# **מחקר ממוקד לפיתוח מערכת מסחר אלגוריתמית מרובת סוכנים (MARL) מבוססת אסטרטגיה ספציפית**

## **פרק 1: הנחת היסודות האסטרטגיים ואיסוף הנתונים**

פרק זה מניח את התשתית האסטרטגית והטכנית למערכת המסחר המוצעת. הוא מפרט את רכיבי הליבה של אסטרטגיית המסחר, כולל האינדיקטורים, טווחי הזמן, והלוגיקה הייחודית של "סינרגיות" ו"צורות הרמוניות". בנוסף, הפרק דן בדרישות הנתונים, במקורות המומלצים, ובאתגרים הכרוכים באיסוף ועיבוד נתונים פיננסיים מורכבים.

### **1.1. ליבת אסטרטגיית המסחר: MLMI, NW-RQK, FVG ו-LVN**

בלב מערכת המסחר המוצעת עומדת אסטרטגיה רב-שכבתית המשלבת מספר אינדיקטורים טכניים, ניתוח פרופיל שוק, ופרשנות גיאומטרית של צירופי אותות. הבנה מעמיקה של כל רכיב והאינטראקציה ביניהם חיונית להצלחת המערכת.

#### **1.1.1. מכניקת האינדיקטורים וטווחי הזמן**

האסטרטגיה נשענת על ארבעה רכיבי ניתוח מרכזיים, הפועלים בטווחי זמן שונים ומספקים מידע משלים על דינמיקת השוק:

* **Machine Learning Momentum Index (MLMI):** אינדיקטור זה, המיועד לפעול על גרף של 30 דקות, משלב ניתוח מומנטום מסורתי עם טכניקות למידת מכונה. הוא מחשב ממוצע נע משוקלל (WMA) מהיר (5 תקופות) ואיטי (20 תקופות) של מדד ה-Relative Strength Index (RSI) על מנת לאמוד מומנטום בטווח הקצר והארוך. ייחודו של ה-MLMI טמון בשימוש באלגוריתם k-Nearest Neighbors (k-NN) לניתוח דפוסי נתונים היסטוריים (השכנים הקרובים ביותר) וליצירת חיזוי מומנטום אדפטיבי. האסטרטגיה המיועדת צפויה להשתמש בחצייה של קו החיזוי של MLMI עם ה-WMA שלו כאות כניסה או אישור. פרמטרים מרכזיים כוללים את 'Prediction Data (k)', הקובע את מספר השכנים הנלקחים בחשבון (ומשפיע על היחס בין רגישות ליציבות), ואת 'Trend length', המגדיר את חלון חישוב המומנטום (ומשפיע על היחס בין מהירות תגובה להחלקת האות). צוין כי פרמטרי ברירת המחדל של האינדיקטור אמורים לספק רובסטיות מספקת, ללא צורך באופטימיזציה מתמדת שלהם.
* **Nadaraya-Watson Rational Quadratic Kernel Regression (NW-RQK):** אינדיקטור זה יפעל גם הוא על גרף של 30 דקות. הוא מיישם רגרסיית ליבה (kernel regression) לא-פרמטרית, שמטרתה להעריך עקומת "התאמה מיטבית" (best-fit) לנתוני המחיר מבלי להניח התפלגות בסיסית כלשהי. האינדיקטור משתמש בליבת Rational Quadratic, המעניקה משקל גבוה יותר לנתוני מחיר עדכניים בהשוואה לליבה אחידה (כמו בממוצע נע פשוט), ובכך מאפשרת תגובה מהירה יותר לשינויי מחיר. תכונה קריטית של אינדיקטור זה היא היותו "non-repainting", כלומר ערכי האינדיקטור עבור נר (bar) שנסגר נותרים קבועים, דבר החיוני לאמינות של בדיקות לאחור (backtesting) וביצוע חי. האות מה-NW-RQK יתקבל כאשר עקומת הרגרסיה משנה את כיוונה והופכת שורית או דובית. פרמטרים מרכזיים כוללים 'Bandwidth' (גודל חלון הזמן הנלקח בחשבון) ו-'Relative Weighting Parameter (Alpha)' (המשפיע על מידת ההחלקה של העקומה). בדומה ל-MLMI, גם כאן ההנחה היא שפרמטרי ברירת המחדל יספקו ביצועים רובסטיים.
* **Fair Value Gap (FVG) - LuxAlgo:** אינדיקטור זה יפעל על גרף של 5 דקות. הוא מזהה אזורים של חוסר איזון בין היצע לביקוש בשוק, המתבטאים כפערים (gaps) על גרף המחירים. האסטרטגיה דורשת אות "מיטיגציה" (mitigation) של FVG. במקור דובר על גרף של דקה , אך הדרישה עודכנה לגרף של 5 דקות. מיטיגציה מתרחשת כאשר המחיר חוזר לאזור הפער וממלא אותו, לפחות חלקית. עבור FVG שורי, רמת המיטיגציה היא הגבול התחתון של הפער; עבור FVG דובי, זוהי הגבול העליון. לאחר המיטיגציה, חוסר האיזון נחשב כפתור, וקיימת ציפייה להיפוך כיוון המחיר. פרמטרים רלוונטיים כוללים 'Threshold %', המשמש לסינון גודל הפערים המזוהים. נעשה שימוש באינדיקטור של חברת LuxAlgo.
* **Low Volume Nodes (LVN) מפרופיל שוק:** רכיב זה יזוהה על גרף של 30 דקות. LVNs הם אזורי מחיר בפרופיל השוק (Market Profile) שבהם התקיים נפח מסחר נמוך יחסית. באסטרטגיה זו, LVNs מייצגים "תחנות" מחיר משמעותיות שהשוק נוטה לנוע ביניהן. הגעה של המחיר ל-LVN נתפסת כנקודה המגדילה את הפוטנציאל לעסקה מוצלחת, הן בכיוון לונג והן בכיוון שורט. עוצמת ה"תחנה" (כלומר, חשיבות ה-LVN) תוערך על בסיס התנהגות היסטורית, כגון מספר הפעמים שהרמה נבדקה כתמיכה או התנגדות, ונפח המסחר שהתקיים ברמה זו בבדיקות קודמות. הערכה זו תשפיע ישירות על גודל הפוזיציה שתיפתח.

#### **1.1.2. ארבע הסינרגיות כצירופי כניסה מונעי-שוק**

המשתמש מדגיש כי מערכת ה-MARL לא "בוחרת" סינרגיה באופן אקטיבי. במקום זאת, השוק הוא זה שמייצר את התנאים, וכאשר שלושת האותות מהאינדיקטורים (MLMI, NW-RQK, ומיטיגציית FVG) מתיישרים, אחת מארבע סינרגיות כניסה אפשריות מתממשת בהכרח. ארבע הסינרגיות הללו מוגדרות על ידי הסדר המשתנה שבו שני האותות האחרונים (מיטיגציית FVG והאות הנותר מבין MLMI או NW-RQK) מופיעים לאחר קבלת האות הראשוני.

לדוגמה, אם MLMI מספק את האות הראשוני, הסינרגיות האפשריות הן:

1. MLMI (אות ראשוני) → NW-RQK (אות שני) → FVG mitigation (אות שלישי)
2. MLMI (אות ראשוני) → FVG mitigation (אות שני) → NW-RQK (אות שלישי)

באופן דומה, אם NW-RQK מספק את האות הראשוני, שתי סינרגיות נוספות אפשריות על ידי שינוי סדר הופעתם של MLMI ו-FVG mitigation. גמישות זו בסדר קבלת האותות נתפסת כמקור לרובסטיות, המאפשר לאסטרטגיה להתאים עצמה באופן פסיבי לדינמיקות שוק משתנות.

#### **1.1.3. תצורות הרמוניות (משולשים) מצירוף אותות: הנדסת מאפיינים גיאומטרית**

הרעיון המרכזי והחדשני שהוצג הוא לפרש את צירוף שלושת האותות לא רק כרצף אירועים, אלא כיצירה של "צורה הרמונית" – ספציפית, משולש גיאומטרי. כל אחד משלושת האותות (מ-MLMI, NW-RQK, ו-FVG mitigation) מציין קודקוד של המשולש.

* **ציור הצורה ההרמונית:** הצורה ההרמונית (המשולש) תצוייר ותנותח על גרף של 5 דקות, גם אם חלק מהאותות המרכיבים אותה (MLMI, NW-RQK) מגיעים מגרף של 30 דקות. הדבר מצריך מנגנון להקרנה או לפרשנות של האותות מהגרף האיטי יותר על גבי הגרף המהיר יותר.
* **הנדסת מאפיינים גיאומטריים:** לאחר זיהוי שלושת קודקודי המשולש (הנקבעים על פי נקודות הזמן והמחיר של כל אות), ניתן לחלץ מהם מאפיינים גיאומטריים כמותיים. מאפיינים אלו יכולים לכלול את אורכי צלעות המשולש, הזוויות הפנימיות שלו, יחסים בין גבהים לבסיסים, או פרמטרים נוספים המגדירים את צורתו הייחודית של המשולש.
* **שימוש במאפיינים להערכת כניסה וניהול סיכונים:** המאפיינים הגיאומטריים הללו ישמשו להערכת "נכונות" או "איכות" הכניסה הפוטנציאלית. ההנחה היא שתצורות משולש מסוימות, בעלות מאפיינים גיאומטריים ספציפיים, עשויות להיות בעלות הסתברות גבוהה יותר להצלחה בהתבסס על ניתוח היסטורי. הערכה זו תשפיע ישירות על החלטות ניהול הסיכונים, ובפרט על גודל הפוזיציה. לדוגמה, צורה גיאומטרית המזוהה כ"יציבה" או "אמינה" יותר עשויה להצדיק כניסה עם פוזיציה גדולה יותר.

#### **1.1.4. תפקיד פרופיל השוק וצמתי נפח נמוך (LVN) כ"תחנות"**

ניתוח פרופיל השוק, ובפרט זיהוי צמתי נפח נמוך (Low Volume Nodes - LVNs), מהווה נדבך נוסף באסטרטגיה. LVNs מזוהים על גרף של 30 דקות.

* **LVNs כ"תחנות" מחיר:** התפיסה היא שהשוק נע בין "תחנות" מחיר משמעותיות, ו-LVNs מייצגים תחנות כאלה. הגעה של המחיר ל-LVN נתפסת כנקודת עניין קריטית, שבה פוטנציאל העסקה (לונג או שורט) גדל, מכיוון שהמחיר "רצה להגיע" לאזור זה.
* **הערכת "עוצמת התחנה":** לא כל LVN הוא בעל חשיבות זהה. "עוצמת התחנה" תוערך סטטיסטית על בסיס התנהגות היסטורית של המחיר באותו LVN. גורמים להערכה יכולים לכלול: האם ה-LVN שימש בעבר כרמת תמיכה או התנגדות חזקה, מספר הפעמים שהרמה נבדקה, ונפח המסחר שהתקיים ברמה זו בבדיקות קודמות. תחנת LVN שזוהתה כ"חזקה" יותר, בשילוב עם "צורה הרמונית" איכותית, עשויה להצדיק כניסה עם פוזיציה גדולה יותר.
* **למידת הסוכן:** מערכת ה-MARL תצטרך ללמוד להעריך את עוצמתן של תחנות LVN אלו ולשלב מידע זה בתהליך קבלת ההחלטות שלה.

השילוב של אינדיקטורים מרובים, ניתוח טווחי זמן שונים, פרשנות גיאומטרית של אותות, וניתוח פרופיל שוק יוצר אסטרטגיה מורכבת ועשירה. הצלחתה תלויה לא רק באיכות כל רכיב בנפרד, אלא באופן קריטי באינטראקציה ובתיזמון ביניהם ליצירת אותות כניסה בעלי משמעות סטטיסטית. הגדרת "צורות הרמוניות טובות" ו"תחנות LVN חזקות" על בסיס נתונים היסטוריים נושאת סיכון אינהרנטי של התאמת יתר, ולכן תידרש הקפדה יתרה על מנגנוני ולידציה ובדיקות לאחור. יתר על כן, השימוש בטווחי זמן שונים (30 דקות ו-5 דקות) והצורך לסנכרן ביניהם ליצירת הצורה ההרמונית (המצוירת על גרף 5 דקות) מחייבים טיפול מדויק בנתונים ועלולים להכניס עיכובים (lags) שיש לקחת בחשבון באופן שבו הצורה מוגדרת ומפורשת.

#### **טבלה 1: הגדרת אינדיקטורים ולוגיקת אותות**

| **שם אינדיקטור** | **מסגרת זמן** | **פרמטרים מרכזיים (דוגמאות)** | **תיאור האות** | **תפקיד בסינרגיה/צורה הרמונית** | **מקורות מידע רלוונטיים** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **MLMI (Machine Learning Momentum Index)** | 30 דקות | Prediction Data (k) (ברירת מחדל), Trend length (ברירת מחדל) | חציית קו חיזוי MLMI עם ה-WMA שלו | אות ראשוני/מאשר; קודקוד במשולש ההרמוני |  |
| **NW-RQK (Nadaraya-Watson Rational Quadratic Kernel Regression)** | 30 דקות | Bandwidth (ברירת מחדל), Relative Weighting Parameter (Alpha) (ברירת מחדל) | עקומת הרגרסיה משנה כיוון (הופכת שורית/דובית) | אות ראשוני/מאשר; קודקוד במשולש ההרמוני |  |
| **FVG (Fair Value Gap) - LuxAlgo** | 5 דקות | Threshold % | מיטיגציה של FVG (חזרה של המחיר לפער) | אות מאשר; קודקוד במשולש ההרמוני |  |
| **LVN (Low Volume Nodes) מפרופיל שוק** | 30 דקות | הגדרות סף לזיהוי LVN (יחסית ל-POC או נפח ממוצע), פרמטרים לכימות "עוצמת תחנה" (למשל, מספר נגיעות היסטוריות, נפח בבדיקות) | הגעה של המחיר ל-LVN שזוהה | מספק הקשר לעוצמת הכניסה הפוטנציאלית, משפיע על גודל פוזיציה |  |

טבלה זו מרכזת את המידע הבסיסי על אבני הבניין של האסטרטגיה, ומשמשת נקודת ייחוס להמשך הדיון על הנדסת מאפיינים, בניית מצב הסוכן והגדרת המדיניות. היא מסייעת להבטיח הבנה משותפת וברורה של כל רכיב אסטרטגי, החיונית לתכנון נכון של הנדסת המאפיינים ומרחב המצב של סוכני ה-RL.

### **1.2. דרישות נתונים ומקורות**

בחירת הנתונים הנכונים והבטחת איכותם היא שלב קריטי בפיתוח כל מערכת מסחר אלגוריתמית, ובמיוחד במערכת מורכבת כזו.

#### **1.2.1. נתוני OHLCV של חוזים עתידיים (30 דקות, 5 דקות)**

בהתאם להעדפת המשתמש, המערכת תתבסס על נתוני ברים (Open, High, Low, Close, Volume - OHLCV) ולא על נתוני ספר פקודות (Level 2). ההחלטה נובעת מהחשש שנתוני רמה 2 מכניסים "רעש" רב מדי וסיבוכיות מיותרת, שעלולים להקשות על תהליך הלמידה של סוכני ה-MARL. המיקוד עובר לנתוני ברים בטווחי זמן הבאים:

* **גרף 30 דקות:** ישמש לחישוב אינדיקטורי ה-MLMI וה-NW-RQK, וכן לניתוח פרופיל השוק וזיהוי LVNs.
* **גרף 5 דקות:** ישמש לזיהוי מיטיגציה של FVG ולציור וניתוח של ה"צורות ההרמוניות" (המשולשים).

מעבר זה מפשט את שלב עיבוד הנתונים הראשוני, אך מעביר את הדגש לאיכות וליכולת המיצוי של האינדיקטורים ושל מנוע זיהוי המשטרים מתוך נתונים אגרגטיביים יותר. למרות הוויתור על נתוני רמה 2, איכות נתוני הברים עצמם (דיוק, שלמות, סנכרון) נשארת בעלת חשיבות עליונה. נתונים חסרים, שגויים או לא מסונכרנים עלולים להוביל לחישוב שגוי של האינדיקטורים, ובכך לפגוע ביסודות האסטרטגיה.

#### **1.2.2. ספקי נתונים מומלצים ושיקולי API**

עבור נתוני חוזים עתידיים היסטוריים ובזמן אמת, קיימים מספר ספקים בעלי מוניטין המספקים ממשקי API (Application Programming Interfaces) למפתחים. הבחירה בספק תלויה בגורמים כמו כיסוי שווקים, איכות הנתונים, גמישות ה-API, ותמחור.

* **Databento :** ספק זה מציע נתוני OHLCV ברזולוציות שונות, כולל 1 דקה ושעתי, עם אפשרות להתאמה אישית של הרזולוציה. הוא תומך במגוון רחב של חוזים עתידיים מבורסות מרכזיות כגון CME ו-ICE. תכונה חשובה היא "Smart symbology" המטפלת באופן מובנה בגלגול חוזים (contract rollover). Databento מספק חותמות זמן ברמת ננו-שנייה, המעידה על איכות ודיוק גבוהים.
* **dxFeed :** ספק זה מספק נתונים מבורסות CME, ICE, Eurex ועוד. הוא מציע נתוני Level 1 ועומק מלא (אם כי המערכת הנוכחית לא תשתמש בעומק מלא), וכן נתונים היסטוריים ובזמן אמת. dxFeed תומך במגוון שפות תכנות, כולל פייתון, ומאפשר קבלת נתוני OHLCV ברזולוציות שונות.

בעת בחירת ספק ו-API, יש לוודא כי ניתן לשלוף ביעילות נתוני OHLCV בטווחי הזמן הנדרשים (5 דקות ו-30 דקות). כמו כן, יש לבדוק את האפשרות לקבל נתונים הדרושים לחישוב פרופיל שוק (כגון נפח בכל רמת מחיר בתוך הבר, או לפחות נתוני נפח ברמת דקה אם פרופיל ה-30 דקות יחושב מהם). עלות הנתונים, במיוחד נתונים היסטוריים מפורטים, יכולה להוות שיקול משמעותי בתקציב הפרויקט.

#### **1.2.3. טיפול בחוזים מתגלגלים (Continuous Contracts)**

חוזים עתידיים הם בעלי תאריך פקיעה מוגדר. על מנת ליצור סדרת מחירים רציפה וארוכת טווח לצורך בדיקות לאחור ואימון מודלים, יש צורך להשתמש ב"חוזים מתגלגלים". תהליך זה כולל "תפירה" של סדרות מחירים מחוזים שונים בעלי מועדי פקיעה שונים. ספקים כמו Databento מציעים טיפול מובנה בחוזים מתגלגלים. אם הספק הנבחר אינו מציע זאת, יהיה צורך ליישם לוגיקת גלגול חוזים באופן עצמאי, למשל על בסיס נפח מסחר עובר בין חוזים או על בסיס תאריכים קבועים לפני הפקיעה.

אחד האתגרים המרכזיים במעבר לנתוני ברים הוא חישוב פרופיל שוק וזיהוי LVNs. פרופיל שוק קלאסי מציג את התפלגות נפח המסחר על פני רמות מחיר שונות בתוך תקופת זמן נתונה. נתוני OHLCV מסכמים את כל הפעילות בבר לארבעה ערכי מחיר ונפח כולל. כדי לבנות פרופיל שוק מפורט מנתוני ברים של 30 דקות, ייתכן שיהיה צורך להשתמש בנתונים גרנולריים יותר (למשל, נתוני דקה) ולבצע אגרגציה שלהם, או להשתמש בהערכות סטטיסטיות. ספריות פייתון כגון MarketProfile עשויות לסייע בכך, אך יש לבחון בקפידה את התאמתן ואת איכות הפרופיל הנוצר מנתוני ברים בלבד. איכות זיהוי ה-LVNs תלויה באופן ישיר באיכות פרופיל השוק שממנו הם נגזרים.

## **פרק 2: עיבוד נתונים ומודעות למשטר השוק**

לאחר איסוף הנתונים הגולמיים, השלב הבא הוא עיבודם והעשרתם במידע קונטקסטואלי על מצב השוק. פרק זה מתאר את בניית צנרת הנתונים, הנדסת המאפיינים הנגזרים מהאינדיקטורים ומהתצורות ההרמוניות, ואת מנוע זיהוי משטרי השוק המתקדם.

### **2.1. בניית צנרת הנתונים**

צנרת נתונים אמינה ויעילה היא חיונית. היא כוללת איסוף, ניקוי, ארגון, והנדסת מאפיינים מורכבת.

#### **2.1.1. איסוף, ניקוי וארגון של נתוני OHLCV ונתוני פרופיל שוק**

תהליך ה-ETL (Extract, Transform, Load) יתחיל בשליפת נתוני ה-OHLCV הגולמיים (5 דקות ו-30 דקות) מה-API של ספק הנתונים הנבחר. שלב הניקוי יכלול טיפול בערכים חסרים (למשל, באמצעות אינטרפולציה ליניארית או שיטות מתוחכמות יותר, תוך זהירות שלא להכניס הטיות), זיהוי וטיפול בחריגות (outliers), וסנכרון קפדני של חותמות הזמן בין טווחי הזמן השונים. הנתונים הנקיים יאוחסנו בפורמט המאפשר גישה מהירה ויעילה, כגון קבצי Parquet, HDF5, או מסד נתונים ייעודי לסדרות עתיות כמו QuestDB , התומך בשאילתות SQL מהירות על נתונים עתיים.

חישוב פרופיל השוק וזיהוי LVNs מנתוני ה-OHLCV של 30 דקות הוא שלב קריטי. כפי שצוין, אם נתוני ה-OHLCV של 30 דקות אינם מספקים רזולוציה מספקת לבניית פרופיל משמעותי, יש לשקול שימוש בנתוני OHLCV של דקה לצורך בניית פרופיל ה-30 דקות. ספריות פייתון כגון MarketProfile יכולות לסייע בחישוב הפרופיל. זיהוי LVNs ידרוש הגדרת סף (threshold) כמותי, למשל, רמות מחיר שנפח המסחר בהן נמוך מאחוז מסוים מהנפח ב-Point of Control (POC) או מהנפח הממוצע בפרופיל.

#### **2.1.2. הנדסת מאפיינים לאינדיקטורים (MLMI, NW-RQK, FVG, עוצמת LVN)**

לאחר קבלת נתוני ה-OHLCV הנקיים, יבוצע חישוב של האינדיקטורים השונים:

* **MLMI:** החישוב יכלול את השלבים הבאים: (א) חישוב RSI על נתוני סגירה של 30 דקות. (ב) חישוב שני ממוצעים נעים משוקללים (WMA) של ה-RSI (למשל, 5 תקופות למהיר ו-20 תקופות לאיטי). (ג) הפעלת אלגוריתם k-NN על פרמטרי המומנטום הללו (ייתכן שעל הפרשי ה-WMAs או ערכיהם המוחלטים) כדי לחזות את ערך ה-MLMI העתידי. הפלט יהיה קו החיזוי של MLMI וה-WMA של קו החיזוי עצמו. ניתן להשתמש בספריות כמו scikit-learn למימוש k-NN ובספריות אנליזה טכנית כמו TA-Lib או pandas-ta לחישוב RSI ו-WMA. עם זאת, מאחר ו-MLMI הוא אינדיקטור ייחודי, ייתכן שיידרש מימוש מותאם אישית של לוגיקת ה-k-NN בהקשר זה.
* **NW-RQK:** מימוש רגרסיית Nadaraya-Watson עם ליבת Rational Quadratic על נתוני סגירה של 30 דקות. בעוד שספריית scikit-learn מציעה RationalQuadratic kernel בהקשר של Gaussian Processes , ייתכן שיהיה צורך במימוש ספציפי יותר עבור רגרסיית ליבה פשוטה, או התאמה של קוד קיים (למשל, תרגום לוגיקה מ-PineScript של TradingView ). הפלט יהיה עקומת הרגרסיה החזויה.
* **FVG:** זיהוי תבנית שלושת הברים המגדירה FVG על נתוני 5 דקות: עבור FVG שורי, השפל הנוכחי גבוה מהגבוה של הנר שלפני הקודם (low > high(t-2)), והסגירה הקודמת גם היא גבוהה מאותו גבוה (close(t-1) > high(t-2)). עבור FVG דובי, הגבוה הנוכחי נמוך מהשפל של הנר שלפני הקודם (high < low(t-2)), והסגירה הקודמת גם היא נמוכה מאותו שפל (close(t-1) < low(t-2)). יש לחשב את גובה הפער ולבדוק אם הוא עובר סף מסוים. לאחר מכן, יש לעקוב אחר מיטיגציה של הפער (חזרת המחיר לגבול הפער). ספריות פייתון כמו smartmoneyconcepts מציעות מימוש FVG.
* **עוצמת LVN:** לאחר זיהוי LVNs מפרופיל השוק של 30 דקות, יש לכמת את "עוצמת התחנה". זהו מאפיין מורכב הדורש ניתוח היסטורי של התנהגות המחיר סביב כל LVN שזוהה. מאפיינים אפשריים לכימות העוצמה יכולים לכלול:
  + מספר הפעמים שה-LVN נבדק כתמיכה או התנגדות בעבר.
  + הנפח המצטבר שנסחר ב-LVN במהלך בדיקות קודמות.
  + משך הזמן הממוצע שהמחיר שהה באזור ה-LVN לפני היפוך או המשך מגמה.
  + המרחק הממוצע של תנועת המחיר לאחר בדיקת ה-LVN. כימות זה חיוני להחלטה על גודל הפוזיציה.

#### **2.1.3. מיצוי מאפיינים גיאומטריים מתצורות הרמוניות (זוויות, יחסי צלעות)**

כאשר שלושת האותות (MLMI, NW-RQK, FVG mitigation) מתקבלים ונוצרת "סינרגיה" (אחת מארבע האפשרויות), יש לזהות את שלושת "קודקודי" המשולש על גרף המחירים של 5 דקות. הקודקודים ייקבעו על פי נקודות הזמן והמחיר שבהן כל אות התקבל. לדוגמה, אם אות ה-MLMI (מגרף 30 דקות) התקבל בנר מסוים, נקודת המחיר והזמן של אותו נר (או הנר המקביל בגרף 5 דקות) יהוו קודקוד אחד.

מהקואורדינטות של שלושת הקודקודים ניתן לחשב מאפיינים גיאומטריים כמותיים, כגון:

* אורכי שלוש הצלעות של המשולש.
* שלוש הזוויות הפנימיות של המשולש.
* יחסים בין אורכי הצלעות (למשל, האם המשולש קרוב להיות שווה-צלעות, שווה-שוקיים וכו').
* שטח המשולש.
* אולי פרמטרים נוספים המגדירים את "צורת" המשולש או את כיוונו (למשל, שיפוע הצלעות).

מאפיינים אלו (למשל, וקטור של אורכים וזוויות, מנורמלים במידת הצורך כדי לאפשר השוואה בין מופעים שונים) יהוו חלק ממצב הסוכן וישמשו אותו להערכת איכות הכניסה ולקביעת ניהול הסיכונים. הנדסת מאפיינים זו היא מרכיב ייחודי באסטרטגיה המוצעת, והצלחתה תלויה ביכולת להגדיר ולחלץ מאפיינים גיאומטריים בעלי כוח חיזוי סטטיסטי. ייתכן שיידרש מחקר אמפירי כדי לקבוע אילו מאפיינים גיאומטריים הם הרלוונטיים ביותר.

צריך לזכור שהגדרת "צורות הרמוניות טובות" ו"עוצמת LVN" באופן כמותי, חילוצם מהנתונים ובדיקת הרלוונטיות הסטטיסטית שלהם, הם אתגרים משמעותיים. לדוגמה, כיצד מנרמלים את מאפייני המשולש כך שיהיו ברי-השוואה בין מופעים שונים? כיצד מגדירים "בדיקה" של LVN באופן אלגוריתמי? שאלות אלו דורשות מחקר ופיתוח. בנוסף, חלק מהמאפיינים המהונדסים (למשל, מומנטום מ-MLMI ומגמה מ-NW-RQK) עלולים להיות תלויים זה בזה. יש לבחון את מידת התלותיות ולהתחשב בה בבניית מודל ה-RL, כדי למנוע מצב שבו מידע כפול מטעה את המודל או לא מוסיף ערך.

### **2.2. זיהוי משטרי שוק מתקדם**

מודעות למשטר השוק הנוכחי היא קריטית להתאמת אסטרטגיות מסחר. המערכת המוצעת תשתמש בגישה מתקדמת לזיהוי משטרים.

#### **2.2.1. בחירה ונימוק: Higher-Rank MMD (Horvath & Issa) לנתונים תלויי-נתיב**

הבחירה במדד Higher-Rank Maximum Mean Discrepancy (MMD) לזיהוי משטרי שוק נובעת מהתאמתו לניתוח סדרות עתיות פיננסיות, המאופיינות לרוב בתלות-נתיב (path-dependency) ובאי-מרקוביות. בניגוד לשיטות מסורתיות שעשויות להתעלם מסדר האירועים, MMD בשילוב עם חתימות נתיבים (signature MMD) מסוגל ללכוד מידע על סדר התצפיות ועל התלות ביניהן לאורך זמן.

העיקרון הבסיסי הוא השוואת התפלגות נתוני השוק (למשל, תשואות, תנודתיות, או מאפיינים אחרים הנגזרים מנתוני ה-OHLCV) בחלון זמן נוכחי להתפלגותם בחלון זמן היסטורי המשמש כנקודת ייחוס. שינוי מובהק סטטיסטית בהתפלגות, כפי שנמדד על ידי ה-MMD, מצביע על מעבר למשטר שוק חדש. היתרון של "Higher-Rank" MMD טמון ביכולתו לשלב מידע פילטרציה, כלומר, לקחת בחשבון את התפתחות המידע לאורך זמן ולא רק התפלגויות סטטיות בנקודות זמן נפרדות.

בעוד שקיימות שיטות נוספות לזיהוי משטרים, כגון מודלים של מרקוב חבויים (HMM) או מודלי תערובת גאוסיאנית (GMM) , גישת ה-MMD מבוססת החתימות מציעה יתרונות בהיותה לא-פרמטרית ורגישה למבנה הסדרתי המורכב של נתונים פיננסיים.

#### **2.2.2. פרטי מימוש: שימוש ב-issaz/signature-regime-detection, higherOrderKME**

לצורך המימוש המעשי, ניתן להתבסס על מאגר הקוד הפתוח issaz/signature-regime-detection. מאגר זה מכיל קוד פייתון ליישום sig-MMD לזיהוי משטרים באופן מקוון (online), וכולל מחברות Jupyter עם דוגמאות רלוונטיות. חבילת הפייתון higherOrderKME נדרשת לביצוע חישובי ה-signature kernel MMD.

תהליך המימוש יכלול מספר שלבים:

1. **הגדרת חלונות:** קביעת אורך חלון הנתונים ההיסטורי (חלון הרפרנס) ואורך חלון הנתונים הנוכחי שיושווה אליו.
2. **בחירת מאפיינים:** החלטה אילו מאפיינים של נתוני השוק (למשל, תשואות לוגריתמיות של מחירי הסגירה, תנודתיות מחושבת על פני חלון מסוים) ישמשו כקלט למנוע ה-MMD.
3. **חישוב חתימות:** חישוב חתימות הנתיבים (path signatures) עבור סדרות המאפיינים בחלון הרפרנס ובחלון הנוכחי.
4. **חישוב MMD:** חישוב ערך ה-MMD בין התפלגויות החתימות של שני החלונות.
5. **קביעת סף:** הגדרת סף סטטיסטי. אם ערך ה-MMD חוצה סף זה, יוכרז על שינוי משטר.
6. **תדירות עדכון:** קביעת התדירות שבה יבוצע החישוב מחדש (למשל, כל נר חדש של 30 דקות).

עלות חישובית היא שיקול חשוב. חישוב חתימות נתיבים, במיוחד מסדר גבוה, יכול להיות תובעני מבחינה חישובית. יש לבחון את יעילות המימוש בזמן אמת, כדי להבטיח שהמידע על שינוי משטר יהיה זמין לסוכנים באופן עדכני. כמו כן, בחירת פרמטרי ה-MMD (סוג הגרעין, פרמטרי הגרעין, רמת קיטוע החתימה, גודלי החלונות) היא קריטית ותשפיע על רגישות ויציבות המנוע. ייתכן שיידרש תהליך כיול משמעותי כדי למצוא את האיזון הנכון בין זיהוי מהיר של שינויים אמיתיים לבין הימנעות מאזעקות שווא.

#### **2.2.3. שילוב פלט זיהוי המשטרים במצב הסוכן**

הפלט ממנוע ה-MMD יכול להיות ערך רציף (מדד המרחק בין ההתפלגויות) או תווית קטגוריאלית המציינת את משטר השוק הנוכחי (למשל, "משטר 1", "משטר 2", או תיאור איכותי יותר אם ניתן לגזור אותו). פרמטר זה, או מאפיינים נוספים הנגזרים ממנו (כגון רמת תנודתיות צפויה במשטר הנוכחי, או עוצמת מגמה משוערת), ישולב כמאפיין נוסף בקלט של כל סוכן MARL. השילוב יתבצע לפני שלב החלוקה האקראית של הנתונים למטריצות Mi​. בדרך זו, כל סוכן, למרות שהוא מקבל רק מקטע חלקי של נתוני השוק, יהיה מודע להקשר המאקרו-כלכלי הרחב יותר שמספק מנוע זיהוי המשטרים.

חשוב לציין שבעוד ש-MMD יכול לזהות *ש*התפלגות השתנתה, הוא לא בהכרח מסביר *איך* היא השתנתה או מהי המשמעות הכלכלית של המשטר החדש. אם נדרשת פרשנות עמוקה יותר של המשטרים (למשל, "שוק שורי תנודתי" לעומת "שוק דובי במגמת ירידה מתונה"), ייתכן שיידרש ניתוח נוסף של מאפייני ההתפלגות לאחר זיהוי השינוי, או שילוב של שיטות זיהוי משטרים נוספות.

#### **טבלה 2: תצורת מנוע זיהוי משטרים (MMD)**

| **פרמטר מנוע MMD** | **ערך נבחר / טווח ערכים** | **נימוק לבחירה / השפעה על המערכת** | **מקורות רלוונטיים** |
| --- | --- | --- | --- |
| **סוג גרעין ל-MMD (על מרחב החתימות)** | למשל, Gaussian Kernel | בחירה נפוצה, גמיש. יש לבחון התאמה לחתימות. |  |
| **פרמטרי הגרעין (למשל, רוחב פס σ)** | ייקבע באמצעות כיול (למשל, cross-validation) | משפיע על רגישות המדד להבדלים בין התפלגויות. |  |
| **רמת קיטוע החתימה (M)** | למשל, 2 או 3 (ערכים נמוכים יותר לחישוב מהיר יותר) | קובע את עומק לכידת התלות הסדרתית. M גבוה יותר לוכד יותר מידע אך מגדיל מורכבות חישובית. |  |
| **גודל חלון היסטורי (רפרנס)** | למשל, 60-120 נרות של 30 דקות (30-60 ימי מסחר) | צריך להיות ארוך מספיק לייצג משטר יציב, אך לא ארוך מדי כדי לא לכלול משטרים ישנים מדי. |  |
| **גודל חלון נוכחי (לבדיקה)** | למשל, 20-30 נרות של 30 דקות (10-15 ימי מסחר) | צריך להיות רגיש מספיק לשינויים, אך לא קצר מדי כדי למנוע רעש. |  |
| **סף סטטיסטי לזיהוי שינוי (p-value או ערך MMD)** | ייקבע אמפירית או באמצעות מבחני מובהקות | קובע את רמת הביטחון הנדרשת להכרזה על שינוי משטר. סף נמוך מדי -> אזעקות שווא. סף גבוה מדי -> פספוס שינויים. |  |
| **תדירות עדכון חישוב MMD** | כל נר חדש של 30 דקות | מאזן בין עדכניות המידע לעלות החישובית. |  |
| **מאפייני קלט ל-MMD** | תשואות לוגריתמיות, תנודתיות מחושבת | בחירת מאפיינים המשקפים היטב את דינמיקת השוק. |  |

טבלה זו מפרטת את ההחלטות התכנוניות המרכזיות הקשורות למנוע זיהוי המשטרים. היא חיונית להבנת אופן פעולתו, לשחזור התוצאות ולכיול עתידי. אם המנוע אינו מתפקד כמצופה (למשל, מזהה שינויי משטר בתדירות גבוהה מדי), עיון בטבלה זו עשוי לסייע באיתור מקור הבעיה.

## **פרק 3: תכנון מערכת למידת חיזוק מרובת סוכנים (MARL)**

תכנון מערכת ה-MARL עומד בלב הפרויקט. הוא כולל את בחירת ארכיטקטורת הסוכנים, הגדרת מרחבי המצב והפעולה, עיצוב המדיניות המשותפת, הבטחת שיתוף פעולה, והנדסת פונקציית התגמול. כל זאת, תוך התבססות על העדפות המשתמש ומינוף ספריות קיימות.

### **3.1. ארכיטקטורת MARL: אימון מרכזי עם ביצוע מבוזר (CTDE)**

#### **3.1.1. הרציונל ל-CTDE במסחר שיתופי**

בהינתן הדרישה ל"שיתוף פעולה מושלם" בין הסוכנים ולמדיניות מסחר משותפת, פרדיגמת אימון מרכזי עם ביצוע מבוזר (Centralized Training with Decentralized Execution - CTDE) היא המתאימה ביותר. בפרדיגמה זו, במהלך שלב האימון, ניתן לנצל מידע גלובלי – כגון מצבים ופעולות של כל הסוכנים, או פונקציית תגמול גלובלית – כדי לאמן את מדיניות הסוכנים או פונקציית ערך מרכזית (critic). במהלך שלב הביצוע (מסחר חי או בדיקות לאחור), כל סוכן פועל באופן מבוזר על סמך התצפית המקומית שלו (מטריצת הנתונים Mi​ ופרמטרי המשטר) והמדיניות המשותפת שנלמדה. מטרת המערכת היא אופטימיזציה של התוצאה הגלובלית של אסטרטגיית המסחר הכוללת, ולא של ביצועי סוכן בודד.

#### **3.1.2. התמחות סוכנים באמצעות תפיסה (מטריצות נתונים ייחודיות Mi​)**

חשוב להדגיש, כפי שציין המשתמש , שה"התמחות" של הסוכנים במערכת המוצעת אינה נובעת ממדיניות שונה או מתפקידים שונים המוקצים להם. כל הסוכנים חולקים ומבצעים את אותה מדיניות מסחר. ההתמחות נובעת אך ורק מהעובדה שכל סוכן מקבל תצפית ייחודית (Mi​) על סביבת השוק. לפיכך, ההתמחות היא ברמת התפיסה (perception) ולא ברמת קבלת ההחלטות הלוגית. כל סוכן מיישם את אותה לוגיקה אסטרטגית, אך על בסיס מידע חלקי ושונה, בדומה לצוות אנליסטים המשתמשים באותה מתודולוגיית ניתוח אך כל אחד בוחן סט נתונים אחר כדי להגיע לתובנה קולקטיבית.

האתגר המרכזי ב-CTDE, גם כאשר התגמול הוא גלובלי, נותר בעיית הקצאת האשראי (credit assignment): כיצד לקבוע את תרומתו של כל סוכן בודד להצלחה או לכישלון הכולל, במיוחד כאשר הסוכנים מקבלים תשומות שונות מאוד? אם המערכת כולה הפסידה, אך סוכן מסוים קיבל קלט Mi​ שהצביע בבירור על הזדמנות רווח והוא פעל נכון לפי המדיניות המשותפת על סמך הקלט שלו, כיצד המערכת "יודעת" לא "להעניש" אותו יתר על המידה? שאלת סוג המידע הגלובלי שישמש באימון (האם רק תגמול גלובלי, או גם תצפיות ופעולות של סוכנים אחרים?) היא גם כן קריטית. ככל שיש יותר מידע גלובלי זמין ל-critic המרכזי, כך האימון יכול להיות יעיל יותר, אך גם מורכב יותר חישובית.

### **3.2. מרחב המצב והתצפית של הסוכנים**

כל סוכן i במערכת ה-MARL יקבל כקלט את מטריצת הנתונים הייחודית לו, Mi​, יחד עם פרמטרי משטר השוק הגלובליים שזוהו על ידי מנוע ה-MMD. המצב si​ עבור סוכן i יהיה פונקציה של שני מקורות מידע אלו.

#### **3.2.1. בניית מטריצות קלט (Mi​) מנתונים מחולקים, מודעי-משטר ועשירים באינדיקטורים**

הרעיון המקורי היה "להפריד באופן אקראי את הנתונים ולסדר אותם למטריצות (Ma​,Mb​,...,Mn​), כאשר כל מטריצה מייצגת מקטעים קטנים יותר של הנתונים, וכל סוכן RL יופנה לכל מטריצה". יש להבהיר את אופי החלוקה. האם מדובר בדגימה אקראית של רשומות נתונים? האם בחלוקה אקראית של מקטעים זמניים? או שמא בחלוקה אקראית של תת-קבוצות של מאפיינים? ההנחיה המקורית מציינת "מקטעים קטנים יותר של הנתונים".

בהתאם לעדכון המשתמש , נתוני רמה 2 לא ישמשו ישירות. במקום זאת, כל מטריצה Mi​ תכיל:

1. נתוני OHLCV רלוונטיים (5 דקות ו-30 דקות) מהמקטע שהוקצה לסוכן.
2. ערכי האינדיקטורים (MLMI, NW-RQK, FVG) המחושבים על בסיס נתונים אלו עבור המקטע.
3. מאפיינים כמותיים מפרופיל השוק (למשל, קרבה ל-LVN, "עוצמת תחנת LVN" קרובה).
4. מאפיינים גיאומטריים של ה"צורה ההרמונית" האחרונה שזוהתה (זוויות, יחסי צלעות), אם רלוונטי למקטע הנתונים של הסוכן.

חשוב לוודא שכל מטריצה Mi​ עדיין מכילה מידע משמעותי מספיק כדי לאפשר לסוכן לפעול באופן מושכל. חלוקה מוגזמת או יצירת מקטעים דלי-הקשר עלולה לפגוע ביכולת הלמידה. בנוסף למטריצה Mi​, כל סוכן יקבל את פרמטרי המשטר הגלובליים ממנוע ה-MMD, המספקים הקשר מאקרו-כלכלי.

המשתמש הביע עניין באפשרות של חלוקת נתונים דינמית או נלמדת, במקום חלוקה אקראית קבועה. גישה כזו יכולה פוטנציאלית להתאים את הקלט של כל סוכן לתנאי השוק המשתנים או להתמחות הנלמדת של הסוכן, אך היא מוסיפה רמת מורכבות נוספת למערכת. אם החלוקה היא אקראית, יש לשקול היטב כיצד להבטיח שחלוקה זו לא תיצור "עיוורון" אצל חלק מהסוכנים להיבטים קריטיים של השוק המופיעים רק בחלקים אחרים של הנתונים. אם, למשל, אות FVG קריטי מופיע רק במקטע נתונים שסוכן מסוים אינו מקבל, והמדיניות המשותפת מסתמכת על אות זה, אותו סוכן לא יוכל לפעול כראוי.

#### **3.2.2. שילוב מאפייני תצורות הרמוניות ועוצמת LVN**

כפי שתואר בסעיף 2.1.3, מאפיינים כמותיים של המשולשים ההרמוניים (כגון אורכי צלעות, זוויות פנימיות, יחסים ביניהם) יהוו חלק מהותי מהתצפית Mi​ של כל סוכן. באופן דומה, מאפיינים המכמתים את "עוצמת תחנת LVN" (כגון מספר בדיקות היסטוריות של ה-LVN כתמיכה/התנגדות, הנפח שנסחר ב-LVN בבדיקות קודמות, ומשך הזמן שהמחיר שהה ב-LVN) ישולבו גם הם בתצפית. מאפיינים אלו, שאינם סטנדרטיים, דורשים הנדסת מאפיינים קפדנית ובדיקה של הרלוונטיות הסטטיסטית שלהם.

#### **3.2.3. שימוש בטכניקות הטבעה (Embedding) לייצוג Mi​**

המשתמש הביע עניין רב בשימוש ברשתות נוירונים (כגון רשתות קונבולוציה - CNN, או רשתות רקורנטיות - RNN) כדי ללמוד ייצוג דחוס (embedding) ואינפורמטיבי של מטריצת הקלט Mi​. גישה זו יכולה להיות יעילה במיוחד אם Mi​ היא בעלת ממדיות גבוהה, מכילה סוגי נתונים הטרוגניים (למשל, ערכי אינדיקטורים, מאפיינים גיאומטריים, פרמטרי משטר), או אם יש מבנה מרחבי או זמני מורכב בתוך Mi​ שרשת ההטבעה יכולה ללכוד. רשת ההטבעה יכולה להפוך את הקלט הגולמי לייצוג וקטורי בעל גודל קבוע, המתאים יותר כקלט לרשת המדיניות של סוכן ה-RL.

עם זאת, השימוש בהטבעות מוסיף רכיב נוסף של "קופסה שחורה" למערכת ודורש אימון נוסף. יש להחליט כיצד לאמן את רשת ההטבעה: האם היא תאומן כחלק מתהליך האימון הכולל של סוכן ה-RL (end-to-end), או בשלב מקדים נפרד? אימון end-to-end עשוי להוביל לייצוגים המותאמים ביותר למשימת ה-RL, אך עלול להיות קשה יותר לאימון. אם ההטבעה אינה נלמדת כראוי, היא עלולה לפגוע בביצועי הסוכן. הרעיון של MARC (ייצוג מבוסס-גרף) יכול להוות השראה ליצירת ייצוג מובנה ומופשט מהתצפית הגולמית, אם כי ייתכן שהוא פחות רלוונטי ישירות לנתונים הפיננסיים המוגדרים כאן, המבוססים יותר על סדרות עתיות ומאפיינים נגזרים.

### **3.3. מדיניות משותפת ומרחב הפעולות**

כל סוכני ה-MARL יחלקו מדיניות משותפת (π), שתקבע את פעולותיהם בהינתן התצפית המקומית שלהם.

#### **3.3.1. ייצוג ארבע הסינרגיות במדיניות מאוחדת**

כפי שהובהר על ידי המשתמש , הסוכן אינו "בוחר" איזו מארבע הסינרגיות להפעיל. השוק, באמצעות צירוף האותות משלושת האינדיקטורים (MLMI, NW-RQK, FVG mitigation), הוא זה שקובע איזו סינרגיה (המוגדרת על ידי סדר הופעת האותות) מתממשת. המדיניות המשותפת של סוכני ה-RL צריכה ללמוד כיצד לפעול בצורה אופטימלית (מבחינת כניסה לעסקה, גודל פוזיציה, וניהול סיכונים) *בהינתן* שהתממשה סינרגיה מסוימת.

לפיכך, במקום שהמדיניות תבחר אחת מארבע תת-מדיניויות, היא תפיק פעולה ישירה המותנית על מרחב המצב הכולל של הסוכן. מרחב מצב זה יכלול מאפיינים המשקפים את התממשות הסינרגיה הספציפית, את מאפייני ה"צורה ההרמונית" (המשולש) שנוצרה, את "עוצמת תחנת ה-LVN" הרלוונטית, ואת משטר השוק הנוכחי. המדיניות תלמד למפות מצבים אלו לפעולות מסחר מתאימות.

#### **3.3.2. מרחב פעולות היברידי: סוג פקודה, כיוון, גודל, מחיר**

מרחב הפעולות של הסוכנים צריך לשקף את הפעולות האפשריות במסחר בחוזים עתידיים ולאפשר ביטוי מלא של האסטרטגיה. מרחב זה יהיה היברידי, כלומר ישלב רכיבים בדידים ורכיבים רציפים:

* **סוג הפקודה (בדיד):** בחירה בין פקודת שוק (Market Order) לבין פקודת גבול (Limit Order).
* **כיוון הפוזיציה (בדיד):** כניסה לפוזיציית לונג, כניסה לפוזיציית שורט, סגירת פוזיציה קיימת, או החזקה (ללא שינוי).
* **גודל הפוזיציה/הפקודה (רציף או בדיד עם רמות מוגדרות):** מספר החוזים לקנייה/מכירה. רכיב זה צריך להיות דינמי ולהיות מושפע, בין היתר, מהערכת "עוצמת תחנת ה-LVN" ו"איכות הצורה ההרמונית", כפי שדורש המשתמש.
* **מחיר פקודת גבול (רציף):** אם נבחרה פקודת גבול, יש לקבוע את רמת המחיר שבה תוצב הפקודה. מחיר זה יכול להיות מוגדר באופן יחסי למחיר השוק הנוכחי, לרמות LVN קרובות, או לרמות מפתח אחרות.
* **פעולות נוספות (בדיד):** ביטול או שינוי של פקודות קיימות.

אימון סוכנים במרחב פעולה היברידי הוא מאתגר יותר מאשר במרחבים בדידים או רציפים טהורים. אלגוריתמים מודרניים של RL, כגון PPO (Proximal Policy Optimization) ו-SAC (Soft Actor-Critic), יכולים להתמודד עם מרחבי פעולה היברידיים, לעיתים באמצעות שימוש ב"ראשים" (output heads) נפרדים ברשת המדיניות עבור כל רכיב פעולה, או באמצעות טכניקות פרמטריזציה של הפעולות.

הקשר בין מאפייני ה"צורה ההרמונית" ועוצמת ה-LVN לבין הפעולה הספציפית (במיוחד גודל הפוזיציה) הוא היבט מרכזי. אם המדיניות צריכה ללמוד קשר מורכב זה ישירות, הדבר דורש יכולת למידה גבוהה מאוד מרשת המדיניות. אפשרות אחרת היא שהמדיניות תקבע את כיוון העסקה וסוג הפקודה, בעוד שכללים דטרמיניסטיים יותר (אולי נלמדים בנפרד או מוגדרים מראש) יקבעו את גודל הפוזיציה על סמך מאפייני הצורה וה-LVN. עם זאת, המשתמש רומז שהסוכן אמור ללמוד זאת.

#### **3.3.3. הבטחת "שיתוף פעולה מושלם" דרך עיצוב מדיניות ותגמול**

כפי שצוין ב-, "שיתוף פעולה מושלם" בין הסוכנים, כאשר כולם חולקים את אותה מדיניות אך פועלים על סמך תצפיות חלקיות ושונות, הוא אתגר מרכזי. המטרה היא להבטיח שסך הפעולות של כל הסוכנים יהיה קוהרנטי ויתרום למטרה המשותפת.

* **מדיניות משותפת ותגמול גלובלי:** הדרך הישירה ביותר להשגת תיאום היא באמצעות אימון המדיניות המשותפת עם פונקציית תגמול גלובלית (שתפורט בסעיף 3.4). ההנחה היא שהסוכנים ילמדו באופן אימפליציטי לתאם את פעולותיהם כדי למקסם את התגמול המשותף.
* **מנגנוני תקשורת (אופציונלי):** אם תיאום אימפליциטי אינו מספיק, ניתן לשקול הוספת ערוצי תקשורת בין הסוכנים, שיאפשרו להם לשתף מידע רלוונטי מהתצפיות המקומיות שלהם או כוונות פעולה. ספריות כמו CommNet ו-IC3Net מספקות מנגנונים כאלה.
* **פרוטוקולי החלטה קולקטיביים (אופציונלי):** ניתן להשתמש בפרוטוקולי הצבעה או אופטימיזציה מבוססת תועלת כדי לגבש החלטה קולקטיבית, אם כי זה עשוי לסתור את רעיון הביצוע המבוזר המלא.

האתגר המרכזי הוא להבטיח שהמדיניות המשותפת, כאשר היא מיושמת על מקטעי נתונים שונים (Mi​), תוביל לפעולות שבמצטבר הן אופטימליות ולא סותרות. ייתכן שהמדיניות תצטרך להיות מותנית גם על רכיב מצב גלובלי נוסף (מעבר לפרמטרי המשטר), או שמבנה התגמול יצטרך להעניש בחריפות על חוסר תיאום שניתן לזהותו ברמה הגלובלית.

הרעיון של "אבולוציה של סינרגיות" , שבו המערכת לומדת או מפתחת סינרגיות חדשות באופן אוטונומי מעבר לארבע המוגדרות, הוא אתגר מתקדם מאוד. הוא ידרוש ככל הנראה טכניקות של גילוי אסטרטגיות (strategy discovery) או למידה מבוססת אוכלוסייה (population-based training), וסביר שיהיה מחוץ לטווח המימוש הראשוני של המערכת.

### **3.4. הנדסת פונקציית תגמול למסחר שיתופי**

פונקציית התגמול (R) היא קריטית בלמידת חיזוק, שכן היא מנחה את תהליך הלמידה של הסוכנים. במערכת MARL שיתופית עם מדיניות משותפת, פונקציית התגמול צריכה להיות גלובלית ולשקף את מטרות הצוות הכוללות.

#### **3.4.1. איזון בין רווח והפסד, תשואה מותאמת-סיכון וביצוע סינרגיות**

התמקדות בלעדית ברווח והפסד (P&L) קצר טווח עלולה להוביל להתאמת יתר וללמידת אסטרטגיות מסוכנות. לכן, פונקציית התגמול חייבת לשלב מספר רכיבים:

* **רווח והפסד של התיק (P&L):** זהו מדד ביצועים מרכזי, אך יש לאזנו עם רכיבי סיכון.
* **תשואה מותאמת-סיכון:** יש לשלב מדדים כמו יחס שארפ (Sharpe Ratio) או יחס סורטינו (Sortino Ratio), המחושבים על חלון מתגלגל. מדדים אלו מעודדים רווחיות תוך ניהול סיכונים.
* **ציון ביצוע סינרגיה:** יש לתגמל את המערכת על זיהוי וביצוע מוצלח של כל אחת מארבע הסינרגיות המוגדרות, כאשר תנאי השוק מתאימים. הדבר יבטיח שהסוכנים לומדים ליישם את כל רכיבי האסטרטגיה המשותפת. התגמול יכול להיות בינארי (בוצעה/לא בוצעה סינרגיה כראוי) או רציף (מבוסס על איכות ביצוע הסינרגיה).
* **עלויות עסקה:** יש להכליל עמלות עסקה, החלקה (slippage) צפויה, ועלויות החזקת פוזיציה, כדי להבטיח שהאסטרטגיה רווחית גם לאחר התחשבות בעלויות מסחר ריאליות.

#### **3.4.2. עונשים על משיכות גדולות וחוסר תיאום**

* **עונשים על סיכון:** יש להטיל עונשים (תגמול שלילי) על משיכות גדולות (maximum drawdown), על תנודתיות גבוהה של התיק, או על חריגה ממגבלות סיכון שהוגדרו מראש.
* **עונש על חוסר תיאום (אופציונלי):** אם ניתן לזהות מצבים שבהם פעולות הסוכנים, הנגזרות מאותה מדיניות אך מתצפיות שונות, הן סותרות ברמה הגלובלית ומזיקות לביצועי המערכת, ניתן לשקול הוספת רכיב עונש על כך. עם זאת, הגדרה אובייקטיבית של "חוסר תיאום" במצב כזה היא מאתגרת. ייתכן שבעיה זו תיפתר טוב יותר באמצעות עיצוב נכון של המדיניות ומרחב המצב.

#### **3.4.3. אסטרטגיות להקצאת אשראי (במידת הצורך)**

במערכת MARL שיתופית עם תגמול גלובלי, בעיית הקצאת האשראי (credit assignment) – כיצד לקבוע את תרומתו של כל סוכן בודד להצלחה או לכישלון הכולל – היא מורכבת. אם כל הסוכנים חולקים את אותה מדיניות, וההבדל ביניהם הוא רק בתצפית Mi​ שהם מקבלים, ייתכן שאין צורך בהקצאת אשראי מפורשת ברמת הסוכן הבודד, והפוקוס צריך להיות על איכות המדיניות המשותפת והתגמול הגלובלי.

עם זאת, אם יתברר שיש צורך בכך (למשל, אם סוכנים מסוימים מקבלים באופן עקבי "תצוגות" קשות יותר של השוק), ניתן לשקול שיטות כמו:

* **Value Decomposition Networks (VDN) ו-QMIX:** שיטות אלו מנסות לפרק את פונקציית הערך הגלובלית לסכום (או שילוב מונוטוני) של פונקציות ערך אינדיבידואליות, ובכך להעריך את תרומתו של כל סוכן. הן נפוצות ב-MARL מעשי.
* **Counterfactual Rewards:** הערכת תרומת סוכן על ידי השוואת התגמול שהתקבל עם התגמול שהיה מתקבל אילו הסוכן היה פועל אחרת.
* **Shapley Values:** שימוש בערכי שאפלי לחלוקת התגמול בין הסוכנים בהתאם לתרומתם השולית. עם זאת, חישוב ערכי שאפלי יכול להיות יקר מאוד חישובית עבור מספר רב של סוכנים.

המשתמש העלה שאלה לגבי תזמון הטמעת מנגנוני הקצאת אשראי, והאם זה צריך לבוא לאחר הטמעת רכיב הסופרפוזיציה. סביר להניח שטכניקות הקצאת אשראי, אם יידרשו, יהיו רלוונטיות יותר בשלבים מתקדמים של אופטימיזציית המערכת, לאחר שהמבנה הבסיסי של ה-MARL והסופרפוזיציה (אם תיושם ברמת הסוכן הבודד) כבר פועלים.

שיקול נוסף הוא כיצד לשלב בתגמול את הרעיון של המשתמש ש"צורות הרמוניות טובות" או "תחנות LVN חזקות" אמורות להוביל לתוצאות טובות יותר. האם זה צריך להיות רכיב ישיר בפונקציית התגמול (למשל, בונוס על רווח שהושג מכניסה "איכותית" יותר), או שמא זה אמור לבוא לידי ביטוי באופן עקיף דרך העובדה שכניסות כאלה, אם הן אכן טובות יותר, יובילו לרווח גבוה יותר או ליחס סיכון/סיכוי טוב יותר, ובכך יתוגמלו דרך הרכיבים האחרים של הפונקציה? נראה שהגישה השנייה עדיפה כדי לא לסבך יתר על המידה את פונקציית התגמול.

### **3.5. מסגרות MARL: Ray RLlib ו-PettingZoo**

מימוש מערכת MARL מורכבת כזו יסתמך במידה רבה על ספריות קיימות.

#### **3.5.1. עיצוב סביבה באמצעות PettingZoo**

PettingZoo מספקת API סטנדרטי וגמיש לפיתוח סביבות למידת חיזוק מרובות סוכנים, בדומה לתפקיד ש-Gymnasium ממלא עבור RL של סוכן יחיד. PettingZoo תומכת בסביבות עם פעולות סדרתיות של סוכנים (AEC - Agent Environment Cycle) וכן בסביבות עם פעולות סימולטניות (Parallel API).

יש לפתח סביבת מסחר מותאמת אישית שתעמוד בתקן של PettingZoo. סביבה זו תהיה אחראית על התהליכים הבאים:

1. **קליטת נתוני שוק מעובדים:** קבלת נתוני ה-OHLCV, ערכי האינדיקטורים המחושבים (MLMI, NW-RQK, FVG), מאפייני פרופיל השוק (LVN ועוצמתם), מאפייני הצורות ההרמוניות, ופלט מנוע זיהוי המשטרים (MMD).
2. **חלוקת נתונים למטריצות Mi​:** ביצוע החלוקה של הנתונים (אקראית, דינמית או נלמדת) למטריצות התצפית הייחודיות לכל סוכן.
3. **העברת תצפיות לסוכנים:** בכל צעד זמן, העברת התצפית המתאימה (מטריצה Mi​ ופרמטרי משטר גלובליים) לכל סוכן i.
4. **קבלת פעולות מהסוכנים:** איסוף הפעולות שנבחרו על ידי כל הסוכנים.
5. **ביצוע פעולות בסביבת המסחר המדומה:** סימולציה של ביצוע הפקודות בשוק החוזים העתידיים, כולל חישוב החלקות (slippage) ועמלות.
6. **חישוב והחזרת תגמולים:** חישוב התגמול הגלובלי על בסיס פונקציית התגמול המשותפת שהוגדרה, והחזרתו למערכת ה-RL.

פיתוח סביבה פיננסית מורכבת שכזו, העומדת בכל דרישות האסטרטגיה ומדמה את השוק באופן אמין, הוא משימה משמעותית הדורשת תכנון קפדני ותשומת לב לפרטים (כגון טיפול בחוזים עתידיים, חישוב עלויות עסקה מדויק, מידול החלקות ריאליסטי וכו'). ניתן להיעזר בדוגמאות קיימות, כמו סביבת המסחר CDA (Continuous Double Auction) ב-FinRL או בהנחיות של RLlib ליצירת סביבות מרובות סוכנים, אך סביר להניח שיידרש פיתוח ייעודי רב.

#### **3.5.2. בחירת אלגוריתם (למשל, MAPPO עבור CTDE עם מדיניות משותפת)**

Ray RLlib היא ספריית קוד פתוח חזקה וסקלאבילית ללמידת חיזוק, התומכת במגוון רחב של אלגוריתמים ומתאימה ליישומים מורכבים, כולל MARL ואימון מבוזר.

עבור ארכיטקטורת ה-CTDE עם מדיניות משותפת, אלגוריתם MAPPO (Multi-Agent Proximal Policy Optimization) הוא בחירה טבעית. MAPPO הוא הרחבה של אלגוריתם PPO הפופולרי לעולם מרובה הסוכנים, והוא מתאים במיוחד למשימות שיתופיות שבהן כל הסוכנים חולקים את אותה מדיניות ומאומנים באמצעות critic מרכזי המשתמש במידע גלובלי.

אלגוריתמים אחרים מבוססי פירוק ערך (Value Decomposition) כמו QMIX יכולים גם הם להתאים למשימות שיתופיות, אך MAPPO עם מדיניות משותפת נראה קרוב יותר לדרישות הספציפיות של המשתמש ולארכיטקטורה המתוארת.

בחירת ההיפר-פרמטרים של אלגוריתם ה-MARL (כגון MAPPO) היא קריטית לביצועים. פרמטרים כמו קצב למידה, מקדם היוון (gamma), גודל אצווה (batch size), מספר איטרציות SGD בכל עדכון, ומקדמי רגולריזציה (אם רלוונטי) דורשים כיול קפדני, לרוב באמצעות סבבים רבים של אופטימיזציה (כפי שיפורט בפרק 5.2).

בעוד ש-FinRL הוזכרה כמסגרת רלוונטית, והיא אכן מציעה רכיבים שימושיים לסביבות פיננסיות, בניית סביבה מותאמת אישית לחלוטין על בסיס PettingZoo ואימון עם RLlib/MAPPO עשויים להעניק גמישות רבה יותר להתאמה לדרישות הייחודיות של האסטרטגיה (כגון הצורות ההרמוניות, ניתוח LVN, והחלוקה הייחודית של הנתונים). ניתן לשאוב השראה מ-FinRL בתכנון רכיבים ספציפיים של הסביבה, כגון טיפול בנתונים פיננסיים או מידול של אינטראקציות שוק.

#### **טבלה 3: הגדרת מרחב המצב ומרחב הפעולות של סוכני MARL**

| **רכיב** | **תיאור / מאפיינים** | **הערות** |
| --- | --- | --- |
| **מרחב המצב (תצפית Mi​ לכל סוכן)** | וקטור מאפיינים המורכב מ: | כל סוכן מקבל Mi​ ייחודי + פרמטרי משטר גלובליים. |
|  | 1. נתוני OHLCV (5ד', 30ד') רלוונטיים למקטע הסוכן (למשל, מחירים אחרונים, שינויי מחיר, נפחים). |  |
|  | 2. ערכי אינדיקטורים (MLMI, NW-RQK, FVG) מחושבים על המקטע. |  |
|  | 3. מאפיינים גיאומטריים של "צורה הרמונית" אחרונה (זוויות, יחסי צלעות), אם רלוונטי למקטע. | נגזר משלושת האותות. |
|  | 4. מאפייני "עוצמת תחנת LVN" קרובה (למשל, מספר בדיקות היסטוריות, נפח בבדיקות), אם רלוונטי למקטע. | נגזר מפרופיל שוק. |
|  | 5. פלט מנוע זיהוי המשטרים (MMD) – גלובלי לכל הסוכנים. | מספק הקשר מאקרו. |
|  | 6. (אופציונלי) מידע על פוזיציות פתוחות של הסוכן/המערכת. |  |
| **מרחב הפעולות (משותף לכל הסוכנים)** | מרחב היברידי (בדיד ורציף): |  |
|  | 1. **כיוון עסקה (בדיד):** {קנייה (Long), מכירה (Short), החזקה/ללא פעולה}. |  |
|  | 2. **סוג פקודה (בדיד):** {פקודת שוק (Market), פקודת גבול (Limit)}. |  |
|  | 3. **גודל הפקודה (רציף/בדיד מוגדר):** מספר החוזים. | יושפע מ"עוצמת LVN" ו"איכות הצורה ההרמונית". |
|  | 4. **מחיר פקודת גבול (רציף):** אם נבחרה פקודת גבול (למשל, יחסית למחיר נוכחי או LVN). |  |
|  | 5. **(אופציונלי) פעולות ניהול נוספות (בדיד):** {ביטול פקודה קיימת, שינוי פקודה קיימת}. |  |

Export to Sheets

טבלה זו מגדירה את "שפת התקשורת" בין הסוכנים לסביבה. היא קריטית להבנת המידע העומד לרשות הסוכנים לצורך קבלת החלטות, והאפשרויות העומדות בפניהם לפעולה. פירוט זה חיוני למימוש הסביבה והסוכנים. אם המצב אינו מוגדר היטב (למשל, חסר מידע קריטי או כולל יותר מדי רעש), או אם מרחב הפעולות אינו מאפשר לסוכן לבצע את הפעולות הנדרשות, יכולת הלמידה של הסוכן תיפגע קשות.

#### **טבלה 4: רכיבי פונקציית התגמול וניסוחם**

| **רכיב תגמול** | **ניסוח מתמטי / לוגי (רעיוני)** | **רציונל להכללה** | **משקל / חשיבות פוטנציאליים** | **מקורות / השראה** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **רווח והפסד (P&L) של התיק (מבוסס צוות)** | ΔPortfolioValuet​ | מדד ביצועים מרכזי, משקף את המטרה העיקרית של מסחר. | גבוה, אך מאוזן עם רכיבי סיכון. |  |
| **תשואה מותאמת לסיכון** | יחס שארפ או סורטינו, מחושב על חלון מתגלגל. RS​=(Rp​−Rf​)/σp​ | מעודד רווחיות תוך ניהול סיכונים. | גבוה. |  |
| **ציון ביצוע סינרגיה (לכל אחת מ-4 הסינרגיות)** | למשל, +קבוע אם סינרגיה k זוהתה ובוצעה בהצלחה בתנאים מתאימים, 0 אחרת. או תגמול רציף המבוסס על איכות ביצוע הסינרגיה. | מבטיח שהסוכנים לומדים לבצע את כל רכיבי האסטרטגיה המשותפת. | בינוני-גבוה, תלוי בחשיבות כל סינרגיה. | (בהשראה) |
| **עונש על משיכות גדולות (Max Drawdown Penalty)** | −C×(CurrentDrawdown)2 אם Drawdown > סף | מניעת לקיחת סיכונים מוגזמים המובילים להפסדים גדולים. | בינוני-גבוה. |  |
| **עונשי עלויות עסקה** | סכום עמלות והחלקה בפועל או מוערך. | מבטיח שהאסטרטגיה רווחית נטו, לאחר התחשבות בעלויות מסחר ריאליות. | גבוה. |  |
| **(אופציונלי) מדד שיתוף פעולה / קוהרנטיות** | עונש על פעולות סותרות בין סוכנים (אם ניתן לזיהוי ברמה הגלובלית), או תגמול על פעולות מתואמות התומכות במטרה גלובלית. | חיוני להשגת "שיתוף פעולה מושלם" אם המדיניות המשותפת לבדה אינה מספיקה. | בינוני. |  |
| **(אופציונלי) רכיב נגד התאמת יתר** | עונש על מורכבות מדיניות (למשל, נורמת L1/L2 של משקולות הרשת), תגמול על גיוון בפעולות (אם רצוי במסגרת הסופרפוזיציה). | מפחית סיכון ללמידת אסטרטגיות שבריריות המותאמות לרעש בנתוני האימון. | בינוני. |  |

פונקציית התגמול היא לב ליבה של למידת החיזוק, ועיצובה הקפדני חיוני להכוונת הסוכנים להתנהגות הרצויה. טבלה זו מאפשרת דיון מובנה על האיזונים השונים הנדרשים בין רווח, סיכון, ביצוע אסטרטגיה, והימנעות מהתאמת יתר. הסוכנים ילמדו לעשות כל מה שנדרש כדי למקסם את התגמול; לכן, אם התגמול אינו משקף נכונה את מטרות המערכת, התנהגות הסוכנים עלולה להיות תת-אופטימלית או אף מזיקה.

## **פרק 4: סופרפוזיציה בהשראת קוונטים לעמידות סוכנים**

הרעיון של שילוב עקרונות "סופרפוזיציה" בהשראת מכניקת הקוונטים במערכת למידת חיזוק קלאסית הוא היבט חדשני ומאתגר של הפרויקט. מטרתו היא לבחון כיצד עקרונות אלו יכולים לתרום להגברת העמידות (robustness) והאמינות (reliability) של סוכני המסחר והמערכת כולה.

### **4.1. בסיס רעיוני: תרגום סופרפוזיציה קוונטית ל-RL קלאסי**

יש להדגיש, כפי שציין המשתמש , שהכוונה אינה לבנות מחשב קוונטי או להשתמש באלגוריתמים קוונטיים אמיתיים. במקום זאת, המטרה היא לשאוב השראה מרעיונות קונספטואליים ממכניקת הקוונטים – בעיקר מעיקרון הסופרפוזיציה, שלפיו מערכת קוונטית יכולה להתקיים במספר מצבים בו-זמנית עד לרגע המדידה שבו היא "קורסת" לאחד המצבים האפשריים – ולממש אנלוגיות קלאסיות שלהם.

בפיזיקה קוונטית, סופרפוזיציה מאפשרת למערכות לעבד אפשרויות רבות במקביל, מה שתורם ליעילות חישובית. בלמידת חיזוק קוונטית (QRL), עיקרון זה מנוצל לעיתים לקידוד מצבים ופעולות מרובים במקביל, מה שמאפשר חקירה מקבילה של מרחב המצב-פעולה. האתגר הוא לתרגם רעיונות מופשטים אלו למושגים מעשיים הניתנים למימוש במערכת RL קלאסית. אנלוגיות אפשריות כוללות:

* **חקירה מקבילה של מצבים/מדיניויות:** ניתן לדמות את יכולת החקירה המקבילה של QRL על ידי שימוש באנסמבל של מדיניויות, או על ידי שמירה על התפלגות הסתברות על פני פעולות אפשריות.
* **ייצוגים הסתברותיים:** סוכן יכול לשמור על "אמונה" (belief) הסתברותית לגבי מספר מצבי שוק אפשריים או מספר פעולות אופטימליות, במקום להתחייב למצב או פעולה בודדים ודטרמיניסטיים.
* **אלגוריתמים קלאסיים בהשראת קוונטים:** קיימים מחקרים המציעים אלגוריתמים קלאסיים המנצלים עקרונות קוונטיים. לדוגמה, QIDDM (Quantum-Inspired Dynamic Decision-Making Algorithm) הוא אלגוריתם קלאסי שבו החלטות קיימות כסופרפוזיציה הסתברותית עד שתצפיות חיצוניות גורמות ל"קריסה" להחלטה דטרמיניסטית. מסגרת Q-Policy מקודדת פונקציות ערך בסופרפוזיציה קוונטית לצורך הערכה מקבילה של זוגות מצב-פעולה, ומאומתת באמצעות אמולציה קלאסית.

### **4.2. אסטרטגיות מימוש פרקטיות**

המשתמש הביע עניין לדחות את ההחלטה על המימוש הספציפי של סופרפוזיציה לשלב מאוחר יותר בפרויקט, לאחר הבנה מעמיקה יותר של יכולותיה ומגבלותיה של מערכת ה-MARL הבסיסית. עם זאת, חשוב לשרטט כבר בשלב זה מספר אסטרטגיות קלאסיות אפשריות למימוש הרעיון, כפי שפורטו ב-:

1. **שיטות אנסמבל (Ensemble Methods):**
   * **רעיון:** אימון של מספר מדיניויות (או מספר גרסאות של המדיניות המשותפת, למשל עם אתחולים שונים או על תתי-דגימות שונות של נתונים). כל מדיניות באנסמבל יכולה לייצג "מצב" או "השערה" הנמצאת בסופרפוזיציה.
   * **מימוש:** ההחלטה הסופית של המערכת (או של כל סוכן, אם האנסמבל הוא ברמת הסוכן) מתקבלת על ידי אגרגציה של הפעולות המוצעות על ידי כל המדיניויות באנסמבל. אגרגציה יכולה להתבצע באמצעות הצבעת רוב, ממוצע משוקלל של הסתברויות הפעולה (כאשר המשקולות יכולות להתבסס על מדדי ביצועים היסטוריים של כל מדיניות, כמו יחס שארפ), או שיטות אגרגציה מתוחכמות יותר.
   * **יתרונות:** למידת חיזוק באנסמבל (ERL) הראתה שיפור ביכולת ההכללה ובעמידות. אם מדיניות אחת באנסמבל נכשלת בתנאי שוק מסוימים, מדיניויות אחרות עשויות להצליח, מה שמוביל לעמידות כוללת של המערכת.
2. **בחירת פעולה הסתברותית (Probabilistic Action Selection):**
   * **רעיון:** במקום שהמדיניות המשותפת תפיק פעולה דטרמיניסטית אחת, היא מפיקה התפלגות הסתברות על פני כל הפעולות האפשריות במרחב הפעולות.
   * **מימוש:** הפעולה הסופית יכולה להידגם מהתפלגות זו, מה שמאפשר חקירה מגוונת. לחלופין, ניתן לבחור בפעולה בעלת ההסתברות הגבוהה ביותר, אך רק אם הסתברות זו עוברת סף ביטחון מסוים. גישה זו מייצגת את המצב ה"מורכב" (superposed) של שקילת מספר פעולות בו-זמנית.
   * **יתרונות:** הימנעות מהתחייבות מוקדמת לפעולה בודדת, מאפשר תגובה גמישה יותר לאי-ודאות.
3. **מנגנון דמוי-QIDDM להתחייבות מאוחרת להפעלת סינרגיה:**
   * **רעיון:** גישה זו נראית כמתאימה ביותר לרעיון המקורי של המשתמש. היא מתבססת על אנלוגיה ל"קריסת פונקציית הגל" הקוונטית.
   * **מימוש:** הסוכנים (או המערכת כולה) מעריכים במקביל את התועלת או ההתאמה של הפעלת כל אחת מארבע הסינרגיות המוגדרות. הם נשארים במצב של "סופרפוזיציה" של סינרגיות פוטנציאליות. "קריסה" לבחירה בסינרגיה ספציפית אחת (ולפעולות המסחר הנגזרות ממנה) מתרחשת רק כאשר מתקיים "טריגר קריסה" מוגדר. טריגר כזה יכול להיות, למשל:
     + אות חזק וברור במיוחד ממקטע הנתונים Mi​ של סוכן מסוים, התומך בסינרגיה ספציפית.
     + אישור ממשטר השוק שזוהה על ידי מנוע ה-MMD (למשל, משטר מסוים עשוי להתאים יותר לסינרגיה מסוג מסוים).
     + השגת קונצנזוס בין תת-קבוצה של סוכנים לגבי התאמת סינרגיה מסוימת.
     + מעבר של מדד ביטחון מסוים (הקשור לסינרגיה) מעל סף קריטי.
   * **יתרונות:** החלטות מתקבלות רק כאשר יש מספיק "ראיות" או ביטחון, מה שמפחית פעולות פזיזות או מבוססות על אותות חלשים בסביבות רועשות ולא ודאיות כמו שווקים פיננסיים.

### **4.3. שילוב סופרפוזיציה במערכת ה-MARL**

שילוב של טכניקות בהשראת סופרפוזיציה, למשל באמצעות אנסמבלים או מנגנון דמוי-QIDDM, ישנה באופן מהותי את הדינמיקה של מערכת ה-MARL. במקום ש-N סוכנים יפעלו כל אחד עם אותה מדיניות דטרמיניסטית (גם אם מבוססת על קלט שונה), ייתכן שיהיו N סוכנים שכל אחד מהם מריץ פנימית אנסמבל של M מדיניויות (כאשר כל מדיניות באנסמבל היא וריאציה קלה של המדיניות המשותפת), או ש-N הסוכנים עצמם, כמערכת, מהווים אנסמבל של החלטות פוטנציאליות.

הדבר ללא ספק מגדיל את המורכבות החישובית ואת אתגרי האימון. עם זאת, הפוטנציאל לשיפור משמעותי בעמידות המערכת לאי-סטציונריות של השוק ולרעש הטבוע בנתונים פיננסיים הוא משמעותי. "סופרפוזיציה" במובן זה הופכת למנגנון מובנה לחקירה (exploration) וניצול (exploitation) של מגוון אסטרטגיות או תגובות אפשריות. כישלון של אסטרטגיה אחת או "השערה" אחת בתנאי שוק נתונים עשוי להיות מקוזז על ידי הצלחה של אסטרטגיה אחרת הנמצאת גם היא "בסופרפוזיציה", מה שמוביל לעמידות מערכתית כוללת. "קריסת" המערכת להחלטה ספציפית יכולה להיות מנגנון אגרגציה מושכל או בחירה המבוססת על רמת ודאות גבוהה יותר.

ההערכה של מערכת כזו תדרוש מדדים הלוכדים לא רק רווח והפסד, אלא גם את גיוון החקירה, את יציבות הביצועים בתנאי שוק משתנים, ואת יכולת המערכת להסתגל בצורה "חיננית" לזעזועי שוק בלתי צפויים.

האתגר של הקצאת אשראי עשוי להסתבך עוד יותר. אם סוכן בודד מריץ אנסמבל פנימי של מדיניויות (כמימוש של סופרפוזיציה), כיצד מחושב התגמול שלו וכיצד מתבצעת הקצאת אשראי בין המדיניויות השונות באנסמבל הפנימי שלו? האם התגמול מחושב רק על האסטרטגיה שנבחרה בפועל מתוך הסופרפוזיציה, או שמא יש מנגנון מורכב יותר? שאלות אלו ידגישו את הצורך בבדיקות השוואתיות קפדניות מול מערכת ללא רכיב סופרפוזיציה, כדי לוודא שהיתרונות בעמידות אכן מצדיקים את העלייה במורכבות.

#### **טבלה 5: אפשרויות מימוש לסופרפוזיציה בהשראת קוונטים**

| **גישה** | **רעיון "בהשראת קוונטים" מרכזי** | **מנגנון לעמידות/אמינות** | **תרחיש מימוש מעשי למסחר MARL** | **יתרונות** | **חסרונות/אתגרים** | **מקורות** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ביצוע מדיניות באנסמבל** | חקירה מקבילה של "מצבי" מדיניות מרובים. | גיוון אסטרטגי; אם מדיניות אחת נכשלת, אחרות עשויות להצליח. אגרגציית החלטות (למשל, הצבעה) יכולה לסנן רעשים. | כל אחד מ-N הסוכנים (או המערכת כולה) מריץ K גרסאות של המדיניות המשותפת (למשל, עם פרמטרים שונים במקצת, או מאומנות על תתי-דגימות שונות של נתונים). החלטת המסחר הסופית מתקבלת על ידי הצבעת רוב או ממוצע משוקלל של המלצות ה-K מדיניויות. | שיפור הכללה, עמידות לרעש, הפחתת התאמת יתר למודל יחיד. | מורכבות חישובית מוגברת, צורך בניהול מספר מודלים, סיכון להתאמת יתר של האנסמבל כולו אם כל המודלים דומים מדי. |  |
| **בחירת פעולה הסתברותית** | ייצוג מצב קוונטי כהתפלגות על פני מצבי בסיס. | הימנעות מהתחייבות מוקדמת לפעולה בודדת; מאפשר תגובה גמישה יותר לאי-ודאות. | רשת המדיניות המשותפת מפיקה התפלגות הסתברות על פני מרחב הפעולות האפשרי (למשל, קנה, מכור, החזק, עם הסתברויות שונות). הפעולה הסופית נדגמת מהתפלגות זו, או שנבחרת הפעולה בעלת ההסתברות הגבוהה ביותר לאחר שעברה סף ביטחון מסוים. | חקירה טבעית, גמישות בתגובה. | דורש כיול של רמת האקראיות (טמפרטורה בדגימה), עלול להוביל לחוסר החלטיות אם ההתפלגות שטוחה מדי. |  |
| **התחייבות מאוחרת דמוית-QIDDM** | אנלוגיה ל"קריסת פונקציית הגל" הקוונטית. | החלטות מתקבלות רק כאשר יש מספיק "ראיות" או ביטחון, מה שמפחית פעולות פזיזות בסביבות רועשות. | הסוכנים מעריכים במקביל את התועלת של הפעלת כל אחת מארבע הסינרגיות. הם נשארים ב"סופרפוזיציה" של סינרגיות פוטנציאליות. "קריסה" לסינרגיה ספציפית (ולפעולות הנגזרות ממנה) מתרחשת כאשר תנאי שוק מסוימים (למשל, אות חזק ממקטע הנתונים Mi​, אישור ממשטר ה-MMD, או קונצנזוס בין סוכנים) עוברים סף קריטי. | החלטות מבוססות יותר, הפחתת מסחר יתר בתנאי אי-ודאות. | מורכבות בהגדרת "טריגרי הקריסה" והספים, עלול להוביל להחמצת הזדמנויות אם הספים גבוהים מדי או אם תהליך הערכת הסינרגיות איטי. |  |

טבלה זו נועדה לסייע בקבלת החלטה מושכלת לגבי אסטרטגיית הסופרפוזיציה המתאימה ביותר למערכת, בהתחשב ביתרונות, בחסרונות ובמורכבות המימוש של כל גישה. היא תהווה בסיס לדיון בשלב מתקדם יותר של הפרויקט, לאחר הערכה ראשונית של ביצועי מערכת ה-MARL הבסיסית.

## **פרק 5: אימון, בדיקות לאחור ואופטימיזציה**

לאחר תכנון ארכיטקטורת ה-MARL ושילוב הרעיונות המתקדמים, השלב הבא והקריטי הוא אימון המערכת, הערכת ביצועיה באופן קפדני, ואופטימיזציה של הפרמטרים השונים. שלב זה חיוני להבטחת יעילותה ועמידותה של המערכת בסביבת השוק הדינמית והרועשת.

### **5.1. מסגרת בדיקות לאחור (Backtesting) קפדנית**

בדיקות לאחור הן כלי חיוני להערכת אסטרטגיות מסחר, אך הן חייבות להתבצע בקפדנות, במיוחד עבור מערכות MARL הפועלות בשווקים לא-סטציונריים כמו שוק החוזים העתידיים. המשתמש העלה שאלות לגבי תזמון שלב הבקטסט וכיצד אימון באמצעות בקטסט קשור. יש להבהיר כי בקטסט במובנו הקלאסי משמש להערכת אסטרטגיה *לאחר* שהמודל אומן (על נתוני אימון נפרדים), וההערכה מתבצעת על נתונים שהמודל לא "ראה" (out-of-sample data). טכניקת Walk-Forward, שתתואר להלן, משלבת את שני ההיבטים באופן איטרטיבי.

#### **5.1.1. אופטימיזציית Walk-Forward**

אופטימיזציית Walk-Forward היא טכניקה רובסטית לבדיקה והתאמה של אסטרטגיות מסחר בסביבות משתנות. התהליך כולל:

1. **חלוקת הנתונים ההיסטוריים:** הנתונים מחולקים למקטעים (חלונות) עוקבים.
2. **שלב האופטימיזציה (In-Sample):** המערכת (כולל סוכני ה-MARL והפרמטרים שלהם) מאומנת על מקטע נתונים היסטורי ראשון (למשל, שנתיים של נתונים). במהלך שלב זה, ניתן לבצע אופטימיזציה של היפר-פרמטרים של המודל.
3. **שלב הבדיקה (Out-of-Sample):** המערכת המאומנת והמוטבת נבדקת על מקטע הנתונים הבא מיד לאחר תקופת האימון (למשל, חצי שנה של נתונים), שהמערכת לא "ראתה" במהלך האימון. ביצועי המערכת על מקטע זה נרשמים.
4. **הזזת החלון:** חלון האימון וחלון הבדיקה "זזים קדימה" בזמן (למשל, בשנה אחת), והתהליך חוזר על עצמו – אימון מחדש על מקטע הנתונים המעודכן ובדיקה על המקטע העוקב החדש.

גישה זו מדמה טוב יותר תנאי מסחר אמיתיים, שבהם מודלים צריכים להסתגל לנתונים חדשים, ומסייעת משמעותית בהפחתת הסיכון של התאמת יתר (overfitting) לנתונים היסטוריים ספציפיים. חשוב מאוד להקפיד על כך שבכל שלב, מידע מתקופת הבדיקה (out-of-sample) לא "יזלוג" בשום צורה לתהליך האופטימיזציה או אימון המודל בתקופת האימון (in-sample). בחירת אורך חלונות האימון והבדיקה היא היפר-פרמטר בפני עצמו; חלונות קצרים מדי עלולים להוביל לחוסר יציבות, וחלונות ארוכים מדי עלולים לא להסתגל מספיק מהר לשינויים בשוק.

#### **5.1.2. טיפול באי-סטציונריות ושינויי משטר**

שווקים פיננסיים הם אינהרנטית לא-סטציונריים, כלומר התכונות הסטטיסטיות שלהם משתנות לאורך זמן. מנוע זיהוי המשטרים באמצעות MMD נועד להתמודד ישירות עם היבט זה. מסגרת הבדיקות לאחור צריכה:

* **להשתמש בפלט מנוע ה-MMD:** יש להעריך את ביצועי המערכת באופן ספציפי על פני משטרי שוק שונים, כפי שזוהו על ידי מנוע ה-MMD. הדבר יאפשר להבין האם האסטרטגיה מתפקדת היטב בכל המשטרים, או שיש משטרים שבהם היא מתקשה.
* **לבצע ולידציה חוצת-משטרים:** יש לוודא שהמערכת נבדקת על מגוון רחב של תקופות היסטוריות המייצגות משטרי שוק שונים (למשל, שוק שורי, שוק דבי, שוק תנודתי, שוק מגמתי).
* **סימולציות מונטה קרלו ובדיקות מאמץ (Stress Testing):** ניתן להשתמש בטכניקות אלו כדי לבחון את עמידות האסטרטגיה בתרחישי שוק קיצוניים או אירועי "ברבור שחור" שלא נצפו בהכרח בנתונים ההיסטוריים.
* **ולידציה צולבת לסדרות עתיות (Time-Series Cross-Validation):** שיטות ולידציה צולבת המותאמות לסדרות עתיות, כגון blocked cross-validation, יכולות לספק הערכה נוספת לביצועי המודל.

#### **5.1.3. מידול עלויות ריאליסטי (עמלות, החלקה)**

כדי לקבל תמונה אמיתית של ביצועי האסטרטגיה, חיוני למדל עלויות מסחר ריאליסטיות. אלו כוללות:

* **עמלות עסקה (Commissions):** עמלות קנייה ומכירה הנגבות על ידי הברוקר.
* **החלקה (Slippage):** ההפרש בין המחיר הצפוי של העסקה לבין המחיר שבו היא בוצעה בפועל. החלקה יכולה להיות משמעותית בשווקים תנודתיים או נזילים פחות.
* **השפעה על השוק (Market Impact):** אם המערכת סוחרת בנפחים גדולים יחסית לנזילות השוק, עצם ביצוע הפקודות שלה עלול להשפיע על מחיר הנכס לרעתה.

התעלמות מעלויות אלו עלולה להוביל להערכת יתר משמעותית של רווחיות האסטרטגיה.

#### **5.1.4. מדדי ביצוע: רווח והפסד, מדדים מותאמי-סיכון, אחוזי הצלחה, ביצוע סינרגיות**

הערכת ביצועי המערכת צריכה להתבסס על מגוון רחב של מדדים, ולא רק על יעד רווח והפסד קצר טווח. המשתמש ציין יעד של "כמה האסטרטגיה צריכה להרוויח בשבועיים", אך מכיר בכך שזהו מדד חלקי ועלול להוביל להתאמת יתר. המדדים המרכזיים שיש לכלול הם :

* **מדדי רווחיות:**
  + תשואה מצטברת (Cumulative Return)
  + רווח/הפסד נטו (Net Profit/Loss)
  + פקטור רווח (Profit Factor = סך הרווחים הגולמיים / סך ההפסדים הגולמיים)
* **מדדי סיכון:**
  + משיכה מקסימלית (Maximum Drawdown - MDD)
  + תנודתיות התשואות (Volatility of Returns)
* **מדדי תשואה מותאמת לסיכון:**
  + יחס שארפ (Sharpe Ratio)
  + יחס סורטינו (Sortino Ratio)
  + יחס קלמאר (Calmar Ratio)
* **מדדי יעילות מסחר:**
  + אחוז עסקאות רווחיות (Win Rate)
  + תוחלת רווח לעסקה (Expectancy)
  + יחס רווח/הפסד ממוצע (Average Win/Average Loss Ratio)
* **מדדים ספציפיים לאסטרטגיה:**
  + הערכת איכות הביצוע של כל אחת מארבע הסינרגיות (למשל, תדירות הפעלה, רווחיות ממוצעת לסינרגיה).
  + ביצועי המערכת במשטרים שונים (כפי שזוהו על ידי מנוע ה-MMD).

יש לזכור כי במערכת MARL, התוצאות עלולות להיות תלויות בנתיב הפעולות שננקטו (path-dependent). הדבר יכול להקשות על השוואת ביצועים בין ריצות בדיקה שונות או על בידוד ההשפעה של שינוי פרמטר בודד. שינוי קטן בפעולה של סוכן אחד בשלב מוקדם יכול להוביל להתפתחות שונה לחלוטין של כל סימולציית המסחר.

### **5.2. אופטימיזציית היפר-פרמטרים**

מערכת MARL מורכבת כזו כוללת מספר רב של היפר-פרמטרים שיש לכייל. אלו כוללים פרמטרים של אלגוריתם ה-RL (למשל, שיעורי למידה, ארכיטקטורות רשת, מקדם היוון, פרמטרי חקירה), פרמטרים של מנוע זיהוי המשטרים (MMD), פרמטרים של רכיב הסופרפוזיציה (אם ייושם), ואף פרמטרים הקשורים לאסטרטגיה עצמה (כגון מספר הסוכנים או אופן חלוקת הנתונים). אופטימיזציה ידנית של מרחב פרמטרים כה גדול אינה מעשית.

#### **5.2.1. שימוש ב-Optuna עם Ray Tune עבור MARL, MMD וסופרפוזיציה**

ספריות כגון Optuna ו-Ray Tune (המשולבת עם RLlib) מספקות כלים רבי עוצמה לאוטומציה של תהליך אופטימיזציית ההיפר-פרמטרים.

* **Optuna:** היא ספרייה קלה יחסית המאפשרת הגדרה של מרחבי חיפוש דינמיים להיפר-פרמטרים. היא משתמשת באלגוריתמי אופטימיזציה מתקדמים, כגון אופטימיזציה בייסיאנית, כדי למצוא ביעילות צירופי היפר-פרמטרים אופטימליים.
* **Ray Tune:** היא ספרייה המגיעה עם Ray ומאפשרת לבצע חיפושי היפר-פרמטרים באופן מבוזר ומקבילי על פני מספר מעבדים או מכונות. הדבר מאיץ משמעותית את תהליך האופטימיזציה, שהוא לרוב יקר חישובית.
* **שילוב Optuna ו-Ray Tune:** ניתן לשלב את Optuna עם Ray Tune (למשל, באמצעות OptunaSearch ב-Ray Tune), ובכך ליהנות הן מיכולות החיפוש המתקדמות של Optuna והן מיכולות המיקבול של Ray Tune.

תהליך האופטימיזציה יכלול הגדרת "פונקציית מטרה" (objective function) שתעטוף את תהליך אימון המודל (למשל, אימון מערכת ה-MARL על סט אימון של walk-forward) והערכתו על סט ולידציה (ה-out-of-sample של ה-walk-forward). הפונקציה תחזיר מדד ביצועים (למשל, יחס שארפ על סט הולידציה) שאותו Optuna/Ray Tune ינסו למקסם (או למזער, אם מדובר במדד שגיאה).

מרחב החיפוש של ההיפר-פרמטרים במערכת זו צפוי להיות עצום, בהתחשב במספר הרכיבים (MARL, MMD, סופרפוזיציה, אסטרטגיה) והפרמטרים הפנימיים של כל אחד מהם. הדבר הופך את האופטימיזציה למאתגרת ויקרה חישובית, גם עם כלים מתקדמים. בחירת פונקציית המטרה הנכונה לאופטימיזציה היא קריטית; אם היא מתמקדת רק ברווח, היא עלולה להוביל להתאמת יתר. כמו כן, יש להיזהר מהתאמת יתר של ההיפר-פרמטרים עצמם, אם האופטימיזציה נעשית על אותו סט נתונים שוב ושוב או על סט ולידציה קטן מדי.

### **5.3. התמודדות עם התאמת-יתר (Overfitting) והבטחת הכללה**

אחת הסכנות המרכזיות בפיתוח אסטרטגיות מסחר מבוססות למידת מכונה היא התאמת יתר (overfitting), שבה המודל "לומד בעל פה" את נתוני האימון, כולל הרעש שבהם, במקום ללמוד את התבניות האמיתיות והכלליות. כתוצאה מכך, המודל עשוי להציג ביצועים מצוינים על נתוני האימון, אך להיכשל כישלון חרוץ בנתונים חדשים (out-of-sample) או במסחר חי. המשתמש מודע לסכנה זו, במיוחד בהקשר של אופטימיזציה ישירה של רווח והפסד.

#### **5.3.1. טכניקות רגולריזציה (L1/L2, אנטרופיה)**

רגולריזציה היא טכניקה שמטרתה למנוע התאמת יתר על ידי הוספת "עונש" לפונקציית ההפסד של המודל על מורכבות יתר.

* **רגולריזציית L1/L2:** טכניקות אלו מוסיפות עונש על גודל המשקולות של רשתות הנוירונים (המשמשות את סוכני ה-RL). רגולריזציית L1 נוטה לאפס משקולות של מאפיינים פחות חשובים (ובכך מבצעת סוג של בחירת מאפיינים), בעוד שרגולריזציית L2 נוטה להקטין את כל המשקולות באופן אחיד יותר. שתיהן עוזרות למנוע מהמשקולות להיות גדולות מדי, תופעה הקשורה לעיתים להתאמת יתר.
* **רגולריזציית אנטרופיה:** באלגוריתמי RL מבוססי מדיניות (כמו PPO ו-SAC), ניתן להוסיף רכיב אנטרופיה לפונקציית המטרה. האנטרופיה של המדיניות מודדת את מידת האקראיות שלה. עידוד אנטרופיה גבוהה יותר (כלומר, מדיניות אקראית יותר) בשלבי האימון המוקדמים יכול לעודד חקירה (exploration) של מרחב המצב-פעולה ולמנוע התכנסות מוקדמת למדיניות תת-אופטימלית מקומית.

המשתמש שאל כיצד ליישם רגולריזציה. בספריות RL כמו RLlib, ניתן לרוב להגדיר מקדמי רגולריזציה (L1/L2, אנטרופיה) כחלק מהקונפיגורציה של האלגוריתם. במקרים מסוימים, ייתכן שיהיה צורך לשנות ישירות את פונקציית ההפסד של הלומד (Learner) כדי להוסיף רכיבי רגולריזציה מותאמים אישית. יש לשקול האם להחיל רגולריזציה על רשת המדיניות (Actor), רשת פונקציית הערך (Critic), או על שתיהן, שכן לכל בחירה עשויות להיות השלכות שונות על תהליך הלמידה.

#### **5.3.2. בדיקות על מגוון מכשירים וטווחי זמן**

כפי שביקש המשתמש , בדיקה קפדנית של המערכת על פני מגוון רחב של מכשירים פיננסיים (חוזים עתידיים על מדדי מניות, סחורות, מטבעות חוץ וכו') ועל פני טווחי זמן שונים (למשל, תוך-יומי, יומי, שבועי – אם כי האסטרטגיה הנוכחית מתמקדת בטווחי זמן קצרים יותר) היא קריטית להערכת יכולת ההכללה (generalization) של המערכת. אסטרטגיה שמכלילה היטב על פני שווקים ותנאים מגוונים היא נדירה. סביר להניח שיידרש כיול מסוים (לפחות של היפר-פרמטרים, ואולי אף של רכיבים מסוימים באסטרטגיה עצמה) עבור כל שוק או תנאי שוק חדשים.

השילוב של רעיון ה"סופרפוזיציה", אם הוא ממומש כאנסמבל של מדיניויות, עשוי לתרום להפחתת התאמת יתר. זאת מכיוון שהמערכת אינה מסתמכת על מודל בודד, שעלול להיות שברירי או מותאם יתר על המידה, אלא על "חוכמת ההמונים" של מספר מודלים.

#### **טבלה 6: פרוטוקול בדיקות לאחור ומדדי ביצוע מרכזיים**

| **נקודת בדיקה** | **שיקול / נוהג מומלץ** | **כלים / טכניקות רלוונטיות** | **מדדי הצלחה ספציפיים לנקודה** | **מקורות** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **מקור ואיכות נתונים** | שימוש בנתוני OHLCV (5ד', 30ד') איכותיים (למשל, מ-Databento, dxFeed). טיפול קפדני בנתונים חסרים/שגויים. טיפול בגלגול חוזים. | API של ספקי נתונים, ספריות עיבוד נתונים (Pandas). | שלמות נתונים גבוהה, עקביות חותמות זמן, טיפול הולם בגלגולים. |  |
| **טיפול באי-סטציונריות** | בדיקות Walk-Forward. ניתוח ביצועים ספציפי לכל משטר שזוהה על ידי MMD. הערכת ביצועים על פני תקופות שוק מגוונות (שורי, דבי, תנודתי, מגמתי). | Walk-Forward Analysis, פלט מנוע MMD. | יציבות ביצועים יחסית על פני חלונות Walk-Forward שונים ומשטרים שונים. |  |
| **היבטים ספציפיים ל-MARL** | יציבות המדיניות המשותפת בין סוכנים (האם פעולותיהם קוהרנטיות?). הערכת איכות שיתוף הפעולה (האם התוצאה הגלובלית טובה מסכום החלקים?). השפעת אופן חלוקת הנתונים (Mi​) על ביצועי הסוכנים והמערכת. | ניתוח לוגים של פעולות סוכנים, מדדי תיאום (אם רלוונטי). | ביצועים עקביים של המערכת, היעדר פעולות סותרות באופן שיטתי. |  |
| **היבטים ספציפיים לחוזים עתידיים** | טיפול נכון בגלגול חוזים. התחשבות בדרישות מינוף ובטחונות (margin). מידול החלקה (slippage) ספציפית לשוק החוזים הרלוונטי. | לוגיקת גלגול חוזים, מודל עלויות מותאם. | חישוב רווח והפסד ריאליסטי בהתחשב במאפייני החוזים. |  |
| **מידול עלויות** | הכללת עמלות עסקה ריאליסטיות. מידול עלויות החלקה (למשל, כאחוז מהמחיר או כפונקציה של תנודתיות/נזילות). הערכת השפעה פוטנציאלית על השוק (אם המערכת צפויה לסחור בנפחים גדולים). | מודל עלויות מפורט בסביבת הבקטסט. | רווחיות נטו לאחר כל העלויות. |  |
| **זיהוי התאמת יתר** | שימוש קפדני בנתוני Out-of-Sample (במסגרת Walk-Forward). מבחנים סטטיסטיים לבחינת עמידות הפרמטרים (אם רלוונטי). השוואה לביצועי בנצ'מרק נאיביים (למשל, קנה והחזק, או אסטרטגיה פשוטה יותר). | ניתוח עקומות למידה, השוואת ביצועי In-Sample ל-Out-of-Sample. | פער קטן יחסית בין ביצועי In-Sample ל-Out-of-Sample. ביצועים טובים יותר מבנצ'מרק. |  |
| **מדדי ביצועים מקיפים** | P&L, יחס שארפ, יחס סורטינו, משיכה מקסימלית, פקטור רווח, שיעור הצלחה, תוחלת רווח. הערכת ביצוע ספציפית לכל אחת מ-4 הסינרגיות. | חישוב כל המדדים המפורטים בסעיף 5.1.4. | עמידה ביעדים שהוגדרו (למשל, יחס שארפ > X, MDD < Y) באופן עקבי. |  |
| **הערכת רכיב "הסופרפוזיציה הקוונטית" (אם ייושם)** | מדדי עמידות (למשל, ביצועים בתנאי רעש גבוהים יותר, יציבות בתקופות זעזועים בשוק). גיוון בפעולות (אם רלוונטי לאופן מימוש הסופרפוזיציה, למשל באנסמבל). | השוואת ביצועים עם ובלי רכיב הסופרפוזיציה. | שיפור מובהק בעמידות או ביחס סיכון/תשואה בהשוואה למערכת ללא סופרפוזיציה. |  |

פרוטוקול בדיקות לאחור מובנה וקפדני הוא הכרחי לאימות האסטרטגיה ולהגברת הביטחון ביכולתה לעבוד בתנאי אמת. טבלה זו משמשת כרשימת תיוג מקיפה לביצוע תהליך זה, ומסייעת להבטיח שכל ההיבטים החשובים נלקחים בחשבון. אם ה"ניסוי המדעי" (הבקטסט) אינו מתוכנן ומבוצע כהלכה, תוצאותיו לא יהיו אמינות ועלולות להוביל להחלטות שגויות לגבי פריסת המערכת למסחר חי.

## **פרק 6: מפת דרכים ליישום ושיקולים מתקדמים**

מימוש מערכת המסחר מרובת הסוכנים כפי שתוארה הוא משימה מורכבת הדורשת תכנון קפדני וגישה שלבית. פרק זה יתווה מפת דרכים אפשרית ליישום וידון בשיקולים מתקדמים הקשורים לאתגרים המרכזיים.

### **6.1. תוכנית פיתוח שלב אחר שלב**

ניתן לחלק את תהליך הפיתוח והיישום למספר שלבים מרכזיים, כפי שהוצע באופן ראשוני ב- ובהתאמות הנדרשות על פי העדפות המשתמש:

1. **שלב 1: הקמת תשתית נתונים ועיבוד ראשוני:**
   * פיתוח צנרת נתונים אמינה לרכישה, אחסון ועיבוד של נתוני OHLCV של חוזים עתידיים (בטווחי זמן של 5 דקות ו-30 דקות) מהספק הנבחר (למשל, Databento, dxFeed).
   * יישום לוגיקה לטיפול בגלגול חוזים (continuous contracts).
   * הבטחת איכות נתונים: ניקוי, טיפול בערכים חסרים, סנכרון חותמות זמן.
   * חישוב ראשוני של האינדיקטורים הבסיסיים (RSI, WMA) ופיתוח מנגנון לחישוב פרופיל שוק וזיהוי LVN מנתוני ה-OHLCV של 30 דקות.
   * פיתוח מנגנון לחישוב מאפייני FVG מנתוני 5 דקות.
2. **שלב 2: פיתוח ובדיקת מנוע זיהוי משטרי שוק (MMD):**
   * מימוש אלגוריתם Higher-Rank MMD (מבוסס חתימות נתיבים), תוך התבססות על המחקר של Horvath & Issa והקוד הזמין (למשל, issaz/signature-regime-detection ו-higherOrderKME).
   * בדיקה וכיול של מנוע ה-MMD על נתונים היסטוריים כדי לוודא את יכולתו לזהות שינויי משטר באופן משמעותי ועקבי.
   * הגדרת אופן שילוב פלט מנוע ה-MMD (למשל, תווית משטר או מדד מרחק) בזרם הנתונים הראשי שישמש את הסוכנים.
3. **שלב 3: פיתוח בסיס ייחוס (Baseline) עם סוכן RL יחיד:**
   * מימוש אסטרטגיית המסחר המלאה (כולל ארבע הסינרגיות, פרשנות "צורות הרמוניות", ושימוש ב-LVN) באמצעות סוכן Reinforcement Learning יחיד.
   * סוכן זה יפעל על מלוא הנתונים המעובדים (נתוני OHLCV, אינדיקטורים, מאפייני צורות הרמוניות, מאפייני LVN, ופלט מנוע ה-MMD), ללא חלוקה למטריצות Mi​.
   * שלב זה קריטי וישמש כנקודת השוואה להערכת התועלת (או הנזק הפוטנציאלי מסיבוכיות יתר) של גישת ה-MARL הרב-סוכנית. אם האסטרטגיה הבסיסית עם סוכן יחיד אינה מראה פוטנציאל רווחיות, סביר להניח שסיבוך נוסף עם MARL לא ישפר אותה משמעותית ואף עלול להקשות על איתור הבעיות המהותיות באסטרטגיה.
4. **שלב 4: בניית סביבת MARL מותאמת אישית (PettingZoo):**
   * פיתוח סביבת MARL מותאמת אישית, רצוי בהתאם לתקן של PettingZoo, כפי שפורט בסעיף 3.5.1.
   * הסביבה תהיה אחראית על קבלת נתוני השוק המעובדים, ביצוע החלוקה של הנתונים למטריצות Mi​ (בתחילה אקראית, ובהמשך אולי דינמית/נלמדת), העברת התצפיות המתאימות לכל סוכן, קבלת פעולות מהסוכנים, ביצוען בסביבת המסחר המדומה, וחישוב והחזרת תגמולים.
5. **שלב 5: אימון סוכני MARL (RLlib, MAPPO):**
   * אימון סוכני ה-MARL באמצעות המדיניות המשותפת ופונקציית התגמול השיתופית, תוך שימוש בספריית RLlib ובאלגוריתם מתאים כמו MAPPO.
   * התמקדות בהשגת תיאום ושיתוף פעולה אפקטיבי בין הסוכנים, והתמודדות עם אתגר הנצפות החלקית.
6. **שלב 6: שילוב שכבת סופרפוזיציה בהשראת קוונטים (בשלב מאוחר יותר):**
   * לאחר הערכה ראשונית של מערכת ה-MARL הבסיסית, ובכפוף להחלטת המשתמש , יש לממש אחת מהטכניקות שנדונו בפרק 4 (למשל, אנסמבל של מדיניויות, מדיניות הסתברותית, או מנגנון דמוי-QIDDM) כדי לשפר את עמידות הסוכנים.
   * יש לשלב שכבה זו באופן שישתלב עם ארכיטקטורת ה-MARL הקיימת.
7. **שלב 7: בדיקות לאחור מקיפות ואופטימיזציה:**
   * ביצוע בדיקות לאחור קפדניות על כל המערכת המשולבת, על פי הפרוטוקול שנקבע בפרק 5.1 (כולל Walk-Forward Analysis).
   * שימוש ב-Optuna ו-Ray Tune לאופטימיזציה של היפר-פרמטרים של כל רכיבי המערכת (MARL, MMD, סופרפוזיציה, פרמטרי אסטרטגיה).
8. **שלב 8: איטרציה ושיפור מתמיד:**
   * ניתוח תוצאות הבדיקות, זיהוי נקודות תורפה, וביצוע איטרציות לשיפור כל אחד מרכיבי המערכת. שלב זה כולל גם בחינה של יכולת המערכת ללמוד ולהסתגל באופן מתמשך לתנאי שוק חדשים.

חשוב לבצע פיתוח איטרטיבי של הרכיבים. כל שלב עיקרי (כגון פיתוח מנוע ה-MMD, בניית סביבת ה-MARL, או הטמעת רכיב הסופרפוזיציה) הוא פרויקט מחקר ופיתוח בפני עצמו. יש לבדוק ולהעריך כל רכיב בנפרד ככל הניתן לפני שילובו במערכת הגדולה והמורכבת יותר. בנייה הדרגתית זו תסייע באיתור ובטיפול בבעיות בשלבים מוקדמים.

### **6.2. התמודדות עם אתגרי מפתח: מדרגיות, אי-סטציונריות ונצפות חלקית ב-MARL**

כפי שצוין לאורך הדוח, MARL מציבה אתגרים ייחודיים שיש להתייחס אליהם באופן מפורש :

* **מדרגיות (Scalability):** ככל שמספר הסוכנים גדל, או ככל שמרחבי המצב והפעולה נעשים מורכבים יותר, האתגר החישובי של אימון מערכת MARL גובר. השימוש בספריית Ray RLlib, המיועדת למערכות מבוזרות וחישוב מקבילי, הוא צעד בכיוון הנכון. חלוקת הנתונים למטריצות קלט קטנות יותר (Mi​) עשויה גם היא לתרום למדרגיות, בכך שהיא מפחיתה את ממדיות הקלט עבור כל סוכן בודד. עם זאת, אם נדרשת תקשורת מפורשת בין הסוכנים, יש לנהל את תקורת התקשורת הזו ביעילות כדי שלא תהפוך לצוואר בקבוק.
* **אי-סטציונריות (Non-stationarity):** שווקים פיננסיים הם דינמיים ומשתנים תדיר. מנקודת מבטו של סוכן RL בודד במערכת MARL, הסביבה נראית לא-סטציונרית גם בגלל פעולותיהם המשתנות של סוכנים אחרים. מנוע זיהוי המשטרים באמצעות MMD הוא ניסיון ישיר להתמודד עם האי-סטציונריות של השוק על ידי מתן הקשר גלובלי לסוכנים. רעיון הסופרפוזיציה, אם הוא מיושם כגיוון של מדיניויות או יכולת לשקול מספר מצבים/פעולות, יכול גם הוא לסייע בהתמודדות עם שינויים פתאומיים או אי-ודאות. טכניקות של למידה מתמשכת (continuous learning) ואופטימיזציה בשיטת walk-forward הן חיוניות להתמודדות ארוכת טווח עם אי-סטציונריות.
* **נצפות חלקית (Partial Observability):** כל סוכן במערכת המוצעת פועל, מעצם הגדרתו, תחת נצפות חלקית – הוא רואה רק את מטריצת הנתונים Mi​ שהוקצתה לו ואת פרמטרי המשטר הגלובליים, אך לא את מלוא מצב השוק או את התצפיות של סוכנים אחרים. המדיניות המשותפת ופרמטרי המשטר הגלובליים נועדו לספק הקשר מספיק לפעולה קוהרנטית. אם יתברר במהלך הפיתוח והבדיקות שהתצפיות המקומיות אינן מספקות די מידע לקבלת החלטות מתואמות ואפקטיביות, ניתן יהיה לשקול הוספת מנגנוני תקשורת מפורשים בין הסוכנים (כפי שנדון בסעיף 3.3.3), שיאפשרו להם לשתף מידע קריטי או כוונות פעולה.

### **6.3. אגרגציה ומיזוג מדיניות מתשומות/תצפיות הטרוגניות של סוכנים**

אף על פי שכל הסוכנים חולקים את אותה מדיניות, הם מקבלים תשומות שונות (מטריצות Mi​ שונות). אם הפלט של כל סוכן (למשל, המלצת פעולה או התפלגות הסתברויות על פני פעולות) צריך לעבור אגרגציה להחלטת צוות אחת – למשל, לצורך ניהול סיכונים כולל של התיק, או לביצוע פקודה נטו אחת בשוק – יש לדון כיצד לבצע אגרגציה זו. הדבר רלוונטי במיוחד אם רעיון ה"סופרפוזיציה" מיושם באופן שבו כל סוכן מייצר פלט הסתברותי או מספר פעולות מועמדות.

אפשרויות לאגרגציה כוללות:

* **הצבעת רוב או ממוצע משוקלל:** ניתן לאסוף את המלצות הפעולה מכל הסוכנים ולבחור את הפעולה שקיבלה את רוב הקולות, או לחשב ממוצע משוקלל של הסתברויות הפעולה. המשקולות יכולות להתבסס על מדדי ביטחון של כל סוכן (אם רשת המדיניות מספקת כאלה) או על ביצועיו ההיסטוריים של הסוכן (אם כי זה פחות רלוונטי במדיניות משותפת לחלוטין).
* **פרוטוקולי הצבעה מורכבים:** מחקרים דנים במיזוג מדיניויות של סוכנים (אף אם הם בעלי פונקציות תגמול שונות, מה שלא המקרה כאן) באמצעות מדדי תפוסת מצב-פעולה וכללי הצבעה כמו שיטת בורדה (Borda count). רעיונות אלו עשויים להיות רלוונטיים אם ארבע הסינרגיות נתפסות כתת-מדיניויות שהסוכנים "מצביעים" עליהן באופן עקיף דרך התאמתן למצב הקלט שלהם.
* **שיטות מבוססות פירוק ערך (כמו VDN/QMIX):** כפי שהוזכר בהקשר של הקצאת אשראי, שיטות אלו מבצעות סוג של אגרגציית פונקציות ערך כדי להעריך את הפעולה המשותפת האופטימלית. הן עשויות להיות שימושיות גם כאן אם רוצים לגזור החלטה קולקטיבית אופטימלית.

האינטראקציה המורכבת בין חלוקת הנתונים (אולי אקראית או דינמית), מודעות למשטר מבוססת MMD, מדיניות משותפת המפרשת ארבע סינרגיות ותצורות הרמוניות, ורעיונות סופרפוזיציה לעמידות סוכנים, יוצרת מערכת שבה התנהגות אמרגנטית (emergent behavior) היא סבירה ביותר. התנהגות זו יכולה להיות מועילה (למשל, גילוי אסטרטגיות חדשניות ומסתגלות) או מזיקה (למשל, כשלים בלתי צפויים, פעולות כאוטיות או סותרות ברמה הגלובלית). לכן, מפת הדרכים ליישום חייבת לכלול סימולציה מקיפה ובדיקות "ארגז חול" (sandboxing) כדי להבין תכונות אמרגנטיות אלו לפני כל פריסה של המערכת למסחר חי, במיוחד לאור העובדה שהמשתמש ציין שהמערכת מיועדת לסחור בכסף אמיתי.

### **6.4. שיקולי אדם בלולאה (HITL)**

עבור מערכת מסחר אוטונומית מורכבת כזו, הפועלת בסביבה דינמית ובעלת פוטנציאל להפסדים כספיים משמעותיים, שילוב של אדם בלולאה (Human-in-the-Loop - HITL) יכול להיות בעל ערך רב, ואף הכרחי, במיוחד בשלבי הפיתוח, הבדיקה והפריסה הראשוניים.

תפקידי ה-HITL יכולים לכלול:

* **אימות זיהוי משטרים:** מומחה אנושי יכול לבדוק ולאמת את זיהויי משטר השוק שבוצעו על ידי מנוע ה-MMD, במיוחד בתקופות של אי-ודאות גבוהה או כאשר המנוע מזהה שינוי משטר מפתיע.
* **פיקוח על פריסת האסטרטגיה:** מעקב אחר פעולות המערכת בזמן אמת (או בסימולציה קרובה לזמן אמת) כדי לזהות התנהגויות חריגות, פעולות מסחר תכופות מדי, או חשיפה מוגזמת לסיכון.
* **התערבות במצבים בלתי צפויים:** מתן אפשרות למפעיל אנושי להשבית את המערכת, לעבור למצב "סגירת פוזיציות בלבד", או לשנות פרמטרים תפעוליים קריטיים (כגון גודל פוזיציה מקסימלי) במקרה של תקלות טכניות, אירועי "ברבור שחור" בשוק, או התנהגות בלתי צפויה של המערכת.
* **הנחיית עידון המדיניות ופונקציית התגמול:** מומחה אנושי (למשל, סוחר מנוסה או מפתח האסטרטגיה) יכול לסייע בכוונון עדין של הגדרות ארבע הסינרגיות, פרשנות הצורות ההרמוניות, או רכיבי פונקציית התגמול, על סמך ניתוח ביצועי המערכת והבנתו את דינמיקת השוק.
* **אימות ובדיקה של מודלים:** לפני פריסה, ובאופן תקופתי, מומחה אנושי צריך לבחון את לוגיקת המערכת, את תוצאות הבדיקות לאחור, ואת התאמתה לתנאי השוק הנוכחיים.

ככל שהמערכת הופכת לאוטונומית יותר ומסוגלת להתנהגות אמרגנטית מורכבת (שעשויה להיות מועצמת על ידי אלמנטים של MARL וסופרפוזיציה), שאלות של שליטה, אחריות, ומסחר אתי הופכות למרכזיות, במיוחד בשווקים מפוקחים כמו שוק החוזים העתידיים. רכיב ה-HITL אינו רק תכונה רצויה, אלא פוטנציאל הכרחי לתפעול בטוח ואחראי של מערכת כה חזקה. מחקר מעמיק צריך להתייחס גם למסגרת הממשל (governance) הדרושה למערכת כזו, כולל נהלי אימות מודלים, דרישות פרשנות (interpretability) – שהיא קשה במיוחד במערכות MARL מורכבות – ואמצעי הגנה תפעוליים.

## **פרק 7: מסקנות והנחיות לעתיד**

המחקר הנוכחי הציג תוכנית מקיפה ושאפתנית לפיתוח מערכת מסחר אלגוריתמית מרובת סוכנים (MARL) המיועדת למסחר בחוזים עתידיים. המערכת משלבת אסטרטגיית מסחר ייחודית המבוססת על אינדיקטורים (MLMI, NW-RQK, FVG), ניתוח פרופיל שוק (LVN), ופרשנות גיאומטרית של "צורות הרמוניות", יחד עם טכנולוגיות חזיתיות כגון מנוע זיהוי משטרי שוק מבוסס Higher-Rank MMD, ארכיטקטורת MARL שיתופית (CTDE), ורעיונות בהשראת סופרפוזיציה קוונטית לשיפור עמידות המערכת. הדגש הושם על התאמת התכנון להעדפות המפורטות של המשתמש, כולל המעבר מנתוני רמה 2 לנתוני ברים, וההגדרה הספציפית של הסינרגיות והצורות ההרמוניות.

**פוטנציאל המערכת ואתגריה המרכזיים:**

הפוטנציאל של מערכת כזו טמון ביכולתה לעבד מידע שוק מורכב (גם אם מבוסס ברים ולא ספר פקודות מלא) באופן מבוזר, תוך שמירה על קוהרנטיות אסטרטגית גלובלית. זיהוי משטרי השוק באמצעות MMD נועד לאפשר למערכת להסתגל לתנאי שוק משתנים, בעוד שרעיון הסופרפוזיציה (אם ייושם כהלכה) שואף להקנות לה עמידות נוספת בפני רעש ואי-ודאות. אם תמומש בהצלחה, מערכת זו עשויה להציע ביצועים עדיפים על פני גישות מסחר מסורתיות או מודלים של סוכן יחיד, במיוחד בסביבות שוק דינמיות ותנודתיות.

עם זאת, מימוש המערכת כרוך בהתמודדות עם אתגרים משמעותיים. אלו כוללים את המורכבות הטכנית של כל רכיב בנפרד (MMD מבוסס חתימות, MARL עם מדיניות משותפת ותצפיות חלקיות, הנדסת מאפיינים מורכבת לצורות הרמוניות ועוצמת LVN, ומימוש פרקטי של סופרפוזיציה בהשראת קוונטים), ואת הקושי שבשילובם למערכת אחת קוהרנטית ויעילה. חלוקת הנתונים למטריצות Mi​ עבור הסוכנים השונים, במיוחד אם היא דינמית או נלמדת, היא נקודה קריטית הדורשת איזון עדין בין מתן "תצוגות" מגוונות לסוכנים לבין שמירה על מידע מספק ורלוונטי בכל "תצוגה". הבטחת "שיתוף פעולה מושלם" בין סוכנים הפועלים על סמך תצפיות חלקיות היא אתגר נוסף, וכך גם עיצוב פונקציית תגמול שתאזן בין יעדי רווח והפסד, ניהול סיכונים, והימנעות מהתאמת יתר, כל זאת תוך התחשבות באופי השיתופי של המשימה.

**היתכנות על בסיס מחקר וכלים קיימים:**

למרות האתגרים, הרעיונות המוצגים במערכת נשענים במידה רבה על מחקרים

Sources used in the report



[dxfeed.com](https://dxfeed.com/market-data/futures/)

[Market Data Feeds for Futures and Futures Options - dxFeed](https://dxfeed.com/market-data/futures/)

[Opens in a new window](https://dxfeed.com/market-data/futures/)

[](https://www.prorealcode.com/topic/nadaraya-watson-rational-quadratic-kernel-non-repainting/)

[prorealcode.com](https://www.prorealcode.com/topic/nadaraya-watson-rational-quadratic-kernel-non-repainting/)

[Nadaraya-Watson: Rational Quadratic Kernel (Non-Repainting ...](https://www.prorealcode.com/topic/nadaraya-watson-rational-quadratic-kernel-non-repainting/)

[Opens in a new window](https://www.prorealcode.com/topic/nadaraya-watson-rational-quadratic-kernel-non-repainting/)

[](https://databento.com/futures)

[databento.com](https://databento.com/futures)

[Futures Market Data - Live and historical futures data API - Databento](https://databento.com/futures)

[Opens in a new window](https://databento.com/futures)

[](https://www.scribd.com/document/844526622/KERNEL-REGRESSION-TOOLKITO)

[scribd.com](https://www.scribd.com/document/844526622/KERNEL-REGRESSION-TOOLKITO)

[KERNEL REGRESSION TOOLKITO | PDF - Scribd](https://www.scribd.com/document/844526622/KERNEL-REGRESSION-TOOLKITO)

[Opens in a new window](https://www.scribd.com/document/844526622/KERNEL-REGRESSION-TOOLKITO)

[](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.gaussian_process.kernels.RationalQuadratic.html)

[scikit-learn.org](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.gaussian_process.kernels.RationalQuadratic.html)

[RationalQuadratic — scikit-learn 1.6.1 documentation](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.gaussian_process.kernels.RationalQuadratic.html)

[Opens in a new window](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.gaussian_process.kernels.RationalQuadratic.html)

[](https://in.tradingview.com/scripts/ml/)

[in.tradingview.com](https://in.tradingview.com/scripts/ml/)

[Ml — Indicators and Strategies — TradingView — India](https://in.tradingview.com/scripts/ml/)

[Opens in a new window](https://in.tradingview.com/scripts/ml/)

[](https://fxopen.com/blog/en/triangle-chart-patterns-how-to-identify-and-trade-them/)

[fxopen.com](https://fxopen.com/blog/en/triangle-chart-patterns-how-to-identify-and-trade-them/)

[Triangle Chart Patterns: How to Identify and Trade Them | Market Pulse - FXOpen UK](https://fxopen.com/blog/en/triangle-chart-patterns-how-to-identify-and-trade-them/)

[Opens in a new window](https://fxopen.com/blog/en/triangle-chart-patterns-how-to-identify-and-trade-them/)

[](https://www.zeiierman.com/blog/best-zeiierman-trading-indicators-for-cryptocurrency)

[zeiierman.com](https://www.zeiierman.com/blog/best-zeiierman-trading-indicators-for-cryptocurrency)

[Best Cryptocurrency Indicators on TradingView to Use Immediately! - Zeiierman Trading](https://www.zeiierman.com/blog/best-zeiierman-trading-indicators-for-cryptocurrency)

[Opens in a new window](https://www.zeiierman.com/blog/best-zeiierman-trading-indicators-for-cryptocurrency)

[](https://algorush.com/trading-systems/geometric-patterns-trading-system/)

[algorush.com](https://algorush.com/trading-systems/geometric-patterns-trading-system/)

[Geometric Patterns Trading System - Indicator - Algo Rush](https://algorush.com/trading-systems/geometric-patterns-trading-system/)

[Opens in a new window](https://algorush.com/trading-systems/geometric-patterns-trading-system/)

[](https://github.com/GowthamRaj24/Lorentzian-Classification/blob/master/main.py)

[github.com](https://github.com/GowthamRaj24/Lorentzian-Classification/blob/master/main.py)

[Lorentzian-Classification/main.py at master - GitHub](https://github.com/GowthamRaj24/Lorentzian-Classification/blob/master/main.py)

[Opens in a new window](https://github.com/GowthamRaj24/Lorentzian-Classification/blob/master/main.py)

[](https://www.ig.com/en/trading-strategies/top-7-harmonic-patterns-every-trader-should-know-210608)

[ig.com](https://www.ig.com/en/trading-strategies/top-7-harmonic-patterns-every-trader-should-know-210608)

[Harmonic Patterns: Learn How to Identify and Trade Them | IG International](https://www.ig.com/en/trading-strategies/top-7-harmonic-patterns-every-trader-should-know-210608)

[Opens in a new window](https://www.ig.com/en/trading-strategies/top-7-harmonic-patterns-every-trader-should-know-210608)

[](https://lightningchart.com/blog/xabcd-pattern)

[lightningchart.com](https://lightningchart.com/blog/xabcd-pattern)

[Introduction to XABCD Pattern for financial & stock trading - LightningChart](https://lightningchart.com/blog/xabcd-pattern)

[Opens in a new window](https://lightningchart.com/blog/xabcd-pattern)

[](https://www.tradingview.com/script/CHxGnqBD-Volume-Profile-With-HVN-LVN-detector/)

[tradingview.com](https://www.tradingview.com/script/CHxGnqBD-Volume-Profile-With-HVN-LVN-detector/)

[Volume Profile With HVN & LVN detector — Indicator by Madpuppy88 - TradingView](https://www.tradingview.com/script/CHxGnqBD-Volume-Profile-With-HVN-LVN-detector/)

[Opens in a new window](https://www.tradingview.com/script/CHxGnqBD-Volume-Profile-With-HVN-LVN-detector/)

[](https://www.strike.money/technical-analysis/volume-profile)

[strike.money](https://www.strike.money/technical-analysis/volume-profile)

[Volume Profile: Definition, Analysis, Identity and Benefits](https://www.strike.money/technical-analysis/volume-profile)

[Opens in a new window](https://www.strike.money/technical-analysis/volume-profile)

[](https://www.zeiierman.com/indicators/machine-learning-momentum-index-mlmi)

[zeiierman.com](https://www.zeiierman.com/indicators/machine-learning-momentum-index-mlmi)

[Machine Learning Momentum Index (MLMI) - Zeiierman Trading](https://www.zeiierman.com/indicators/machine-learning-momentum-index-mlmi)

[Opens in a new window](https://www.zeiierman.com/indicators/machine-learning-momentum-index-mlmi)

[](https://www.quantifiedstrategies.com/market-profile/)

[quantifiedstrategies.com](https://www.quantifiedstrategies.com/market-profile/)

[Market Profile - Strategy And Rules - QuantifiedStrategies.com](https://www.quantifiedstrategies.com/market-profile/)

[Opens in a new window](https://www.quantifiedstrategies.com/market-profile/)

[](https://www.youtube.com/watch?v=1iNtxZurc88)

[youtube.com](https://www.youtube.com/watch?v=1iNtxZurc88)

[The MLMI, a simple, intelligent, but powerful trading tool - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=1iNtxZurc88)

[Opens in a new window](https://www.youtube.com/watch?v=1iNtxZurc88)

[](https://www.geeksforgeeks.org/k-nearest-neighbours/)

[geeksforgeeks.org](https://www.geeksforgeeks.org/k-nearest-neighbours/)

[K-Nearest Neighbor(KNN) Algorithm | GeeksforGeeks](https://www.geeksforgeeks.org/k-nearest-neighbours/)

[Opens in a new window](https://www.geeksforgeeks.org/k-nearest-neighbours/)

[](https://realpython.com/knn-python/)

[realpython.com](https://realpython.com/knn-python/)

[The k-Nearest Neighbors (kNN) Algorithm in Python - Real Python](https://realpython.com/knn-python/)

[Opens in a new window](https://realpython.com/knn-python/)

[](https://fxopen.com/blog/en/fixed-range-volume-profile-definition-and-trading-strategies/)

[fxopen.com](https://fxopen.com/blog/en/fixed-range-volume-profile-definition-and-trading-strategies/)

[Fixed Range Volume Profile: Definition and Trading Strategies | Market Pulse - FXOpen UK](https://fxopen.com/blog/en/fixed-range-volume-profile-definition-and-trading-strategies/)

[Opens in a new window](https://fxopen.com/blog/en/fixed-range-volume-profile-definition-and-trading-strategies/)

[](https://pypi.org/project/MarketProfile/)

[pypi.org](https://pypi.org/project/MarketProfile/)

[MarketProfile · PyPI](https://pypi.org/project/MarketProfile/)

[Opens in a new window](https://pypi.org/project/MarketProfile/)

[](https://www.quantstart.com/articles/python-libraries-for-quantitative-trading/)

[quantstart.com](https://www.quantstart.com/articles/python-libraries-for-quantitative-trading/)

[Python Libraries for Quantitative Trading | QuantStart](https://www.quantstart.com/articles/python-libraries-for-quantitative-trading/)

[Opens in a new window](https://www.quantstart.com/articles/python-libraries-for-quantitative-trading/)

[](https://bookmap.com/blog/volume-profile-order-flow-tools-for-deep-market-insight)

[bookmap.com](https://bookmap.com/blog/volume-profile-order-flow-tools-for-deep-market-insight)

[Volume Profile & Order Flow: Tools for Deep Market Insight - Bookmap](https://bookmap.com/blog/volume-profile-order-flow-tools-for-deep-market-insight)

[Opens in a new window](https://bookmap.com/blog/volume-profile-order-flow-tools-for-deep-market-insight)

[](https://www.tradingview.com/support/solutions/43000502040-volume-profile-indicators-basic-concepts/)

[tradingview.com](https://www.tradingview.com/support/solutions/43000502040-volume-profile-indicators-basic-concepts/)

[Volume Profile Indicators: basic concepts — TradingView](https://www.tradingview.com/support/solutions/43000502040-volume-profile-indicators-basic-concepts/)

[Opens in a new window](https://www.tradingview.com/support/solutions/43000502040-volume-profile-indicators-basic-concepts/)

[](https://de.tradingview.com/script/jWY4Uiez-Fair-Value-Gap-LuxAlgo/)

[de.tradingview.com](https://de.tradingview.com/script/jWY4Uiez-Fair-Value-Gap-LuxAlgo/)

[Fair Value Gap [LuxAlgo] - TradingView](https://de.tradingview.com/script/jWY4Uiez-Fair-Value-Gap-LuxAlgo/)

[Opens in a new window](https://de.tradingview.com/script/jWY4Uiez-Fair-Value-Gap-LuxAlgo/)

[](https://github.com/joshyattridge/smart-money-concepts)

[github.com](https://github.com/joshyattridge/smart-money-concepts)

[Discover our Python package designed for algorithmic trading. It brings ICT's smart money concepts to Python, offering a range of indicators for your trading strategies. - GitHub](https://github.com/joshyattridge/smart-money-concepts)

[Opens in a new window](https://github.com/joshyattridge/smart-money-concepts)

[](https://www.luxalgo.com/library/indicator/volume-profile-with-node-detection/)

[luxalgo.com](https://www.luxalgo.com/library/indicator/volume-profile-with-node-detection/)

[Volume Profile with Node Detection | Trading Indicator - LuxAlgo](https://www.luxalgo.com/library/indicator/volume-profile-with-node-detection/)

[Opens in a new window](https://www.luxalgo.com/library/indicator/volume-profile-with-node-detection/)

[](https://www.tradingview.com/scripts/search/volume%20profile/)

[tradingview.com](https://www.tradingview.com/scripts/search/volume%20profile/)

[Scripts Search Results for "volume profile" - TradingView](https://www.tradingview.com/scripts/search/volume%20profile/)

[Opens in a new window](https://www.tradingview.com/scripts/search/volume%20profile/)

[](https://www.luxalgo.com/blog/volume-based-support-and-resistance-explained/)

[luxalgo.com](https://www.luxalgo.com/blog/volume-based-support-and-resistance-explained/)

[Volume-Based Support and Resistance Explained - LuxAlgo](https://www.luxalgo.com/blog/volume-based-support-and-resistance-explained/)

[Opens in a new window](https://www.luxalgo.com/blog/volume-based-support-and-resistance-explained/)

[](https://github.com/bukosabino/ta)

[github.com](https://github.com/bukosabino/ta)

[bukosabino/ta: Technical Analysis Library using Pandas and Numpy - GitHub](https://github.com/bukosabino/ta)

[Opens in a new window](https://github.com/bukosabino/ta)

[](https://m.youtube.com/watch?v=pgFFLwoLHlw&pp=ygUPI3RlY2huaWNhbHRhc2Vl)

[m.youtube.com](https://m.youtube.com/watch?v=pgFFLwoLHlw&pp=ygUPI3RlY2huaWNhbHRhc2Vl)

[Top Technical Analysis (TA) libraries in python - YouTube](https://m.youtube.com/watch?v=pgFFLwoLHlw&pp=ygUPI3RlY2huaWNhbHRhc2Vl)

[Opens in a new window](https://m.youtube.com/watch?v=pgFFLwoLHlw&pp=ygUPI3RlY2huaWNhbHRhc2Vl)

[](https://gaper.io/algorithmic-trading-in-python/)

[gaper.io](https://gaper.io/algorithmic-trading-in-python/)

[How to Get Started with Algorithmic Trading in Python - Gaper.io](https://gaper.io/algorithmic-trading-in-python/)

[Opens in a new window](https://gaper.io/algorithmic-trading-in-python/)

[](https://stackoverflow.com/questions/8587047/support-resistance-algorithm-technical-analysis)

[stackoverflow.com](https://stackoverflow.com/questions/8587047/support-resistance-algorithm-technical-analysis)

[Support Resistance Algorithm - Technical analysis - Stack Overflow](https://stackoverflow.com/questions/8587047/support-resistance-algorithm-technical-analysis)

[Opens in a new window](https://stackoverflow.com/questions/8587047/support-resistance-algorithm-technical-analysis)

[](https://nurp.com/wisdom/mastering-market-data-analysis-for-algo-trading/)

[nurp.com](https://nurp.com/wisdom/mastering-market-data-analysis-for-algo-trading/)

[Mastering Market Data Analysis for Algo Trading - NURP](https://nurp.com/wisdom/mastering-market-data-analysis-for-algo-trading/)

[Opens in a new window](https://nurp.com/wisdom/mastering-market-data-analysis-for-algo-trading/)

[](https://www.utradealgos.com/blog/top-7-technical-indicators-for-algorithmic-traders)

[utradealgos.com](https://www.utradealgos.com/blog/top-7-technical-indicators-for-algorithmic-traders)

[Top 7 Technical Indicators for Algorithmic Traders - uTrade Algos](https://www.utradealgos.com/blog/top-7-technical-indicators-for-algorithmic-traders)

[Opens in a new window](https://www.utradealgos.com/blog/top-7-technical-indicators-for-algorithmic-traders)

[](https://github.com/julienraffaud/GMM)

[github.com](https://github.com/julienraffaud/GMM)

[julienraffaud/GMM: Gaussian mixture model for regime detection in financial time series](https://github.com/julienraffaud/GMM)

[Opens in a new window](https://github.com/julienraffaud/GMM)

[](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/market-regime-detection)

[developers.lseg.com](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/market-regime-detection)

[Market regime detection using Statistical and ML based approaches | Devportal](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/market-regime-detection)

[Opens in a new window](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/market-regime-detection)

[](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/applying-research/hidden-markov-models)

[quantconnect.com](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/applying-research/hidden-markov-models)

[Hidden Markov Models - QuantConnect.com](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/applying-research/hidden-markov-models)

[Opens in a new window](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/applying-research/hidden-markov-models)

[](https://github.com/LSEG-API-Samples/Article.RD.Python.MarketRegimeDetectionUsingStatisticalAndMLBasedApproaches/blob/main/Market%20regime%20detection.ipynb)

[github.com](https://github.com/LSEG-API-Samples/Article.RD.Python.MarketRegimeDetectionUsingStatisticalAndMLBasedApproaches/blob/main/Market%20regime%20detection.ipynb)

[Article.RD.Python ... - GitHub](https://github.com/LSEG-API-Samples/Article.RD.Python.MarketRegimeDetectionUsingStatisticalAndMLBasedApproaches/blob/main/Market%20regime%20detection.ipynb)

[Opens in a new window](https://github.com/LSEG-API-Samples/Article.RD.Python.MarketRegimeDetectionUsingStatisticalAndMLBasedApproaches/blob/main/Market%20regime%20detection.ipynb)

[](https://www.numberanalytics.com/blog/hmm-financial-forecasting-insights)

[numberanalytics.com](https://www.numberanalytics.com/blog/hmm-financial-forecasting-insights)

[5 Data Science Insights: Hidden Markov Model in Financial Forecasting - Number Analytics](https://www.numberanalytics.com/blog/hmm-financial-forecasting-insights)

[Opens in a new window](https://www.numberanalytics.com/blog/hmm-financial-forecasting-insights)

[](https://questdb.com/glossary/market-regime-detection-using-hidden-markov-models/)

[questdb.com](https://questdb.com/glossary/market-regime-detection-using-hidden-markov-models/)

[Market Regime Detection Using Hidden Markov Models - QuestDB](https://questdb.com/glossary/market-regime-detection-using-hidden-markov-models/)

[Opens in a new window](https://questdb.com/glossary/market-regime-detection-using-hidden-markov-models/)

[](https://arxiv.org/abs/2306.15835)

[arxiv.org](https://arxiv.org/abs/2306.15835)

[[2306.15835] Non-parametric online market regime detection and regime clustering for multidimensional and path-dependent data structures - arXiv](https://arxiv.org/abs/2306.15835)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/abs/2306.15835)

[](http://eprints.lse.ac.uk/125341/1/toth24random.pdf)

[eprints.lse.ac.uk](http://eprints.lse.ac.uk/125341/1/toth24random.pdf)

[eprints.lse.ac.uk](http://eprints.lse.ac.uk/125341/1/toth24random.pdf)

[Opens in a new window](http://eprints.lse.ac.uk/125341/1/toth24random.pdf)

[](https://www.semanticscholar.org/paper/Signature-Methods-in-Machine-Learning-Lyons-McLeod/d3c011c1fe53d2991cc337e234ad23c4398bff79)

[semanticscholar.org](https://www.semanticscholar.org/paper/Signature-Methods-in-Machine-Learning-Lyons-McLeod/d3c011c1fe53d2991cc337e234ad23c4398bff79)

[[PDF] Signature Methods in Machine Learning - Semantic Scholar](https://www.semanticscholar.org/paper/Signature-Methods-in-Machine-Learning-Lyons-McLeod/d3c011c1fe53d2991cc337e234ad23c4398bff79)

[Opens in a new window](https://www.semanticscholar.org/paper/Signature-Methods-in-Machine-Learning-Lyons-McLeod/d3c011c1fe53d2991cc337e234ad23c4398bff79)



פיתוח מערכת מסחר מרובת סוכנים מבוססת למידת חיזוק, נתוני רמה 2, זיהוי משטרים וסופרפוזיציה קוונטית למסחר בחוזים עתידיים.docx



[quantconnect.com](https://www.quantconnect.com/research/18811/optimizing-a-gold-spy-portfolio-using-hidden-markov-models-for-market-downtime/)

[Optimizing a Gold-SPY Portfolio Using Hidden Markov Models for Market Downtime](https://www.quantconnect.com/research/18811/optimizing-a-gold-spy-portfolio-using-hidden-markov-models-for-market-downtime/)

[Opens in a new window](https://www.quantconnect.com/research/18811/optimizing-a-gold-spy-portfolio-using-hidden-markov-models-for-market-downtime/)

[](https://scikit-learn.org/stable/modules/mixture.html)

[scikit-learn.org](https://scikit-learn.org/stable/modules/mixture.html)

[2.1. Gaussian mixture models — scikit-learn 1.6.1 documentation](https://scikit-learn.org/stable/modules/mixture.html)

[Opens in a new window](https://scikit-learn.org/stable/modules/mixture.html)

[](https://fsc.stevens.edu/market-regimes-in-quantitative-wealth-and-investment-management/)

[fsc.stevens.edu](https://fsc.stevens.edu/market-regimes-in-quantitative-wealth-and-investment-management/)

[Market Regimes in Quantitative Wealth and Investment Management](https://fsc.stevens.edu/market-regimes-in-quantitative-wealth-and-investment-management/)

[Opens in a new window](https://fsc.stevens.edu/market-regimes-in-quantitative-wealth-and-investment-management/)

[](https://www.quantconnect.com/docs/v2/writing-algorithms/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[quantconnect.com](https://www.quantconnect.com/docs/v2/writing-algorithms/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[Hmmlearn - QuantConnect.com](https://www.quantconnect.com/docs/v2/writing-algorithms/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[Opens in a new window](https://www.quantconnect.com/docs/v2/writing-algorithms/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[quantconnect.com](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[Hmmlearn - QuantConnect.com](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[Opens in a new window](https://www.quantconnect.com/docs/v2/research-environment/machine-learning/popular-libraries/hmmlearn)

[](https://intellipaat.com/blog/hidden-markov-model/)

[intellipaat.com](https://intellipaat.com/blog/hidden-markov-model/)

[Hidden Markov Models: A Comprehensive Guide - Intellipaat](https://intellipaat.com/blog/hidden-markov-model/)

[Opens in a new window](https://intellipaat.com/blog/hidden-markov-model/)

[](https://www.numberanalytics.com/blog/deep-understanding-hidden-markov-models-sequence-analysis)

[numberanalytics.com](https://www.numberanalytics.com/blog/deep-understanding-hidden-markov-models-sequence-analysis)

[Deep Understanding of Hidden Markov Models in Sequence Analysis - Number Analytics](https://www.numberanalytics.com/blog/deep-understanding-hidden-markov-models-sequence-analysis)

[Opens in a new window](https://www.numberanalytics.com/blog/deep-understanding-hidden-markov-models-sequence-analysis)

[](https://www.reddit.com/r/algotrading/comments/1k6b8vl/hmmbased_regime_detection_with_unified_plotting/)

[reddit.com](https://www.reddit.com/r/algotrading/comments/1k6b8vl/hmmbased_regime_detection_with_unified_plotting/)

[HMM-Based Regime Detection with Unified Plotting Feature Selection Example - Reddit](https://www.reddit.com/r/algotrading/comments/1k6b8vl/hmmbased_regime_detection_with_unified_plotting/)

[Opens in a new window](https://www.reddit.com/r/algotrading/comments/1k6b8vl/hmmbased_regime_detection_with_unified_plotting/)

[](https://hmmlearn.readthedocs.io/en/latest/tutorial.html)

[hmmlearn.readthedocs.io](https://hmmlearn.readthedocs.io/en/latest/tutorial.html)

[Tutorial — hmmlearn 0.3.3.post1+ge01a10e documentation](https://hmmlearn.readthedocs.io/en/latest/tutorial.html)

[Opens in a new window](https://hmmlearn.readthedocs.io/en/latest/tutorial.html)

[](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1gc2z6y/ppo_takes_upper_range_of_actions_compared_to_sac/)

[reddit.com](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1gc2z6y/ppo_takes_upper_range_of_actions_compared_to_sac/)

[PPO takes upper range of actions compared to SAC. Why? : r/reinforcementlearning - Reddit](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1gc2z6y/ppo_takes_upper_range_of_actions_compared_to_sac/)

[Opens in a new window](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1gc2z6y/ppo_takes_upper_range_of_actions_compared_to_sac/)

[](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1hzg1mv/sac_for_hybrid_action_space/)

[reddit.com](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1hzg1mv/sac_for_hybrid_action_space/)

[SAC for Hybrid Action Space : r/reinforcementlearning - Reddit](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1hzg1mv/sac_for_hybrid_action_space/)

[Opens in a new window](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1hzg1mv/sac_for_hybrid_action_space/)

[](https://www.researchgate.net/publication/389146816_A_Review_of_Multi-Agent_Reinforcement_Learning_Algorithms)

[researchgate.net](https://www.researchgate.net/publication/389146816_A_Review_of_Multi-Agent_Reinforcement_Learning_Algorithms)

[A Review of Multi-Agent Reinforcement Learning Algorithms - ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/389146816_A_Review_of_Multi-Agent_Reinforcement_Learning_Algorithms)

[Opens in a new window](https://www.researchgate.net/publication/389146816_A_Review_of_Multi-Agent_Reinforcement_Learning_Algorithms)

[](https://docs.databricks.com/gcp/en/machine-learning/automl-hyperparam-tuning)

[docs.databricks.com](https://docs.databricks.com/gcp/en/machine-learning/automl-hyperparam-tuning)

[Hyperparameter tuning - Databricks Documentation](https://docs.databricks.com/gcp/en/machine-learning/automl-hyperparam-tuning)

[Opens in a new window](https://docs.databricks.com/gcp/en/machine-learning/automl-hyperparam-tuning)

[](https://www.findingtheta.com/blog/comparing-how-ppo-sac-and-dqn-perform-on-gymnasiums-lunar-lander)

[findingtheta.com](https://www.findingtheta.com/blog/comparing-how-ppo-sac-and-dqn-perform-on-gymnasiums-lunar-lander)

[Comparing how PPO, SAC, and DQN Perform on Gymnasium's Lunar Lander](https://www.findingtheta.com/blog/comparing-how-ppo-sac-and-dqn-perform-on-gymnasiums-lunar-lander)

[Opens in a new window](https://www.findingtheta.com/blog/comparing-how-ppo-sac-and-dqn-perform-on-gymnasiums-lunar-lander)

[](https://docs.ray.io/en/latest/tune/examples/optuna_example.html)

[docs.ray.io](https://docs.ray.io/en/latest/tune/examples/optuna_example.html)

[Running Tune experiments with Optuna - Ray Docs](https://docs.ray.io/en/latest/tune/examples/optuna_example.html)

[Opens in a new window](https://docs.ray.io/en/latest/tune/examples/optuna_example.html)

[](https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/820)

[mdpi.com](https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/820)

[A Review of Multi-Agent Reinforcement Learning Algorithms - MDPI](https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/820)

[Opens in a new window](https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/820)

[](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/944)

[mdpi.com](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/944)

[Hybrid Deep Reinforcement Learning for Pairs Trading - MDPI](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/944)

[Opens in a new window](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/944)

[](https://openreview.net/references/pdf?id=e6dX6ChzPkT)

[openreview.net](https://openreview.net/references/pdf?id=e6dX6ChzPkT)

[MARLLIB: EXTENDING RLLIB FOR MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING - OpenReview](https://openreview.net/references/pdf?id=e6dX6ChzPkT)

[Opens in a new window](https://openreview.net/references/pdf?id=e6dX6ChzPkT)

[](https://www.researchgate.net/publication/364732846_MARLlib_Extending_RLlib_for_Multi-agent_Reinforcement_Learning)

[researchgate.net](https://www.researchgate.net/publication/364732846_MARLlib_Extending_RLlib_for_Multi-agent_Reinforcement_Learning)

[MARLlib: Extending RLlib for Multi-agent Reinforcement Learning - ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/364732846_MARLlib_Extending_RLlib_for_Multi-agent_Reinforcement_Learning)

[Opens in a new window](https://www.researchgate.net/publication/364732846_MARLlib_Extending_RLlib_for_Multi-agent_Reinforcement_Learning)

[](https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2024/file/5aee125f052c90e326dcf6f380df94f6-Paper-Datasets_and_Benchmarks_Track.pdf)

[papers.nips.cc](https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2024/file/5aee125f052c90e326dcf6f380df94f6-Paper-Datasets_and_Benchmarks_Track.pdf)

[JaxMARL: Multi-Agent RL Environments and Algorithms in JAX - NIPS papers](https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2024/file/5aee125f052c90e326dcf6f380df94f6-Paper-Datasets_and_Benchmarks_Track.pdf)

[Opens in a new window](https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2024/file/5aee125f052c90e326dcf6f380df94f6-Paper-Datasets_and_Benchmarks_Track.pdf)

[](https://arxiv.org/html/2502.17518v1)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2502.17518v1)

[Ensemble RL through Classifier Models: Enhancing Risk-Return Trade-offs in Trading Strategies - arXiv](https://arxiv.org/html/2502.17518v1)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2502.17518v1)

[](https://openreview.net/forum?id=B1lqDertwr)

[openreview.net](https://openreview.net/forum?id=B1lqDertwr)

[Regularization Matters in Policy Optimization | OpenReview](https://openreview.net/forum?id=B1lqDertwr)

[Opens in a new window](https://openreview.net/forum?id=B1lqDertwr)

[](https://www.aalpha.net/blog/how-to-build-multi-agent-ai-system/)

[aalpha.net](https://www.aalpha.net/blog/how-to-build-multi-agent-ai-system/)

[How to Build a Multi-Agent AI System : In-Depth Guide](https://www.aalpha.net/blog/how-to-build-multi-agent-ai-system/)

[Opens in a new window](https://www.aalpha.net/blog/how-to-build-multi-agent-ai-system/)

[](https://strategyquant.com/doc/strategyquant/walk-forward-optimization/#:~:text=It%20is%20a%20technique%20in,repeated%20over%20subsequent%20time%20segments.)

[strategyquant.com](https://strategyquant.com/doc/strategyquant/walk-forward-optimization/#:~:text=It%20is%20a%20technique%20in,repeated%20over%20subsequent%20time%20segments.)

[strategyquant.com](https://strategyquant.com/doc/strategyquant/walk-forward-optimization/#:~:text=It%20is%20a%20technique%20in,repeated%20over%20subsequent%20time%20segments.)

[Opens in a new window](https://strategyquant.com/doc/strategyquant/walk-forward-optimization/#:~:text=It%20is%20a%20technique%20in,repeated%20over%20subsequent%20time%20segments.)

[](https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/the-future-of-backtesting-a-deep-dive-into-walk-forward-analysis/)

[interactivebrokers.com](https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/the-future-of-backtesting-a-deep-dive-into-walk-forward-analysis/)

[The Future of Backtesting: A Deep Dive into Walk Forward Analysis - Interactive Brokers](https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/the-future-of-backtesting-a-deep-dive-into-walk-forward-analysis/)

[Opens in a new window](https://www.interactivebrokers.com/campus/ibkr-quant-news/the-future-of-backtesting-a-deep-dive-into-walk-forward-analysis/)

[](https://marllib.readthedocs.io/en/latest/algorithm/jointQ_family.html)

[marllib.readthedocs.io](https://marllib.readthedocs.io/en/latest/algorithm/jointQ_family.html)

[Joint Q Learning Family — MARLlib v1.0.0 documentation](https://marllib.readthedocs.io/en/latest/algorithm/jointQ_family.html)

[Opens in a new window](https://marllib.readthedocs.io/en/latest/algorithm/jointQ_family.html)

[](http://www.jidiai.cn/algorithm)

[jidiai.cn](http://www.jidiai.cn/algorithm)

[Algorithm - 及第 Jidi](http://www.jidiai.cn/algorithm)

[Opens in a new window](http://www.jidiai.cn/algorithm)

[](http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1899230)

[kth.diva-portal.org](http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1899230)

[Rollout-based Shapley Values for Explainable Cooperative Multi-Agent Reinforcement Learning - kth .diva](http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1899230)

[Opens in a new window](http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1899230)

[](https://arxiv.org/html/2503.00372v1)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2503.00372v1)

[Nucleolus Credit Assignment for Effective Coalitions in Multi-agent Reinforcement Learning](https://arxiv.org/html/2503.00372v1)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2503.00372v1)

[](https://bigul.co/blog/algo-trading/how-to-design-a-reward-function-for-trading-scenarios-in-algorithmic-trading)

[bigul.co](https://bigul.co/blog/algo-trading/how-to-design-a-reward-function-for-trading-scenarios-in-algorithmic-trading)

[How To Design A Reward Function For Trading Scenarios In Algorithmic Trading? - Bigul](https://bigul.co/blog/algo-trading/how-to-design-a-reward-function-for-trading-scenarios-in-algorithmic-trading)

[Opens in a new window](https://bigul.co/blog/algo-trading/how-to-design-a-reward-function-for-trading-scenarios-in-algorithmic-trading)

[](https://www.mdpi.com/2227-7390/12/24/4020)

[mdpi.com](https://www.mdpi.com/2227-7390/12/24/4020)

[A Self-Rewarding Mechanism in Deep Reinforcement Learning for Trading Strategy Optimization - MDPI](https://www.mdpi.com/2227-7390/12/24/4020)

[Opens in a new window](https://www.mdpi.com/2227-7390/12/24/4020)

[](https://powerdrill.ai/discover/discover-Assigning-Credit-with-clzn6yxhi0ohh01758rth00sq)

[powerdrill.ai](https://powerdrill.ai/discover/discover-Assigning-Credit-with-clzn6yxhi0ohh01758rth00sq)

[Assigning Credit with Partial Reward Decoupling in Multi-Agent Proximal Policy Optimization - Powerdrill](https://powerdrill.ai/discover/discover-Assigning-Credit-with-clzn6yxhi0ohh01758rth00sq)

[Opens in a new window](https://powerdrill.ai/discover/discover-Assigning-Credit-with-clzn6yxhi0ohh01758rth00sq)

[](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1kpgw5v/mappo_implementation_with_rllib/)

[reddit.com](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1kpgw5v/mappo_implementation_with_rllib/)

[MAPPO implementation with rllib : r/reinforcementlearning - Reddit](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1kpgw5v/mappo_implementation_with_rllib/)

[Opens in a new window](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1kpgw5v/mappo_implementation_with_rllib/)

[](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1ig2tlk/hybrid_action_space_implementations/)

[reddit.com](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1ig2tlk/hybrid_action_space_implementations/)

[Hybrid Action Space Implementations : r/reinforcementlearning - Reddit](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1ig2tlk/hybrid_action_space_implementations/)

[Opens in a new window](https://www.reddit.com/r/reinforcementlearning/comments/1ig2tlk/hybrid_action_space_implementations/)

[](https://docs.ray.io/en/latest/rllib/rllib-algorithms.html)

[docs.ray.io](https://docs.ray.io/en/latest/rllib/rllib-algorithms.html)

[Algorithms — Ray 2.46.0 - Ray Docs](https://docs.ray.io/en/latest/rllib/rllib-algorithms.html)

[Opens in a new window](https://docs.ray.io/en/latest/rllib/rllib-algorithms.html)

[](https://arxiv.org/html/2410.14383v3)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2410.14383v3)

[MARLIN: Multi-Agent Reinforcement Learning Guided by Language-Based Inter-Robot Negotiation - arXiv](https://arxiv.org/html/2410.14383v3)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2410.14383v3)

[](https://arxiv.org/html/2410.18631v2)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2410.18631v2)

[Leveraging Graph Neural Networks and Multi-Agent Reinforcement Learning for Inventory Control in Supply Chains - arXiv](https://arxiv.org/html/2410.18631v2)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2410.18631v2)

[](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/ppo_with_custom_loss_fn.py)

[github.com](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/ppo_with_custom_loss_fn.py)

[ray/rllib/examples/learners/ppo\_with\_custom\_loss\_fn.py at master - GitHub](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/ppo_with_custom_loss_fn.py)

[Opens in a new window](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/ppo_with_custom_loss_fn.py)

[](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/separate_vf_lr_and_optimizer.py)

[github.com](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/separate_vf_lr_and_optimizer.py)

[ray/rllib/examples/learners/separate\_vf\_lr\_and\_optimizer.py at master - GitHub](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/separate_vf_lr_and_optimizer.py)

[Opens in a new window](https://github.com/ray-project/ray/blob/master/rllib/examples/learners/separate_vf_lr_and_optimizer.py)

Sources read but not used in the report



[marketstack.com](https://marketstack.com/)

[Free Stock Market Data API for Real-Time & Historical Data](https://marketstack.com/)

[Opens in a new window](https://marketstack.com/)

[](https://accelpix.com/fin-alg/)

[accelpix.com](https://accelpix.com/fin-alg/)

[NinjaTrader Indicators | Market Profile TPO | Order Flow](https://accelpix.com/fin-alg/)

[Opens in a new window](https://accelpix.com/fin-alg/)

[](https://github.com/furechan/mintalib)

[github.com](https://github.com/furechan/mintalib)

[furechan/mintalib: Minimal Technical Analysis Library for Python - GitHub](https://github.com/furechan/mintalib)

[Opens in a new window](https://github.com/furechan/mintalib)

[](https://pypi.org/project/PyTechnicalIndicators/)

[pypi.org](https://pypi.org/project/PyTechnicalIndicators/)

[PyTechnicalIndicators - PyPI](https://pypi.org/project/PyTechnicalIndicators/)

[Opens in a new window](https://pypi.org/project/PyTechnicalIndicators/)

[](https://arxiv.org/html/2407.13685v1?utm_source=chatgpt.com)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2407.13685v1?utm_source=chatgpt.com)

[Beyond Trend Following: Deep Learning for Market Trend Prediction - arXiv](https://arxiv.org/html/2407.13685v1?utm_source=chatgpt.com)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2407.13685v1?utm_source=chatgpt.com)

[](https://in.tradingview.com/scripts/machinelearningtrend/)

[in.tradingview.com](https://in.tradingview.com/scripts/machinelearningtrend/)

[Machinelearningtrend — Indicators and Strategies — TradingView — India](https://in.tradingview.com/scripts/machinelearningtrend/)

[Opens in a new window](https://in.tradingview.com/scripts/machinelearningtrend/)

[](https://www.luxalgo.com/library/indicator/breakaway-fair-value-gaps/)

[luxalgo.com](https://www.luxalgo.com/library/indicator/breakaway-fair-value-gaps/)

[Breakaway Fair Value Gaps | Trading Indicator - LuxAlgo](https://www.luxalgo.com/library/indicator/breakaway-fair-value-gaps/)

[Opens in a new window](https://www.luxalgo.com/library/indicator/breakaway-fair-value-gaps/)

[](https://www.luxalgo.com/library/)

[luxalgo.com](https://www.luxalgo.com/library/)

[Trading Indicator Library - LuxAlgo](https://www.luxalgo.com/library/)

[Opens in a new window](https://www.luxalgo.com/library/)

[](https://dmg.org/pmml/v4-1/KNN.html)

[dmg.org](https://dmg.org/pmml/v4-1/KNN.html)

[PMML 4.1 - Nearest Neighbors - Data Mining Group](https://dmg.org/pmml/v4-1/KNN.html)

[Opens in a new window](https://dmg.org/pmml/v4-1/KNN.html)

[](https://www.zeiierman.com/indicators/ai-trend-navigator)

[zeiierman.com](https://www.zeiierman.com/indicators/ai-trend-navigator)

[AI Trend Navigator - Zeiierman Trading](https://www.zeiierman.com/indicators/ai-trend-navigator)

[Opens in a new window](https://www.zeiierman.com/indicators/ai-trend-navigator)

[](https://www.tradingview.com/script/sHevuJyQ-Machine-Learning-RSI-BullVision/)

[tradingview.com](https://www.tradingview.com/script/sHevuJyQ-Machine-Learning-RSI-BullVision/)

[Machine Learning RSI BullVision — Indicator by BullVisionCapital - TradingView](https://www.tradingview.com/script/sHevuJyQ-Machine-Learning-RSI-BullVision/)

[Opens in a new window](https://www.tradingview.com/script/sHevuJyQ-Machine-Learning-RSI-BullVision/)

[](https://arxiv.org/html/2503.15403v1)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2503.15403v1)

[HQNN-FSP: A Hybrid Classical-Quantum Neural Network for Regression-Based Financial Stock Market Prediction - arXiv](https://arxiv.org/html/2503.15403v1)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2503.15403v1)

[](https://arxiv.org/html/2505.03949v1)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2505.03949v1)

[Project Report : CS 7643 - arXiv](https://arxiv.org/html/2505.03949v1)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2505.03949v1)

[](https://arxiv.org/html/2503.22192v1)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2503.22192v1)

[An Advanced Ensemble Deep Learning Framework for Stock Price Prediction Using VAE, Transformer, and LSTM Model - arXiv](https://arxiv.org/html/2503.22192v1)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2503.22192v1)

[](https://www.scribd.com/document/434144049/How-to-Read-a-Market-Profile-Chart-docx)

[scribd.com](https://www.scribd.com/document/434144049/How-to-Read-a-Market-Profile-Chart-docx)

[How To Read A Market Profile Chart | PDF | Technical Analysis | Day Trading - Scribd](https://www.scribd.com/document/434144049/How-to-Read-a-Market-Profile-Chart-docx)

[Opens in a new window](https://www.scribd.com/document/434144049/How-to-Read-a-Market-Profile-Chart-docx)

[](https://toslc.thinkorswim.com/center/reference/Tech-Indicators/studies-library/R-S/RSI)

[toslc.thinkorswim.com](https://toslc.thinkorswim.com/center/reference/Tech-Indicators/studies-library/R-S/RSI)

[RSI - thinkorswim Learning Center](https://toslc.thinkorswim.com/center/reference/Tech-Indicators/studies-library/R-S/RSI)

[Opens in a new window](https://toslc.thinkorswim.com/center/reference/Tech-Indicators/studies-library/R-S/RSI)

[](https://www.tradingview.com/script/aMpB6R92-Weighted-Relative-Strength-Index-SeerQuant/)

[tradingview.com](https://www.tradingview.com/script/aMpB6R92-Weighted-Relative-Strength-Index-SeerQuant/)

[Weighted Relative Strength Index [SeerQuant] - TradingView](https://www.tradingview.com/script/aMpB6R92-Weighted-Relative-Strength-Index-SeerQuant/)

[Opens in a new window](https://www.tradingview.com/script/aMpB6R92-Weighted-Relative-Strength-Index-SeerQuant/)

[](https://www.kaggle.com/code/gorkemgunay/understanding-parameters-of-knn)

[kaggle.com](https://www.kaggle.com/code/gorkemgunay/understanding-parameters-of-knn)

[Understanding Parameters of KNN - Kaggle](https://www.kaggle.com/code/gorkemgunay/understanding-parameters-of-knn)

[Opens in a new window](https://www.kaggle.com/code/gorkemgunay/understanding-parameters-of-knn)

[](https://www.datasciencecentral.com/time-series-forecasting-knn-vs-arima/)

[datasciencecentral.com](https://www.datasciencecentral.com/time-series-forecasting-knn-vs-arima/)

[Time Series Forecasting: KNN vs. ARIMA - DataScienceCentral.com](https://www.datasciencecentral.com/time-series-forecasting-knn-vs-arima/)

[Opens in a new window](https://www.datasciencecentral.com/time-series-forecasting-knn-vs-arima/)

[](https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-natural-sciences/department-of-mathematics/math-finance/212236006---James-Mc-Greevy---MCGREEVY_JAMES_01075416.pdf)

[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-natural-sciences/department-of-mathematics/math-finance/212236006---James-Mc-Greevy---MCGREEVY_JAMES_01075416.pdf)

[Detecting multivariate market regimes via clustering algorithms - Imperial College London](https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-natural-sciences/department-of-mathematics/math-finance/212236006---James-Mc-Greevy---MCGREEVY_JAMES_01075416.pdf)

[Opens in a new window](https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-natural-sciences/department-of-mathematics/math-finance/212236006---James-Mc-Greevy---MCGREEVY_JAMES_01075416.pdf)

[](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/time-series-forecasting-with-data-library-for-python)

[developers.lseg.com](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/time-series-forecasting-with-data-library-for-python)

[Time Series Forecasting with Data Library for Python - LSEG Developer Community](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/time-series-forecasting-with-data-library-for-python)

[Opens in a new window](https://developers.lseg.com/en/article-catalog/article/time-series-forecasting-with-data-library-for-python)

[](https://blog.mlq.ai/python-for-finance-time-series-analysis/)

[blog.mlq.ai](https://blog.mlq.ai/python-for-finance-time-series-analysis/)

[Python for Finance: Time Series Analysis - MLQ.ai](https://blog.mlq.ai/python-for-finance-time-series-analysis/)

[Opens in a new window](https://blog.mlq.ai/python-for-finance-time-series-analysis/)

[](https://alphaarchitect.com/regime-detection/)

[alphaarchitect.com](https://alphaarchitect.com/regime-detection/)

[A New Approach to Regime Detection and Factor Timing - Alpha Architect](https://alphaarchitect.com/regime-detection/)

[Opens in a new window](https://alphaarchitect.com/regime-detection/)

[](https://questdb.com/glossary/market-regime-change-detection-with-ml/)

[questdb.com](https://questdb.com/glossary/market-regime-change-detection-with-ml/)

[Market Regime Change Detection with ML - QuestDB](https://questdb.com/glossary/market-regime-change-detection-with-ml/)

[Opens in a new window](https://questdb.com/glossary/market-regime-change-detection-with-ml/)

[](https://github.com/etatx0/Regime-Switch)

[github.com](https://github.com/etatx0/Regime-Switch)

[etatx0/Regime-Switch: Detection of GARCH volatility ... - GitHub](https://github.com/etatx0/Regime-Switch)

[Opens in a new window](https://github.com/etatx0/Regime-Switch)

[](https://core.ac.uk/download/pdf/46921626.pdf)

[core.ac.uk](https://core.ac.uk/download/pdf/46921626.pdf)

[Theory and Inference for a Markov-Switching GARCH Model - CORE](https://core.ac.uk/download/pdf/46921626.pdf)

[Opens in a new window](https://core.ac.uk/download/pdf/46921626.pdf)

[](https://www.lancaster.ac.uk/~romano/post/change_point_online_intro/)

[lancaster.ac.uk](https://www.lancaster.ac.uk/~romano/post/change_point_online_intro/)

[How to Perform Online (or Real-Time) Changepoint Detection in Python - Gaetano Romano](https://www.lancaster.ac.uk/~romano/post/change_point_online_intro/)

[Opens in a new window](https://www.lancaster.ac.uk/~romano/post/change_point_online_intro/)

[](https://github.com/deepcharles/ruptures)

[github.com](https://github.com/deepcharles/ruptures)

[deepcharles/ruptures - change point detection in Python - GitHub](https://github.com/deepcharles/ruptures)

[Opens in a new window](https://github.com/deepcharles/ruptures)

[](https://arxiv.org/html/2407.19848v3)

[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2407.19848v3)

[Generative model for financial time series trained with MMD using a signature kernel - arXiv](https://arxiv.org/html/2407.19848v3)

[Opens in a new window](https://arxiv.org/html/2407.19848v3)

[](https://stackoverflow.com/questions/55152121/regime-switching-multivariate-garch)

[stackoverflow.com](https://stackoverflow.com/questions/55152121/regime-switching-multivariate-garch)

[regime switching multivariate garch - python - Stack Overflow](https://stackoverflow.com/questions/55152121/regime-switching-multivariate-garch)

[Opens in a new window](https://stackoverflow.com/questions/55152121/regime-switching-multivariate-garch)

[](https://stackoverflow.com/questions/58922346/difference-between-gmm-and-hmm)

[stackoverflow.com](https://stackoverflow.com/questions/58922346/difference-between-gmm-and-hmm)

[Difference between GMM and HMM - gaussian - Stack Overflow](https://stackoverflow.com/questions/58922346/difference-between-gmm-and-hmm)

[Opens in a new window](https://stackoverflow.com/questions/58922346/difference-between-gmm-and-hmm)

[](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9291560/)

[pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9291560/)

[Modelling state‐transition dynamics in resting‐state brain signals by the hidden Markov and Gaussian mixture models - PMC - PubMed Central](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9291560/)

[Opens in a new window](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9291560/)

[](https://kernc.github.io/backtesting.py/)

[kernc.github.io](https://kernc.github.io/backtesting.py/)

[Backtesting.py - Backtest trading strategies in Python](https://kernc.github.io/backtesting.py/)

[Opens in a new window](https://kernc.github.io/backtesting.py/)

[](https://docs.pytrade.org/trading)

[docs.pytrade.org](https://docs.pytrade.org/trading)

[Trading Frameworks, support backtesting and live trading - PyTrade.org!](https://docs.pytrade.org/trading)

[Opens in a new window](https://docs.pytrade.org/trading)

[](https://discuss.ray.io/t/marl-mapping-policy-examples-not-working/9081)

[discuss.ray.io](https://discuss.ray.io/t/marl-mapping-policy-examples-not-working/9081)

[MARL mapping policy examples not working - RLlib - Ray](https://discuss.ray.io/t/marl-mapping-policy-examples-not-working/9081)

[Opens in a new window](https://discuss.ray.io/t/marl-mapping-policy-examples-not-working/9081)

Thoughts