתם החזרתי (iterative) מאפשר לסוכנים להתאים את הצעותיהם בזמן אמת בהתאם לשינויים במצב האירוע, וכך מבטיח חלוקה גמישה ואפקטיבית של משאבים ומשימות.

יתרונות השימוש באלגוריתם FMC מבוזר וחזרתי בסימולטור אירוע רב נפגעים כוללים, **תגובה מהירה**: היכולת להגיב במהירות לשינויים דינמיים במצב האירוע. **תיאום משופר**: ניהול ותיאום טובים יותר בין סוכנים שונים. **יעילות**: שימוש אופטימלי במשאבים מוגבלים כדי למקסם את הצלת החיים והקטנת הנזק. **גמישות**: התאמה מהירה לשינויים בשטח, כמו הופעת נפגעים חדשים או שינוי במצב הנפגעים. בזכות היכולת להתמודד עם בעיות מורכבות בצורה מבוזרת ודינמית, האלגוריתם FMC מציע פתרון אפקטיבי לניהול אירועים רב נפגעים, תוך שמירה על יעילות וגמישות הנדרשת במצבי חירום.

שימוש באלגוריתם חזרתי יאפשר התאמה טובה יותר של החלוקה לבעיה באמצעות חישוב חוזר ודינמי של ערכי ה-R. באלגוריתם הלא חזרתי, ה-R מחושב פעם אחת בתחילת הריצה של האלגוריתם, כלומר ה-R מחושב ביחס לזמן ולמיקום ההתחלתי. בעוד שבגרסה חזרתית ה-R מתעדכן לפי המיקום והזמן. לדוגמה, ניקח בעיה פשוטה עם 3 משימות וסוכן פעיל יחיד בעלי מאפיינים שווים ומיקומים שונים.

**דוגמה**: אלגוריתם חזרתי מול אלגוריתם לא חזרתי

**אלגוריתם חזרתי [1]**:

סוכן פעיל יבצע תחילה את הבעיה הקרובה ביותר 1 לאחר מיכן יעדכן את הR לפי המיקום הנוכחי (1) . ימשיך ל 2 ויסיים ב 3

**אלגוריתם לא חזרתי [2]:**

הסוכן הפעיל יבצע את המשימות לפי המרחק מהנקודה ההתחלתית. כלומר 1,3,2

מהדוגמה ניתן לראות שבמקרה החזרתי [1] הדרך שיש לעבור קצרה יותר, כלומר שהתועלת יותר גבוהה במקרה החזרתי. זאת מכיוון שלסוכן אין מידע על המיקום העתידי כשהוא מחשב את ה-R באלגוריתם הלא חזרתי [2].

## השערות המחקר

על ידי בחינת ההשערות הללו, אנו מקווים להוכיח כי האלגוריתם FMC מבוזר וחזרתי הוא פתרון מוצלח לפחות כמו האלגוריתמים המתחרים, וכי הווריאציה החזרתית מוצלחת יותר מהקלאסית לפתרון בעיות SOMUP.

ההשערות המחקריות שלנו הן: השימוש באלגוריתם FMC מבוזר וחזרתי יוביל לחלוקה אופטימלית ויעילה יותר של משאבים לעומת הגרסה הקלאסית. האלגוריתם החזרתי יאפשר תגובה מהירה וגמישה יותר לשינויים דינמיים בשטח ובכך יקטין את זמן ההמתנה וכך יגביר את יעילות חלוקת המשאבים. השימוש באלגוריתם חזרתי יוביל לניהול ותיאום משופר בין הסוכנים השונים, ותועלת גבוה יותר. על ידי בחינת ההשערות הללו .

בנוסף מכיוון שהגרסה החזרתית מורכבת מרצף של בעיות יחידות. אז אנו מניחים שסיבוכיות זמן הריצה תהיה ארכה מזו של האלגוריתם המקורי .בכול מיקרה אנו מצפים לכבל תוצאות טובות מכיוון ש- FMC הינו פארטו-אופטימליות ו "חסר קנא"

## תכנון הניסוי

בניסוי זה נשתמש בסימולטור הקיים CTTD של ד"ר תהילה כספי כדי להריץ את האלגוריתם החזרתי ולהשוות אותו לשיטות עדכניות נוספות כגון DSRM ו-RPA. בניסוי נבצע את השלבים הבאים: נגדיר מספר תרחישים שונים של הבעיה האבסטרקטית של SOMUP בהם יהיו מספרים משתנים של סוכנים ומשימות. כל תרחיש יכלול מספרים שונים של משימות ושל סוכנים נותני שרות, וסוגי משימות לפי פונקציות שיתוף פעולה שונות כלומר הצורך בשיתופי פעולה לביצוע משימות .

נריץ את הסימולציה עבור כל אחד מהתרחישים המוגדרים תוך שימוש בשלושה סוגי מתודולוגיות שונות : FMC, DSRM, ו-RPA. בכל הרצה, נמדוד את הביצועים של כל אלגוריתם לפי פרמטרים מוגדרים מראש. נבצע השוואה בין התוצאות שהתקבלו מהאלגוריתמים השונים לפי הפרמטרים הבאים: זמן התכנסות ,יעילות, הזמן שלוקח לכל אלגוריתם להגיע לפתרון סופי מידת ,היכולת למקסם את הצלת החיים והקטנת הנזקים.

בנוסף להשוואת האלגוריתמים השונים, נשווה בין וריאציות שונות של :

FMC (FMC\_RTA, FMC\_TA) כדי להבין איזו וריאציה נותנת תוצאות טובות יותר במצבים שונים. נחקור את ההעדפות במצבים השונים, את זמן ההתכנסות של כל וריאציה ואת התועלות הכלליות.

על ידי ביצוע הניסוי והניתוחים המתוארים, אנו מקווים להוכיח כי האלגוריתם FMC מבוזר וחזרתי מספק פתרון יעיל וגמיש לניהול ותיאום בין סוכנים שונים בזמן אמת.

## היוריסטיקה משופרת

במהלך כתיבת האלגוריתם נתקלנו בהזדמנות לשפר את ההיוריסטיקה הקיימת . ההיוריסטיקה הנוכחית מעדכנת זמני ההגעה המוקדמים לפי התיעדוף הפרטני של כל סוכן, ללא התחשבות בשיתוף פעולה בין הסוכנים. לעומת זאת ההיוריסטיקה המשופרת מתחשבת גם בחלוקה מחדש של המשימות לאחר הקידום. כך נמנעים ממצבים בהם זמן המשותף נקבע בהתאם לזמן המאוחר ביותר של הסוכן החולק את המשימה שאיננה השמה חוקית .באופן מעשי, כאשר סוכן פעיל מעורב במשימה עם סוכן אחר הוא יעדכן את זמן ההגעה המוקדם ביותר לפי חלוקה לאחר הקידום של המשימות. תהליך זה ימנע עיקובים שלא לצורך להשמה לא חוקית ויעודד שיתוף פעולה.

שיפור הזה של ההיוריסטיקה נועד לטפל במקרי קצה ולגרום לכך שמשימות יבוצעו בצורה מתואמת ויעילה יותר, תוך מניעת עיקובים מיותרים של משתתפים במשימה ותיאום זמנים מדויק יותר בין הסוכנים. כך נוכל לשפר את יעילות האלגוריתם .

## הקדמה לבעיה חלוקת סוכנים למשימות (FMC\_TA)

חלוקה בין סוכנים המספקים שירותים (SP) לסוכנים המבקשים שירותים (SR) מתבצעת כאשר המספקים מתקשרים רק עם המבקשים ולהפך, מה שיוצר גרף דו-חלקי. בעיות חלוקה אלו מאופיינות בהבחנה ברורה בין שתי קבוצות של סוכנים. מערכת FMC\_TA היא בעיה אופטימיזציה מוכוונת שירות שבה סוכנים מייצגים מספקי שירות (SP) ומבקשי שירות (SR). לכל SP יש סט מיומנויות שניתן להשתמש בהן כדי לספק שירותים ומערך של SR שלהם הוא יכול לתת שירותים. באופן הדדי, לכל SR יש סט מיומנויות נדרש למשימה ומערך של SPs שכנים בסביבתו שיכולים לספק את השירות שהוא צריך.

ישנו תמריץ מקומי לבצע שירות כדי להשיג תועלת. ההעדפות לחישוב ערך ה-R של פישר והתועלת נקבעות לפי זמן ההגעה, דחיפות ומספר הסוכנים. הפתרון ב-FMC\_TA הוא דו-חלקי, מכיוון שסוכנים מקבוצה אחת מתקשרים רק עם סוכנים מהקבוצה השנייה ולכן הוא מייצג את התוכנית המספקת-מבקשת בצורה הטובה ביותר. הפתרון לבעיה הוא לוח זמנים למשימות לכל SP.

## הסימולטור

כדי לבדוק ולהשוות את המודל התיאורטי, נשתמש בסימולטור של דוקטור תהילה כפרי. הסימולטור מדמה בעיות אר"נ, אך נשתמש בו כדי לפתור את הבעיה המופשטת שנועדה לדמות סביבה של בעיות מוכוונות שירות שניתן לפתור באמצעות יישום של אלגוריתמים מבוזרים שונים.

הסימולטור מקבל פרמטרי קלט ליצירת SOMAOP וכן את האלגוריתם שבו אנו רוצים להשתמש כדי לפתור את הבעיה, והוא מפיק את הפתרון שנמצא. נכון לעכשיו, הסימולטור יכול להריץ מספר אלגוריתמים מסונכרנים ולהשוות את התוצאות שלהם עבור אותה SOMAOP ראשונית על ידי ייצוא התוצאות והצגתן כגרפים. הסימולטור משתמש ביחידת זמן השוואתית משותפת (NCLO) וביחידות הצלחה (Utility) כדי להשוות בין ביצועי האלגוריתמים השונים.

## Fisher Market Clearing Repetitive Task Allocation (FMC RTA)

FMC RTAהוא אלגוריתם מבוזר סינכרוני. בדומה ל- , FMC ATA ב FMC RTA-ישנם שני סוגים של סוכנים: סוכנים שמספקים שירותים (פעיל) וסוכנים שדורשים שירותים (משימה). בנוסף, קיימת לולאה מרכזית שמסנכרנת בין פעולות הסוכנים. גרף התקשורת הוא דו-חלקי, כלומר, השכנים של כל סוכן פעיל הם רק סוכני משימה ולהפך.



### FMC RTA Task Agents

|  |
| --- |
|  |
|  |

כל סוכן משימה המייצג משימה , מכיל תצוגה מקומית הכוללת את .

היא קבוצת סוכנים פעילים שיכולים לבצע לפחות מיומנות אחת כחלק מביצוע (כלומר, סוכנים פעילים שכנים). ו- הם מטריצות של הקצאות והצעות של סוכנים שכנים למיומנויות הנדרשות למשימה . הוא וקטור של מחירים כאשר , ו- הוא המטריצה של הזמנים המוקדמים שבהם הסוכנים ב- יכולים לבצע את המשימות המשניות. המחיר עבור כל משימה משנית הוא סכום ההצעות האחרונות עבור משימה זו שהגיעו מכל אחד מהסוכנים הפעילים השכנים. הסוכן נמצא באחד מהמצבים הבאים . (HSM, commit, SM) מכיל את הצרכים של . הוא המצב שבו הסוכן נמצא: (HSM, R, SM) . היא מטריצה בינרית של תתי משימות כאשר המשימה הראשונה של כל היא . מכילה את תת המשימה המוקדמת ביותר (אם קיימת) שמתבצעת "באזור מסוים". כל הודעה שנשלחת מ- ל- כוללת , כאשר ו- מציינים את הסוכן הפעיל השולח ואת הסוכן המשימה המקבל, הוא ההצעה של לשימוש במיומנות – הם הזמנים המוקדמים ביותר ש- יכול לבצע את כל אחת מהשימות המשניות, הוא מצב הסוכן ששלח את ההודעה ו- תתי המשימות שנכנסו ל- והאם הן הראשונות ל-.

כל סוכן משימה המייצג משימה , מקבל מכל

(שורה 1).

אם אז (שורה 2, 3). אם אז (שורה 4, 5). לאחר מכן, המחירים לכל מיומנות מחושבים על ידי בווקטור (שורה 6); וההקצאות החדשות ב- נקבעות על ידי (שורה 7). הזמן מתעדכן לפי- ,הזמן המוקדם ביותר שסוכנים מוקצים לתת-משימה יכולים לבצע בו זמן המקביל, , מתעדכן עם הזמן המקסימלי (שורה 8). לאחר מכן, אם קיים כך ש- אז

(שורה 9). ההודעה הכוללת את המידע הדינמי המשתנה במהלך ביצוע האלגוריתם היא (שורה 10).

### FMC RTA Active Agents

|  |
| --- |
|  |
|  |

כל סוכן נותן שירות המייצג , מכיל תצוגה מקומית הכוללת את .

הוא קבוצת סוכני משימה שנזקקים לפחות למיומנות. ו- הם מטריצות של הקצאות והצעות של סוכנים שכנים למיומנויות הנדרשות למשימה .

הוא המצב שבו הסוכן פעיל נמצא: (HSM, R, SM) . הוא לוח הזמנים לסוכן נותן שירות i כאשר הם: לו"ז משוריין, לו"ז לאחר קידום, לו"ז מהאיטרציה הקודמת ולו"ז לפני קידום משימות בהתאמה. מכיל את הצרכים של כל השכנים . הוא משתנה שמכיל את תת המשימה הראשונה ב- (אם קיים ) לאחר שורה 7. מכיל את ה- תת המשימה המוקדמת ביותר (אם קיימת) שמתבצעת "באזור מסוים". כל הודעה שנשלחת מ- ל- כוללת , כאשר ו- מציינים את הסוכן הפעיל השולח ואת סוכן המשימה המקבל, הוא החלוקה של לשימוש במיומנות ו- הוא הזמן המאוחר ביותר ש- יכול לבצע את המשימה המשנית.

אלגוריתם 2 מציג את פעולות הסוכן הפעיל כאשר הוא מקבל הודעות מכל , ומרכיב תצוגה מקומית של :

(שורה 1).

אם , אז מעדכנים את זמני ההגעה והמרחקים (שורה 2, 3). אם נמצאת ב- (שורה 4), אז תוסיף את ל- (משימות בהתחייבות) (שורה 5). נוציא את לפי מ- (שורה 6). נעדכן את זמן ההתחלה ואת המיקום ההתחלתי לפי (שורה 7) וbגדיר את ה- ל- (שורה 8).לאחר עדכון התצוגה המקומית שלו, הסוכן ממשיך לחשב את ההצעות שלו כך:

(שורות 9). השלבים הבאים של אלגוריתם הסוכן הפעיל זהים לשלב השני ב- . הסוכן הפעיל מחשב את לוח הזמנים. הלוח ההתחלתי מוגדר על ידי מיון כל ההקצאות למשימות ב- המשימות שהוקצו לסוכן פעיל לפי התמורה המרבית למחיר, כלומר,

(שורה 10). לאחר מכן, עבור כל תת-משימה ב- הוא בודק האם הזמן גדול מהזמן שנקבע להקצאה, הוא מנסה לקדם בתור התור משימות בהן אין צורך לשתף; והזמן הסופי של הגעה למשימה נקבע (שורות 11).

מימוש היוריסטיקה אלטרנטיבית נוסיף .

(שורה 12).

אם שונה מ- (שורה 13), מחשבים את באמצעות (שורה 14). (שורה 15). לבסוף, כל שולח הודעות לכל סוכן משימה שכנו ב-, עם ההצעות המעודכנות שלו, , וזמני ההגעה שלו , כפי שנמצאים בלוח הזמנים המעודכן , ואת המשימה הראשונה שהוא מבצע (שורה 16).

### FMC RTA Main Loop

|  |
| --- |
|  |
|  |

*מכיוון שמדובר באלגוריתם סינכרוני, אז Algorithm 0 מקיים לולאה מרכזית שמפעילה את הסוכנים ו-. ראשית נגדיר את ה- של כל ה- ל*-HSM *(שורה 1,2). נריץ את האלגוריתם כל עוד קיימות תתי משימות שלא נכנסו ללוח הזמנים השמור (שורה 3). לאחר מכן נריץ את על כל*  *סוכני המשימה (שורה 4,5). ואז נריץ על כל הסוכנים הפעילים (שורות 6,7).*

## קשיים



### הפיכת האלגוריתם לחזרתי :

במהלך ההסבה של האלגוריתם לחזרתי נתקלנו בכמה דילמות עקרוניות, השאלה המרכזית הייתה כיצד לממש את השינוי באופן מיטבי. בתחילה, התייעצנו עם ד"ר תהילה כספי שהציעה להשתמש במנגנון חזרתי קיים בסימולציה. אולם, לאחר שיקול דעת נוסף והתייעצות עם פרופ' רועי זיוון החלטנו לסטות מההמלצה הראשונית.

פרופ' זיוון הציע גישה חלופית שמתמקדת בתכונה המבוזרת של האלגוריתם, שהחזרתיות היא אזורית כלומר אינדיבידואלית עבור כל סוכן משימה ועד שכניו מדרגה שניה בלבד. על פי הצעה זו, אין צורך לאפס ,לשמור ולהריץ מחדש את המודל המעודכן בכל פעם מחדש. במקום זאת, כל סוכן פעיל יוכל לשמור את "ההיסטוריה" האישית שלו ולעדכן את שכניו בהתאם לשינויים שיחולו.

גישה זו מציעה יתרון משמעותי בכך שהיא חוסכת בזמן ומשאבים, תוך שהיא שומרת על רמת הדיוק והעדכון הנדרש בכל שלב. בנוסף, היא מאפשרת לכל סוכן לפעול בצורה אוטונומית, תוך שמירה על התיאום הנדרש עם הסוכנים האחרים במערכת. בעקבות שיקולים אלה, נעדיף לממש את האלגוריתם בגישת החזרתיות האינדיבידואלית, בכדי לשמור על היעילות והדיוק של התהליך.

### אינטגרציה עם מערכת קיימת (הסימולטור)

אחד האתגרים המרכזיים בפרויקט הוא האינטגרציה של האלגוריתם החזרתי עם הסימולטור הקיים. מדובר בתהליך מורכב הדורש תכנון וביצוע קפדני כדי להבטיח שהאלגוריתם החדש ישתלב בצורה חלקה במערכת מבלי לפגוע בתהליכים קיימים. להלן פירוט האתגרים והפתרונות האפשריים: הבנה מעמיקה של הסימולטור הקיים :לפני שניתן להתחיל באינטגרציה, יש צורך בהבנה מעמיקה של מבנה הסימולטור הקיים, כולל המודולים השונים, הממשקים, והתהליכים הפנימיים. עלינו לבדוק כיצד האלגוריתם החדש יכול להשתלב במבנה זה מבלי לגרום לשיבושים. התאמת ממשקים: האלגוריתם החדש דורש ממשקים מותאמים כדי לתקשר עם המודולים השונים בסימולטור. יש להגדיר את הפונקציות החדשות הדרושות, את פורמט הנתונים, ואת פרוטוקולי התקשורת. עלינו לוודא שהממשקים החדשים תואמים את הממשקים הקיימים ולא דורשים שינויים מרחיקי לכת במערכת.

לכן בביצוע הפרויקט נעזרתי בד"ר תהילה כספי עזרא לנו רבות והקדישה מזמנה כדי לסייע עם הממשקים והפונקציות הקיימות בסימולטור, מציאת פתרונות יצירתיים לבעיות התכנותיות שצצו במהלך הפרויקט ובניית פלטים והשוואות .

### מציאת והתאמת אלגוריתם FMC\_TA לסימולציה שתתאים לגרסה מבוזרת חזרתית

אחד הקשיים שבהם נתקלנו בתחילת הפרויקט היה למצוא אלגוריתם FMC\_TA שיתאים לסימולציה ושיוכל לתמוך בווריאציה חזרתית. הסימולציה דרשה שהאלגוריתם יהיה מסוג Anytime Algorithm, כלומר שבכל אינטראקציה תיווצר חלוקה ותועלת. הבעיה היא שבאלגוריתם הקלאסי מחולק לשתי פאזות ומייצר לוח זמנים רק בסוף הריצה. בנוסף, האלגוריתם המקורי לא היה מיועד לפעול בצורה חזרתית. היה צורך למצוא אלגוריתם מבוסס FMC עם מנגנון חישוב מתאים כדי לאפשר לו להתמודד עם צרכי הסימולטור וצרכי המחקר.

לאחר התייעצות עם פרופסור זיוון, הוא הפנה אותנו לדוקטור בן רחמוט שהראה התעניינות רבה במחקר והמליץ לנו להשתמש ב FMC\_ATA - שהוא אלגוריתם מבוזר ואסינכרוני מבוסס FMC לפתרון בעיות חלוקת משימות לסוכנים.

# יישום הפרויקט ותוצאותיו*.*

בפרק זה נבחנת השפעת מספר הסוכנים הפעילים, מספר המשימות ורמות שיתוף הפעולה על ביצועי האלגוריתמים, בהתבסס על סיבוכיות זמן הריצה והתועלת. כל הבחינות בוצעו על פני 20 חזרות, עם ערך.

## השוואה בין הגרסאות השונות של FMC\_TA שיתוף פעולה נמוך

תמונה שמכילה טקסט, תרשים, קו, עלילה

התיאור נוצר באופן אוטומטי

בגרף זה ניתן לראות שכאשר מבעיה גדולה וצפופה(19 SR ו- 20 SP). ראשית, האלגוריתם FMC\_AT מתכנס כמעט מידית, תוך 2-3 אינטראקציות בלבד. עם זאת, התועלת המקסימלית שמספק אלגוריתם זה נמוכה יחסית לתוצאות של הווריאציות הנוספות. כמו כן, ניתן להבחין שבתחילה האלגוריתמים החזרתים מראים רעש גבוה, אך במהלך הריצה הם מתייצבים. האלגוריתם החזרתי עם ההיוריסטיקה המשודרגת (FMC\_AT Repetitive Updated Heuristic) מציג את התועלת הגבוהה ביותר, ולאחריו האלגוריתם המחזורי (FMC\_AT Repetitive), ולבסוף האלגוריתם הקלאסי (FMC\_AT) .

**תמונה שמכילה טקסט, תרשים, קו, עלילה

התיאור נוצר באופן אוטומטי**

ניתן להסיק מהגרף שבבעיות שבהם מספר הסוכנים הפעילים גדול בהרבה ממספר המשימות ההבדלים בין הווריאציות השונות קטנים . כאשר החזרתי עם ההיוריסטיקה המשודרגת (FMC AT repetitive updated heuristic)הוא בעל התועלת הגבוה ביותר לאחר מכן המחזורי(FMC AT repetitive) ולבסוף הקלאסי (FMC\_AT ).

**תמונה שמכילה טקסט, קו, תרשים, עלילה

התיאור נוצר באופן אוטומטי**

ניתן לראות בגרפים שכאשר הבעיה קטנה וצפופה , אין הבדל ניכר בתועלת בין הווריאציות השונות. כאשר האלגוריתם שמספק את התועלת הגבוהה ביותר הוא האלגוריתם המחזורי (FMC\_AT Repetitive), ולאחריו האלגוריתם הקלאסי (FMC\_AT), ולבסוף האלגוריתם החזרתי עם ההיוריסטיקה המשודרגת (FMC\_AT Repetitive Updated Heuristic). למרות שהאלגוריתמים החזרתים נוטים להיות רועשים יותר, ניתן לראות שההתכנסות שלהם משתפרת.

אינה האופטימלית עבורם .כלומר שיש נקודה בגרף שבא התועלת גבוה מהתועלת הסופית (בסביבות 280). נוסף על כך אם נשווה בין המקסימום תועלת אז האלגוריתם המחזורי המשופר מניב תועלת גבוהה מזו של הקלאסי .

## השוואה בין אלגוריטמים מבוססים FMC,RPA,DSRM שיתוף נמוך.

בחרנו להשוות בין הווריאציות המוצלחות ביותר של RPA ו-DSRM, ובין כל הווריאציות של FMC, בבעיה גדולה וצפופה עם 41 סוכנים פעילים ו-40 משימות. ניתן לראות בגרף שזמני ההתכנסות של האלגוריתמים RPA Coverage Bid/Truncated, RPA Simple ו-FMC TA קצרים משמעותית משאר האלגוריתמים. כאשר FMC TA מציג את זמן ההתכנסות הקצר ביותר, ולאחריו RPA Coverage Bid/Truncated, ולבסוף RPA Simple. בנוסף, זמן ההתכנסות של DSRM ארוך בהשוואה לווריאציות החזרתיות של FMC TA: FMC TA Repetitive ו-FMC TA Repetitive Updated Heuristic. כמו כן, ניתן לראות שהתועלת של אלגוריתם RPA Coverage Bid/Truncated היא הגבוהה ביותר, ולאחריו FMC TA Repetitive Updated Heuristic, DSRM, FMC TA Repetitive, FMC TA, ולבסוף RPA Simple.

**תמונה שמכילה טקסט, קו, תרשים, עלילה

התיאור נוצר באופן אוטומטי**

ניתן לראות בגרף שבבעיות דלילות (בהן יש הרבה יותר סוכנים מאשר משימות) הביצועים לפי התועלת מתהפכים והתועלת לאחר ההתכנסות של DSRM היא הגבוהה ביותר ,אחריו: FMC TA FMC TA Repetitive Updated Heuristic, FMC TA Repetitive, RPA Simple, ולבסוף. RPA Coverage Bid/Truncated. בנוסף, כאשר בוחנים את התועלת המקסימלית ולא רק את התועלת הסופית, ניתן לראות שבסביבות 500 אינטראקציות, התועלת של האלגוריתמים החזרתים של FMC גבוהה יותר מהתועלת של האלגוריתם הקלאסי (FMC TA).

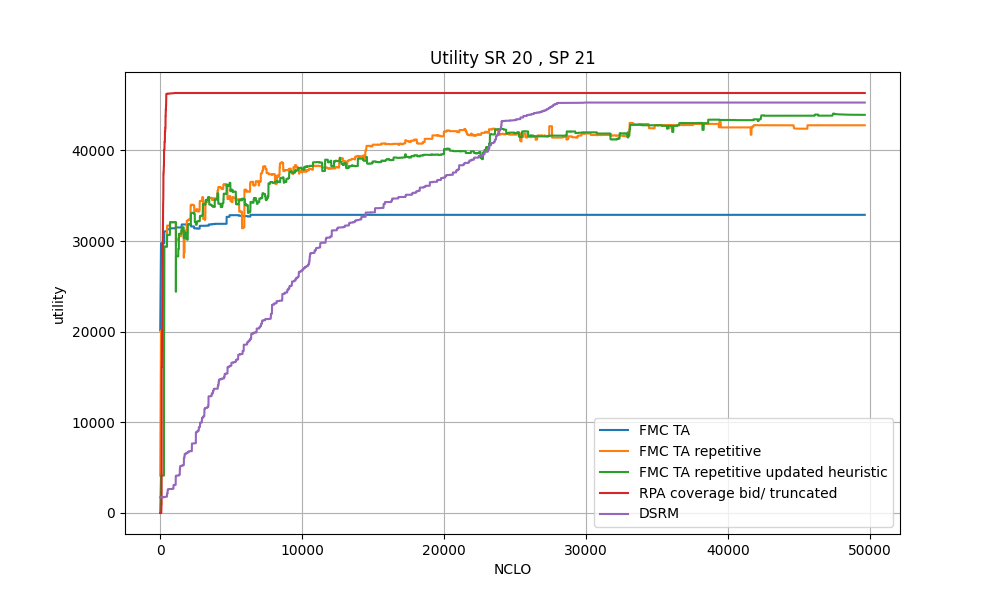
## השוואה בין הגרסאות השונות של FMC\_TA שיתוף פעולה גבוה

תמונה שמכילה טקסט, עלילה, קו, תרשים

התיאור נוצר באופן אוטומטי

ניתן לראות בגרף כשנדרש שיתוף פעולה גבוה והבעיה קשה (עם מספר גדול של משימות וסוכנים), ראשית, הגרפים פחות רועשים ויותר מגמתיים. שנית, במצב זה ניתן לראות שהתועלת הסופית של האלגוריתם החזרתי המשופר (FMC TA Repetitive Updated Heuristic) גבוהה כמעט פי רבע מהתועלת של הווריאציה החזרתית (FMC TA Repetitive). בנוסף, השוואת זמני הריצה של האלגוריתמים מציגה תמונה דומה לזו שנראתה בבעיה עם שיתוף פעולה נמוך.

## השוואה בין אלגוריטמים מבוססים FMC,RPA,DSRM שיתוף פעולה גבוה



בחרנו להשוות בין הווריאציות המוצלחות ביותר של RPA ו-DSRM, ובין כל הווריאציות של FMC, עם 21 סוכנים פעילים ו-20 משימות. ניתן לראות בגרף שזמני ההתכנסות של האלגוריתמים RPA Coverage Bid/Truncated, RPA Simple ו-FMC TA קצרים משמעותית משאר האלגוריתמים. מבין אלה, TA RPA Coverage Bid/Truncated מציג את זמן ההתכנסות הקצר ביותר, ולאחריו FMC, ולבסוף RPA Simple. בנוסף, זמן ההתכנסות של DSRM קצר יותר בהשוואה לווריאציות החזרתיות של FMC TA: FMC TA Repetitive ו-FMC TA Repetitive Updated Heuristic. כמו כן, ניתן לראות שהתועלת של האלגוריתם : RPA Coverage Bid/Truncated היא הגבוהה ביותר, ולאחריו

, FMC TA Repetitive, FMC TA Repetitive Updated Heuristic, DSRM ולבסוף. FMC TA

# סיכום

## סיכום הישגי הפרויקט ותוצריו

לסיכום בפרויקט זה באנו לפתח ולבדוק אלגוריתם לחלוקת משימות ובניית לוח זמנים חזרתי שמבוסס על ניקוי השוק של פישר בהשראת FMC\_ATA .ניתן להסיק מתוצאות המחקר שאוששנו את השערותינו ואלגוריתם זה אכן מניב תועלת גבוה יותר בנקודת ההתכנסות .שנית, ניתן לשמור את החלוקה המקסימאלית של האלגוריתם בלי קשר להתכנסות וכך לשפר את תוצאותיו. בנוסף מצאנו שכמו שמצופה האלגוריתם החזרתי רועש יחסית לאלגוריתם המסורתי .כמו ששערנו זמן ההתכנסות של האלגוריתמים החזרתים ארוכה משמעותית מהקלאסי ורועש הרבה יותר .

במהלך המחקר נתקלנו בהזדמנות לשיפור של ההיוריסטיקה הקיימת לבניית לוח הזמנים . התוצאות מראות שלשינוי זה יש השפעה רק על לווריאציה החזרתי אנו חושדים שהבדל זה נובע מכך שהאלגוריתם הקלאסי תכנס מהר מידי בסימולציה ולכן אין מספיק אטרקציות כדי שההבדל ישפיע .

זכינו לתרום אלגוריתם נוסף לסימולטור לפתרון בעיות ער"ן והמחקר של דוקטור תהילה כספי . בנוסף הרחבנו ופיתחנו אלגוריתם נוסף שיצטרף למשפחת האלגוריתמים לפתרון כללי של בעיות SOMUP.

## **תובנות מרכזיות והפקת לקחים**

התוצאות מראות שהווריאציה החזרתית והמשופרת הוא מתמודד ראוי לפחות כמו שאר אלגוריתמי

ה – FMC\_TA במונחים של תועלת .כאשר זמן הריצה ארוך כמו החזרתי ושניהם ארוכים משמעותית מהמסורתי .

אך ניתן להסיק מהתוצאות שהאלגוריתמים החזרתים המבוססים על FMC הם מתמודדים ראויים לאלגוריתמים עדכניים נוספים הנחקרים בסימולטור במצבים בהם ניתן תגמול גבוה בשל שיתוף פעולה ,וזו מכיוון שאלגוריתם מבוסס FMC הוא פארטו-אופטימלי ומעודד שיתופי פעולה בין הסוכנים.

## **המלצות להמשך מחקר או פיתוח**

מכיוון שהאלגוריתמים FMC שכתבנו בפרויקט זה מבוססים על אלגוריתם אסינכרוני FMC\_ATA . כלומר הוא איננו מחולק לפזות כמו האלגוריתם הסינכרוני המסורתי FMC\_TA.שעובד לפי 1) מציאת שיווי השוק של פישר 2) חישוב זמני ההגעה המוקדמים ביותר 3) עדכון זמני ההגעה לפי ההגעה המאוחרת ביותר לתת משימה. כאשר המימוש אחיד (לא מחולק לפזות) ניתן לשתף מידע בין השלבים השונים למציאת פתרון מושכל יותר ולכן הייתי ממליץ לחקור ולפתח היוריסטיות תיעדוף ובניית לוז נוספות המנצלות את התכונה האחידה של המודל.

כיוון נוסף שניתן לחקור הוא שימוש באינטרוולים שונים של חזרתיות כדי להקטין את סיבוכיות זמן הריצה, מכיוון שהאלגוריתם הנחקר נותן תוצאות מוצלחות במקרים מסוימים אבל בעל סיבוכיות זמן ריצה ארוכה יחסית לאלגוריתמים עדכניים אחרים .

בנוסף מכיוון שהאלגוריתם מבוסס על אלגוריתם אסינכרוני, אני הייתי ממליץ לפתח גרסה אסינכרונית על מנת לבחון ולהשוות את הביצועים האלגוריתם .

## בנימה אישית

בפרויקט גמר זה למדתי רבות והרחבתי את תחום ההבנה והעניין האישי שלי בתחומים כגון: אלגוריתמיקה, ניקוי השוק של פישר, בעיות מבוזרות, בעיות מרובות סוכנים ומשימות, תכנות ב-Python ועוד. היו קשיים רבים ומכשולים במהלך הפרויקט, נאלצתי לחשוב בצורה עצמאית ולהיעזר בפרופסור רועי זיוון, דוקטור תהילה כספי ודוקטור בן רחמוט למציאת רעיונות ופתרונות יצירתיים לבעיות שהופיעו באופן בלתי צפוי. תהליך עבודה כזה אינו חריג באוניברסיטה, ואני מניח שהוא לא שונה גם במקומות עבודה בתעשייה. אני אסיר תודה על ההזדמנות שניתנה לי לסייע במחקר בתחום מרתק במדעי המחשב . הפרויקט תרם לצמיחתי האישית כסטודנט והרחיב את אופקיי לתחומים חדשים והייתה לי חוויה מעניינת ומאתגרת

אני רוצה להוסיף ולומר תודה למנחה שלי, פרופסור רועי זיוון, שנפגשתי איתו לראשונה בקורס "תכנות מונחה עצמים", המשכתי בקורס "האינטרנט התעשייתי של הדברים", ולבסוף הוא הפך להיות המנחה שלי בפרויקט זה. ללא התמיכה והמומחיות שלו לא הייתי מצליח להשיג את מה שהשגתי כאן והרעיונות לא היו נחקרים. בנוסף, אני רוצה להודות גם לצוות האקדמי הלומד ועובד תחת פרופסור זיוון, ולדוקטור תהילה כספי ודוקטור בן רחמוט, שהראו עניין רב בנושא הנחקר ועזרו והנחו אותי לאורך כל הדרך. הם הקדישו זמן לשבת איתי ולעזור בדרכים רבות ושונות, ההנחיה והרצון הטוב שלהם היו יוצאי דופן ומוערכים מאוד.

# ביבליוגרפיה

[1] - Rachmut, B., Amador Nelke, S., & Zivan, R. (2020). Asynchronous Communication Aware Multi-Agent Task Allocation. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 11(1), Article 4.

[2]- Amador Nelke, S., Okamoto, S., & Zivan, R. (2020). Market Clearing–based Dynamic Multi-agent.

[3]- Ramchurn, S. D., Farinelli, A., Macarthur, K. S., & Jennings, N. R. (2010). Decentralized Coordination in RoboCup Rescue. Computer, 53(9), 1447–1461.

[4]- Lavie, M., Caspi, T., Lev, O., & Zivan, R. (2023). Ask and You Shall be Served: Representing & Solving Multi-agent Optimization Problems with Service Requesters and Providers. Paper presented at AAMAS 2023, May 29–June 2, 2023, London, United Kingdom, Session 1B: Planning.

[5]- Zhang, L. (2011). Proportional response dynamics in the fisher market. Theoretical Computer Science, 412(24), 2691–2698.

[6]- Nelke, S. A., & Zivan, R. (2017). Incentivizing cooperation between heterogeneous agents in dynamic task allocation. In Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS) (pp. 1082–1090).

[7]- Reijnierse, J. H., & Potters, J. A. M. (1998). On finding an envy-free Pareto-optimal division. *Mathematical Programming, 83*(1), 291-311. https://doi.org/10.1007/BF01582299

[8]- Leitão, P. (2013). Towards self-organized service-oriented multi-agent systems. In T. Borangiu et al. (Eds.), *Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing Control* (SCI 472, pp. 41–56). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35852-4_3>