



תחזית שער הביטקוין עד סוף שנת 2025 באמצעות טכניקה אקטוארית הנקראת "סימולציית מונטה קרלו"

הכלכלן המוערך **האקטואר רועי פוליבצר** מספק תחזית לשער הביטקוין עד סוף שנת 2025 באמצעות טכניקה אקטוארית הנקראת "סימולציית מונטה קרלו". טכניקה אקטוארית זו נמצאת בשימוש רחב בעולם הפיננסים, ההשקעות בהנדסה, ביולוגיה חישובית, כימיה וסטטיסטיקה יישומית ומהווה כלי עזר חשוב בקבלת החלטות.

התקפות הסטטיסטית עולה ככל שמספר הדגימות רב יותר או השונות של המשתנה הנדגם קטנה יותר.

לסיכום, "סימולציית מונטה קרלו" בנויה על דגימה אקראית של גורמי סיכון מתוך התפלגות מתאימה, כאשר על סמך הדגימה נוצרים מסלולים דמוייים של שיעורים בגורמי סיכון לאורך זמן. במסגרת הטכניקה, בוונים התפלגות מחירים עתידיים לשער הביטקוין בכל מסלול ומסלול, כאשר הממוצע של כל המחירים העתידיים בסוף כל מסלול מכל המסלולים מהווה קירוב לתחזית שער הביטקוין עד סוף שנת 2025.

מדובר בטכניקה מתמטית לפתרון בעיות חישוביות באמצעות מספרים אקראיים, כאשר למרות המקורות שבמסגרת האקראיים, הטכניקה מאפשרת להגיע לרמת דיוק גבוהה על ידי שימוש בחוק המספרים הגדולים. רמת הדיוק של הטכניקה נמדדת על ידי פרמטר ענקרא Standard error of sample mean אשר מהווה אינדיקציה לאיכות התוצאה.

Summary Statistics for BTC/USD in 2025

| Statistics | Percentile | |
|------------|------------|------------|
| Minimum | 5% | 29,428.07 |
| Maximum | 10% | 38,793.13 |
| Mean | 15% | 47,394.33 |
| Std Dev | 20% | 55,099.19 |
| Variance | 25% | 62,242.64 |
| Skewness | 30% | 69,541.39 |
| Kurtosis | 35% | 75,859.60 |
| Median | 40% | 83,308.74 |
| Mode | 45% | 91,454.54 |
| Left X | 50% | 100,412.11 |
| Left P | 55% | 109,521.40 |
| Right X | 60% | 120,123.25 |
| Right P | 65% | 131,902.06 |
| Diff X | 70% | 144,851.23 |
| Diff P | 75% | 161,514.58 |
| #Errors | 80% | 180,838.42 |
| Filter Min | 85% | 204,090.20 |
| Filter Max | 90% | 240,153.20 |
| #Filtered | 95% | 305,470.84 |

מניתוח המודל האקטוארי שלי עולה כי התחזית שלי לשער הביטקוין עד סוף שנת 2025, בטווח של סטיית תקן אחת, נעה בטווח שבין 33,341.07 דולר ארה"ב לבין 216,467.07 דולר ארה"ב.

אם נחליט שהאומד לתוחלת הצפייה של שער הביטקוין עד סוף שנת 2025 הוא ממוצע התפלגות שיערי הביטקוין העתידיים לעיל, אזי למעשה התחזית שלנו לשער הביטקוין עד סוף שנת 2025 היא **124,904.07 דולר ארה"ב**. לחילופין, אם נחליט שהאומד לתוחלת הצפייה של שער הביטקוין עד סוף שנת 2025 הוא הציפייה התפלגות שיערי הביטקוין העתידיים לעיל, אז למעשה התחזית שלנו לשער הביטקוין עד סוף שנת 2025 היא **100,412.11 דולר ארה"ב**. לחילופין חלופי, אם נחליט שהאומד לתוחלת הצפייה של שער הביטקוין עד סוף שנת 2025 הוא שכיח התפלגות שיערי הביטקוין העתידיים לעיל, ולמעשה התחזית שלנו לשער הביטקוין עד סוף שנת 2025 היא **75,920.15 דולר ארה"ב**.

אז אלו הסתברויות המודל האקטוארי מספק? המודל האקטוארי קובע שקיימת הסתברות של 5% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה נמוך או שווה ל-29,428.07 דולר ארה"ב. במילים אחרות, המודל האקטוארי גורס כי קיים סיכון של 95% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה גבוה יותר מ-29,428.07 דולר ארה"ב. בנוסף, המודל האקטוארי קובע שישנה הסתברות של 35% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה נמוך או שווה ל-75,859.60 דולר ארה"ב. במילים אחרות, המודל האקטוארי גורס כי קיים סיכון של 65% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה גבוה יותר מ-75,859.60 דולר ארה"ב. עוד קובע המודל האקטוארי שישנה הסתברות של 65% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה נמוך או שווה ל-131,902.06 דולר ארה"ב. במילים אחרות, המודל האקטוארי גורס כי קיים סיכון של 35% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה גבוה יותר מ-131,902.06 דולר ארה"ב. ולבסוף המודל האקטוארי קובע גם שישנה הסתברות של 95% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה נמוך או שווה ל-305,470.84 דולר ארה"ב. במילים אחרות, המודל האקטוארי גורס כי קיים סיכון של 5% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה גבוה יותר מ-305,470.84 דולר ארה"ב. כך שפרש את יותר הסתברויות הנקובות בטבלה לעיל.

מהתוצאות לעיל, אנו למדים שהמודל האקטוארי מנבא ברמת ביטחון של 90% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 ייפול בטווח שבין 29,428.07 דולר ארה"ב לבין 305,470.84 דולר ארה"ב (בתוחלת כ-124,904.07 דולר ארה"ב). כלומר, קיימת רמת מובהקות של 5% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה נמוך יותר מ-29,428.07 דולר ארה"ב ורמת מובהקות נוספת של 5% ששער הביטקוין עד סוף שנת 2025 יהיה גבוה יותר מ-305,470.84 דולר ארה"ב.

שיעורי התשואות שלהם נראים הרבה יותר סטטיסטיים מאשר השינויים הגולמיים שלהם, $\Delta S/S$. ΔS מייצג את התשואה הנובעת מעליית ערך הביטקוין, ולכן נסמנה ב- μ כמייצג את התשואה הכוללת הצפויה על שער הביטקוין. מודל זה חשוב במיוחד מכיוון שהוא התהליך הסטוכסטי העומד מאחורי נוסחת Black-Scholes. התשואה המרכזית של התפלגות זו היא העובדה שהתנודתיות σ היא פרופורציונלית ל- S . הכוונה זו מביטחה שרמתו של שער הביטקוין לעולם תישאר חיובית, ואכן ככל ששער הביטקוין יורד, השונות שלו יורדת, מה שהופך ללא סביר תרחיש שבו שער הביטקוין יחווה מהלך ירידה שערים גדול שידחף את שעריו לערכים שליליים. מכיוון שהמודל שואף להתפלגות נורמלית עבור $dS/S = \mu dt + \sigma S^{-1} dS$, הרי ש- S מפולג לוג-נורמלית. תהליך זה מרמז על כך שכל שני מרווח הזמן $T - t$, הלוגריתם הטבעי של המחיר הסופי מפולג כדלקמן:

$$\ln(S_T) = \ln(S_t) + (\mu - \sigma^2/2)\tau + \sigma\sqrt{\tau}\epsilon$$

כאשר ϵ הוא משתנה מקרי המפולג נורמלית סטנדרטית.

תחילה, אספתי נתונים על מחירי שער הביטקוין בתקופה 2019.12.31 - 2024.12.31 (61 חודשים). לאחר מכן, באמצעות טכניקה אקטוארית שנקראת "אומדני ראות מקסימלית" MLE (Maximum Likelihood Estimators) אמדתי את תוחלת התשואה (המנמה) החודשית הצפויה של שער הביטקוין (μ) (כאשר שמדברים על העתיד מדברים על התוחלת. למה? כי תוחלת זה ממוצע והממוצע על המשעך/המנבא הטוב ביותר בטבע) ואת התנודתיות החודשית הצפויה של השוואות שיערי הביטקוין (σ), לתקופה הנבדקת. שער הספוט נמדד כנון למועד החיזוי (2024.12.31) על 93,780.07 דולר ארה"ב לביטקוין.

טכניקת "אומדני ראות מקסימלית" כרוכה בבחירת ערכים עבור הפרמטרים אשר ממקסימים את הסיכוי (הסבירות או ההסתברות) להתרחשות התנאים שאספתי. טכניקת הנראות המקסימלית מייצרת אומדנים באמצעות פתרון בעיות אופטימיזציה של פונקציה מתמטית באמצעות טכניקת "אומדני ראות מקסימלית" קיבלת את תוחלת התשואה החודשית הצפויה של שער הביטקוין שווה ל-2.297% ושהתנודתיות (סטיית התקן) החודשית הנורמליזציה של השוואות שיערי הביטקוין שווה ל-19.810%. מאחר וישנם 12 חודשים בשנה הרי שתוחלת התשואה השנתית הצפויה של שער הביטקוין נאמדה על ידי ב-27.561% בעוד שהתנודתיות השנתית הצפויה של השוואות שיערי הביטקוין נאמדה על ידי ב-68.623% לשנה.

כעת הרצתי טכניקה אקטוארית נוספת בשם "סימולציית מונטה קרלו" (5,000 תרחישים) המבוססת על תהליך סטוכסטי הכולל תנועת בראון גיאומטרית. טכניקה אקטוארית זו הינה סימולציה אקראית של גורמי סיכון מרכזיים בגורמי שיווי של כספים פיננסיים בהתפלגות מותאמת לסיכון ביעולם האמיתי (Real World). נכון להיום, טכניקה זו הינה אחת מהשיטות המרכזיות בעולם האקטואריה ולדעתי היא מתאימה לשאלת תחזית שער הביטקוין עד סוף שנת 2025.

טכניקת "סימולציית מונטה קרלו" היא כאמור טכניקה אקטוארית שמייצגת בקבלת החלטה בתנאי אי ודאות המשתלבת בשימוש במספרים אקראיים, בהתפלגויות ערכים אפשריות ובהסתברויות, ובכך מסייעת למעשה בפתרון בעיות קשורות לגיוס סיכונים ותחזיות לעתיד. טכניקת "סימולציית מונטה קרלו" מבוססת על בניית מודל תנונים (הלך): "המודל האקטוארי" המתאר את הבעיה הכלכלית הניצבת בפני האקטואר (שער הביטקוין עד סוף שנת 2025 במידת זן שלפנינו). המודל האקטוארי מורכב ממשני כניסה, חישובים ועיבודים שונים הנעשים על מנת להכניסה ותוצאות או תחזיות המשמשות כתוצאות של המודל האקטוארי.

מכיוון שאנו פועלים בסביבה שבה חלק ממשנת הכניסה אינם ידועים, וקיימת חוסר ודאות לגביהם, הגדרתי עבור אותם משתנים טווחים אפשריים והתפלגויות חזויות לערכים המספריים. הערך המוסף העיקרי של טכניקת "סימולציית מונטה קרלו" הוא שהיא מציינת עבור משנת התחזית של המודל האקטוארי לא רק את ערכי התוצאה החזויים כמו בנייתו רגישות וכלים מתמטיים וסטטיסטיים אחרים, אלא גם **מיה ההסתברות שיתקבלו אותם ערכים החזויים. ובכך, הסימולציה מצמצמת באופן ניכר את חוסר הודאות סביב התחזית.**

חשוב לציין כי טכניקת "סימולציית מונטה קרלו" היא טכניקה הנמצאת בשימוש רחב בעולם הפיננסים וההשקעות, בהנדסה, ביולוגיה חישובית, כימיה וסטטיסטיקה יישומית ומהווה כלי עזר חשוב בקבלת החלטות. בהתבסס על כל המרכיבים הפעילי את המודל האקטוארי תוך הרצת מנות תרחישים נדרשת על מנת שתוצאות המודל האקטוארי יהיו תקפות מבחינה סטטיסטית מדעית.

על מנת להקטין את סיכון המודל (Model Risk), בדקתי את כל תהליכי החישוב של המודל האקטוארי, החל בהגדרת המשתנים, הנוסחאות השונות, הנחות של המודל האקטוארי והתרחישים שהורצו ונצאתי שהחישובים במודל האקטוארי נעשו בצורה תקינה ובהתאם לכללי טכניקת "סימולציית מונטה קרלו".

בנוסף, ברוצני להוסיף כמה מילים על התקפות הסטטיסטית של יישום "סימולציית מונטה קרלו" במודל האקטוארי שציינתי.

אחת הטענות הבסיסיות של משקיעים בשוק ההון הינה שאיש אינו יכול לחזות את השינויים העתידיים בשער הביטקוין, ומכאן שהם מתקשים מאד לקבוע האם ברמה שער הביטקוין הנוכחית כדאי להם להיכנס עשוי להשקעה בביטקוין על צפייה להתרחש נסיקה שלו או לחילופין דווקא שווה להם להמתין ולא להיכנס עשוי להשקעה בביטקוין כי צפייה להתרחש התרחקות שלו. איש אינו יודע מה יהיה בעתיד והעבר אינו מלמד דבר על שער הביטקוין שיתממש מעתה והלאה. ואכן, אחת מאבני היסוד של תורת המימון היא הנחה פונדמנטלית (שאינה נתונה לשינוי) שקובעת שיערי הביטקוין הנוכחיים בשוק "אינן זיכרון" (memoryless) ואין הם יכולים לפיכך להיות מושפעים משערי הביטקוין בעבר. משמע, העבר אינו מלמד דבר על העתיד. זוהי הנחה בסיס למשל, במודל בלק אנד שולס לתמחור אופציות.

ניח שטענה זו נכונה. הרי שלא ניתן לדעת אם שער הביטקוין מחר, או בעוד שבוע או בעוד חודש או בזמן כלשהו בעתיד יהיה גבוה יותר או נמוך יותר משער הביטקוין הנוכחי, אותו שער שאותו נכנה שער ה"ספוט". בואו לרענן ולא ניח לאילו הטענות נכונות. הרי למעשה הם אומרים או מניחים שקיימת הסתברות של 50% ששער הביטקוין בעוד זמן t מהיום יהיה גבוה יותר משער הספוט ובאותה מידה בהסתברות של 50% ששער הביטקוין בעוד זמן t מהיום יהיה נמוך יותר משער הספוט. למעשה זוהי הנחה הוזהר לזו של הטלת מטבע, "קפיץ" או "אפלי".

מכאן שיש לכאורה טיעון נוסף שאותו ניתן לטעון והוא שער הביטקוין יהיה בדיוק באותו מקום בעוד זמן t מהיום אך אנו נתלים מסינון זה ונזנח את התפלגותו בהנחה נוספת של תורת המימון הקרויה GBM (תנועת בראון גיאומטרית) GBM הריה הנחה תועלתית לפיה שיערי מטבעות בכלל ושערי הביטקוין בפרט "ניסחפים" (drifted) על פני ציר הזמן לאורך קו מגמה מסוים (trend) בתוספת "רעש" (תנודתיות מורכבת משינויים אקראיים המכונים). אז מה אומרת הנחה GBM? היא למעשה אומרת לנו ששיערי הביטקוין אינם שאירים אף פעם במקום אלא הם נעים ונדים כל הזמן. GBM הוא כאמור התהליך הסטוכסטי העומד מאחורי התנודות שער הביטקוין.

שערי הביטקוין מציגים דפוס התנהגות חוזר הקרוי הילוך מקרי (Random Walk). ליתר דיוק, מונח כי שיערים אלו עוקבים לתהליך מרקוב (Markov Process), שהוא תהליך סטוכסטי פרטני לפיו העתיד בשוק הביטקוין אינו תלוי בהיסטוריה שלו - שער התפלגות שיערי הביטקוין העתידיים כולה נשענת על שער הנוכחי בלבד. משמע, העבר אינו רלוונטי לנבואת חיזוי התנהגות/התפתחות שער הביטקוין העתידיים, אלא רק ההווה. תהליכים סטוכסטיים אלו בנויים מהתמרכיבים הבאים והם מתוארים על פי סדר מורכבותם:

1. **תהליך וינר (Wiener Process)** - מתאר משתנה Δz , שהשינוי שלו נמדד על פני מרווח הזמן Δt כך שהשינוי הממוצע שלו הוא 0 והשונות שלו פרופורציונלית ל- Δt :

$$\Delta z \sim N(0, \Delta t)$$

אם ϵ הוא משתנה מקרי המפולג נורמלית סטנדרטית $N(0, \Delta t)$, אז ניתן לכתוב זאת כ- $\Delta z = \epsilon\sqrt{\Delta t}$. בנוסף, השינויים של Δz הם בלתי תלויים האחד בשני על פני זמן.

2. **תהליך וינר כללי (The Generalized Wiener Process)** - מתאר משתנה Δx , אשר נוצר מהתהליך וינר בתוספת מגמה (trend) קבועה של a ליחידת זמן ותנודתיות b :

$$\Delta x = a\Delta t + b\Delta z$$

מקרה ספציפי הוא המרטנגאל (martingale), שהוא למעשה תהליך סטוכסטי עם אפס-סחיהפה (כלומר, ללא סחיהפה), $a = 0$, מה שמוביל לכך ש- $E(\Delta x) = 0$. למרטנגאל יש תכונה מאוד נוחה: תוחלת הערך העתידית של משתנה מקרי מסוים שווה תמיד לערכו הנוכחי

$$E(x_T) = x_0$$

3. **תהליך איטו (The Ito Process)** - מתאר תהליך וינר כללי שהמגמה והתנודתיות שלו תלויים גם בערך התהליך וינר של נכס הבסיס והן בזמן:

$$\Delta x = a(x, t)\Delta t + b(x, t)\Delta z$$

זהו למעשה תהליך מרקובי כי ההתפלגות תלויה אך ורק בערך הנוכחי של המשתנה האקראי x , כמו גם בזמן. בנוסף, לשיעור השינוי של התהליך Δx יש התפלגות נורמלית. דוגמה ספציפית לתהליך איטו היא **תנועת בראון גיאומטרית (Geometric Brownian Motion)** - המתוארת עבור המשתנה S בתור

$$\Delta S = \mu S\Delta t + \sigma S\Delta z$$

התהליך עצמו הוא גיאומטרי מכיוון שאיברי המגמה והתנודתיות הינם פרופורציונליים לערכו הנוכחי של S . זהו לרוב המקרה עבור שיערי מטבעות, ששיעורי התשואות