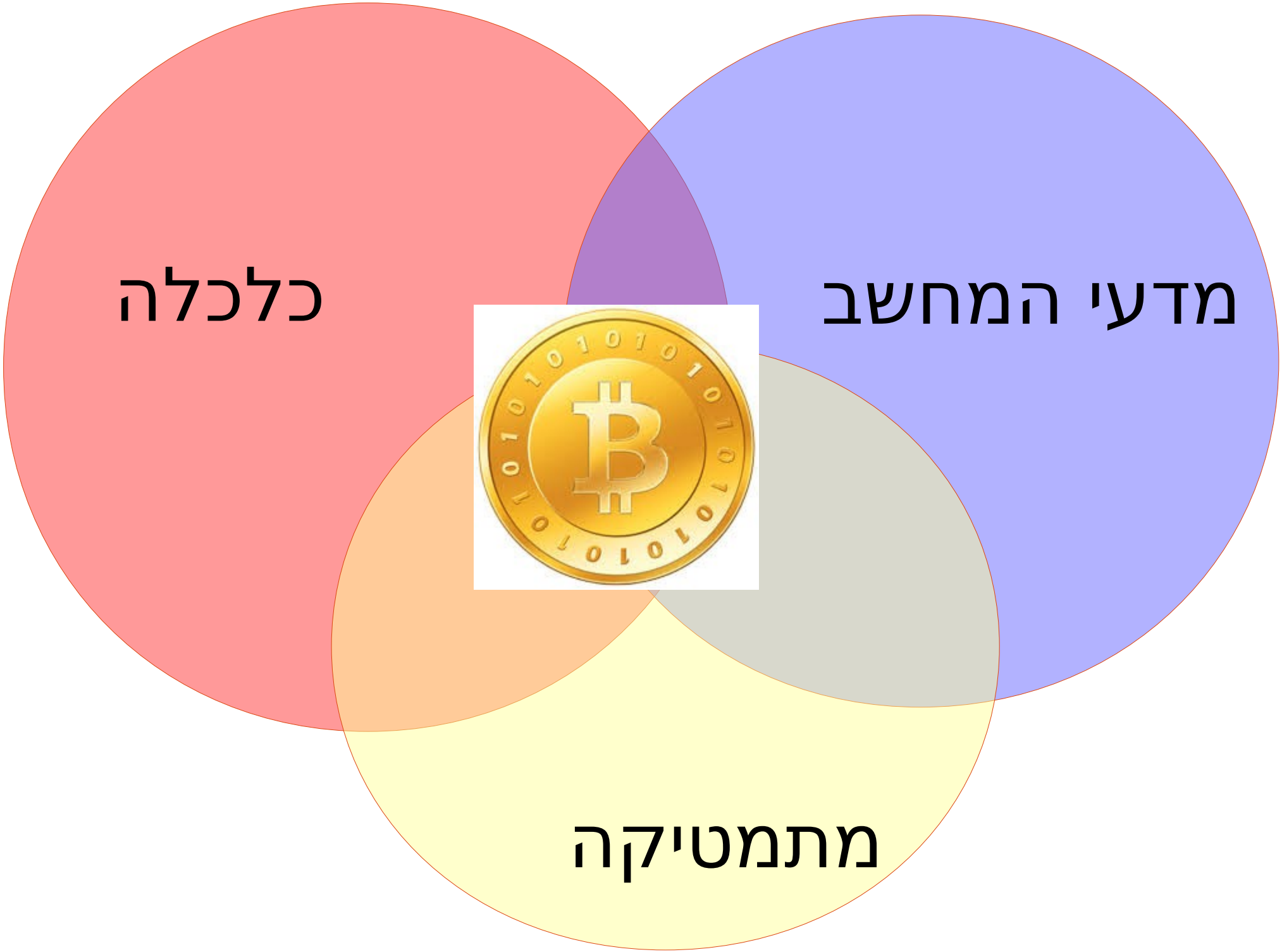
ביטקוין ושרשראות בלוקים
Bitcoin and Blockchains

אראל סגל-הלוי

מקורות:

* המאמר של Satoshi Nakamoto משנת 2008
* הקורס של Tim Roughgarden, הרצאות 9-10
* הספר של Parkes & Seuken, פרק 21
* מצגת של אביב זוהר


כלכלה
מדעי המחשב
מתמטיקה

מה זה בכלל כסף ולמה צריך אותו?

- מסחר בין שני אנשים יכול לשפר את התועלת של שניהם.
- סחר-חליפין הוא יעיל אבל דורש התאמה הדדית ברצונות: א רוצה את הסחורה של ב ולהיפך.
- ראינו דוגמאות לכך בתחילת הקורס הזה – אלגוריתם מעגלי-המסחר להחלפת בתים.

מה זה בכלל כסף ולמה צריך אותו?

- כסף משמש לתיווך במסחר.
- אדם נותן חפץ בתמורה לכסף, כי הוא מאמין שבעתיד, יוכל לתת את הכסף בתמורה לחפץ אחר.

תנאים הכרחיים למטבע

1) קשה לייצר מטבע (אחרת אף אחד לא ייתן תמורתו חפצים – כולם ייצרו בעצמם).
2) קל להוכיח שיש לי מטבע.
3) אי-אפשר לשכפל – לשלם וגם להשאיר את המטבע אצלי (double-spend).

התנאים לא מספיקים – גם אם כל התנאים מתקיימים, עדיין צריך אמון במטבע.

זהב (או מתכות יקרות אחרות) כמטבע

1) קשה לייצר – אפשר לכרות מהאדמה אבל זה לוקח הרבה זמן.

2) קל להוכיח – כולם רואים שאני מחזיק זהב.

3) אי-אפשר לשכפל – [illegible] כבר לא אצלי.

שטרות מנייר

1) קשה לייצר – יש אמצעים נגד זיוף.
מצד שני – הממשלה עצמה יכולה להחליט להדפיס כסף מסיבות פוליטיות.
2) קל להוכיח – כולם רואים מי מחזיק שטר.
3) אי-אפשר לשכפל – כששילמתי, השטר כבר לא אצלי.

חשבון אלקטרוני בבנק מסורתי

1) קשה לייצר – אא"כ פורצים למחשבי הבנק.
מצד שני – הבנק יכול לייצר כסף ע"י הלוואות.

2) קל להוכיח - הבנקים שומרים רישומים מפורטים של כמה כסף שייך למי.
מצד שני – לא כל אחד זכאי לפתוח חשבון.

3) אי אפשר לשכפל - הבנקים מפקחים על היתרות, כל קניה מורידה את היתרה שלך.
מצד שני – תיתכן מעילה או פריצה.

סלעי-גלגל – באִי יאפ (Yap)

1)קשה לייצר – אפשר להביא מאיים סמוכים אבל זה לוקח הרבה זמן.

2)קשה להוכיח – אם קיבלתי מטבע, יהיה לי מאד קשה לסחוב אותו הביתה.

הפתרון שלהם: במקום לסחוב – הם פשוט **זוכרים** למי שייך כל מטבע!

- קהילה קטנה – קל לזכור.

https://medium.com/the-mission/the-island-of-yap-and-the-idea-of-money-9f570421d854

מטבעות קריפטוגרפיים

"מטבע" מוגדר כאוסף של עסקאות, ביתר פירוט:

“We define an electronic coin as **a chain of digital signatures**. Each owner transfers the coin to the next by digitally signing a hash of the previous transaction and the public key of the next owner and adding these to the end of the coin. A payee can verify the signatures to verify the chain of ownership.” (**Satoshi Nakamoto**, 2008, https://bitcoin.org/bitcoin.pdf)

מטבעות קריפטוגרפיים

1) קשה לייצר – דורש אמון.
2) קל להוכיח – דורש חתימות דיגיטליות -->
3) אי-אפשר לשכפל – דורש אלגוריתם -->

מושגים בסיסיים בקריפטוגרפיה

מערכת חתימה דיגיטלית כוללת כמה רכיבים:

- אלגוריתם ייצור זוגות (מפתח סודי -> מפתח ציבורי)
- *ssh-keygen*
- *gpg --**gen-key** / --list-keys*
- *gpg --armor --export/ --export-secret-keys*
- אלגוריתם **חתימה** בעזרת **מפתח סודי**:
- gpg --default-key=BF8C1203 --**clearsign** message.txt
- אלגוריתם **אימות** בעזרת **מפתח ציבורי**:
- gpg --**verify** message.txt.asc
- מפתח ציבורי הוא כמו "שם משתמש" גלובלי.

איפה נמצא המטבע?

הגדרה: "מטבע קריפטוגרפי" הוא רשימה מקושרת-אחורה של הודעות מהצורה:

1) "10 מטבעות נוצרו ונמסרו למפתח-ציבורי א".
2) "א שילם את 10 המטבעות שקיבל ב**הודעה 1**, למפתח-ציבורי ב" [חתימה ע"י א].
3) "ב השתמש ב-10 המטבעות שקיבל ב**הודעה 2**: שילם 6 למפתח-ציבורי ג, ו-4 למפתח-ציבורי ב" [חתימה ע"י ב]
4) *[א"א להשתמש שוב בהודעה 1, 2].*

מי שקורא את השרשרת, יכול לוודא תקינות ע"י אימות כל ההודעות בעזרת המפתחות הציבוריים. כך אפשר לדעת למי שייך המטבע.

מניעת שיכפול

הבעיה העיקרית ברשימה המקושרת היא -
איך מונעים תשלום כפול (double-spending)?

מה יקרה למשל אם ב ישלח במקביל שתי הודעות:

1) "ב שילם את המטבע שקיבל ב**הודעה 2**, למפתח-ציבורי ג" [חתימה ע"י ב]

2) "ב שילם את המטבע שקיבל ב**הודעה 2**, למפתח-ציבורי ד" [חתימה ע"י ב]

לכאורה כל אחד יכול לשכפל את המטבעות שלו – לקנות כמה דברים באותו מטבע!

זה האתגר העיקרי שפותרת מערכת ביטקוין.

איך מונעים שיכפול מטבעות? (א)

דרך א - גוף מרכזי (כמו ויזה / פייפאל):

- הקונה שולח בקשת תשלום למרכז;
- המרכז בודק שהבקשה חוקית;
- המרכז שולח אישור למוכר;
- המוכר נותן את החפץ לקונה.

הבעיה – *ריכוזיות – כל המערכת תלויה בגוף 1.*

- *אנשים רבים, במיוחד במדינות עולם שלישי, לא זכאים לפתוח חשבון בבנק או בפייפאל.*
- *דוגמה מונצואלה:*

https://cryptohustle.com/using-bitcoin-to-survive-in-venezuela

איך מונעים שיכפול מטבעות? (ב)

דרך ב – הצבעה בין כל המשתמשים:

- הקונה מפרסם בקשת תשלום ברשת-המשתמשים.
- כל משתמש בודק שהבקשה חוקית.
- המוכר נותן חפץ לקונה רק אם הרוב אישרו.

הבעיה *– התחזות (Sybil Attack)*

נוֹכֵל יכול ליצור הרבה משתמשים ולהשיג רוב.

אפשר לדרוש הרשמה, אבל אז חוזרת ריכוזיות..

מערכות עם הרשמה נקראות ***permissioned.***

מערכות ללא הרשמה הן ***permissionless.***

ביטקוין היא מערכת permissionless.

איך מונעים שיכפול מטבעות? (ג)

הדרך של ביטקוין - **הוכחת-עבודה** (proof-of-work):

- הקונה שולח בקשת תשלום לרשת.
- כל משתמש בודק שהבקשה חוקית ו**מנסה** לאשר.
- כדי לאשר בקשה m, צריך לפתור חידה קשה - להפוך **פונקציה חד-כיוונית** - למצוא x כך ש:

  SHA256(m+x) < (2^224) / D

  כאשר D הוא מספר המייצג את רמת הקושי.
- הראשון שמצליח לפתור את החידה – שולח את הבלוק עם הפתרון לכולם וכך מצרפו לשרשרת.

הדגמה חיה:

http://blockchain.mit.edu/how-blockchain-works

התחזות לא תעזור – המערכת חסינה ל-Sybil!

שרשרת הבלוקים - מושגים

האישור מתבצע לא על כל עיסקה בנפרד, אלא על **בלוקים** של עסקאות (לכן **blockchain**).

- בלוק מכיל מגה-בייט אחד של עיסקאות.
- כל עיסקה תופסת בערך 0.5 קילו-בייט.
- לכן בכל בלוק יש מקום לכ-2000 עיסקאות.

- פתרון החידה (x) נקרא **nonce**.
- תהליך מציאת ה-nonce נקרא **כריה (mining)**.
- רמת הקושי (D) נקבעת באופן דינמי כך שהזמן הדרוש למציאת nonce יהיה כ-10 דקות (כדי שהבלוק יספיק לפעפע ברשת).
- ציוד כריה: https://www.bitcoinmining.com/bitcoin-mining-hardware/

מה מרויחים הכורים?

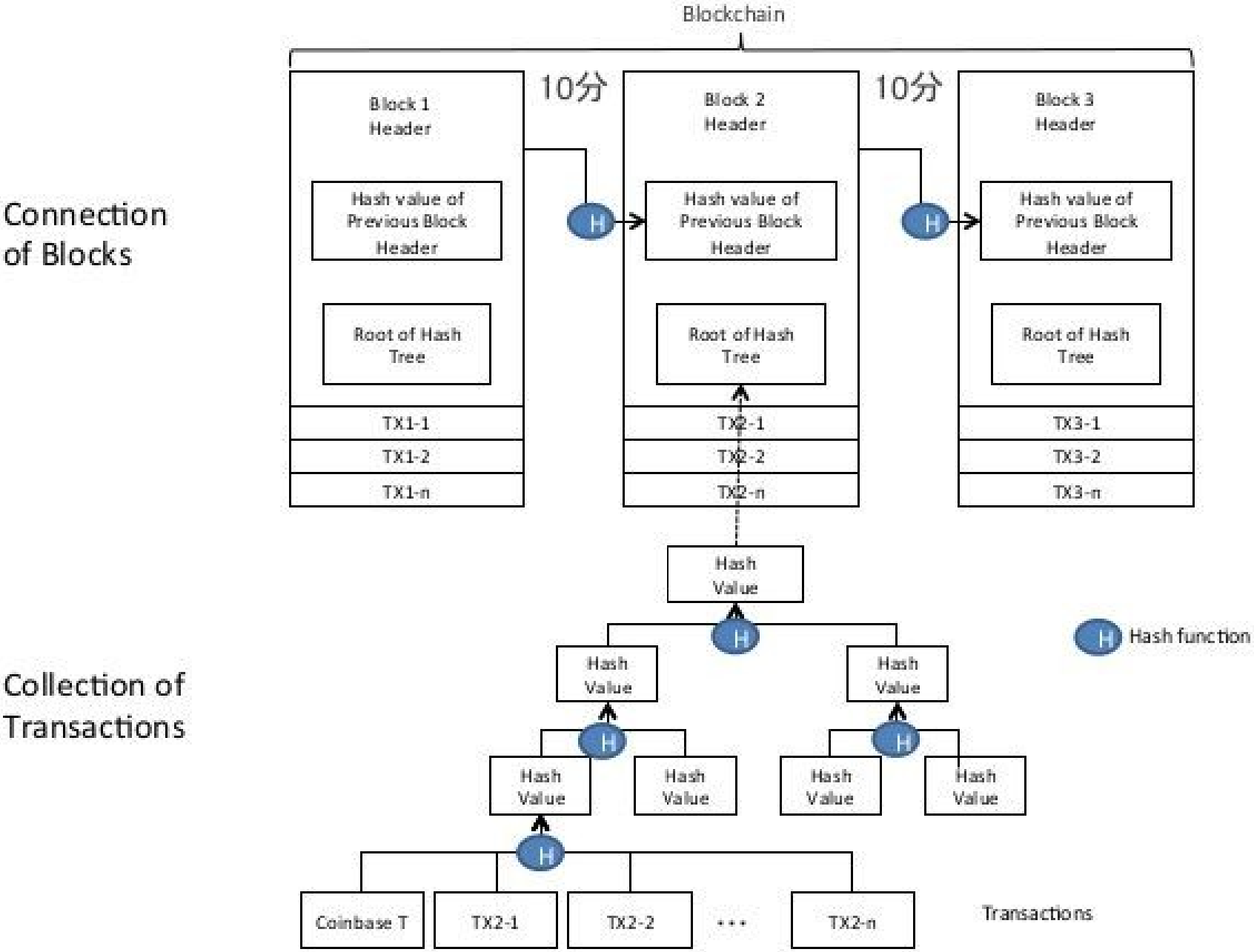
הכריה דורשת זמן וחשמל – מה יוצא להם מזה?

- "**דמי כריה**" קבועים (coinbase)- נוצרים "מאין"
  - התחילו מ-50 ביטקוין.
  - כל 210000 בלוקים – קטנים פי 2.
    - (הקוד: https://github.com/bitcoin/bitcoin/blob/master/src/validation.cpp#L1186)
  - לכן, יהי לכל היותר כ-21 מיליון ביטקוין.

- "**עמלת עסקה**" משתנה – נקבעת ע"י המשלם בכל עיסקה. ככל שהעמלה גבוהה יותר – יש סיכוי גדול יותר שאחד הכורים יסכים להכניס את העסקה לבלוק (https://bitcoinfees.info/).

מבנה של שרשרת בלוקים

Structure of Blockchain



מבנה של בלוק בשרשרת

מזהה (hash) של הבלוק הקודם;

- כ-2000 עיסקאות. כל עיסקה כוללת:
- מפתח ציבורי של שולח אחד או יותר;
- מפתח ציבורי של מקבל אחד או יותר;
- כמה כסף עובר מכל שולח לכל מקבל;
- קישור לעסקאות קודמות שבהן התקבל הכסף;
- "עמלת אישור".
- פתרון החידה המתאימה לתוכן הבלוק (nonce);
- מפתח ציבורי של המאשר הזוכה בדמי הכריה.

סייר הבלוקים: https://blockchain.info/

עסקאות שעדיין לא אושרו: https://blockchain.info/unconfirmed-transactions

https://testnet.blockchain.info/tx/cde964a61778103938fbc0d17ec932761f054301ac4caad1b9ea85409666f2a4

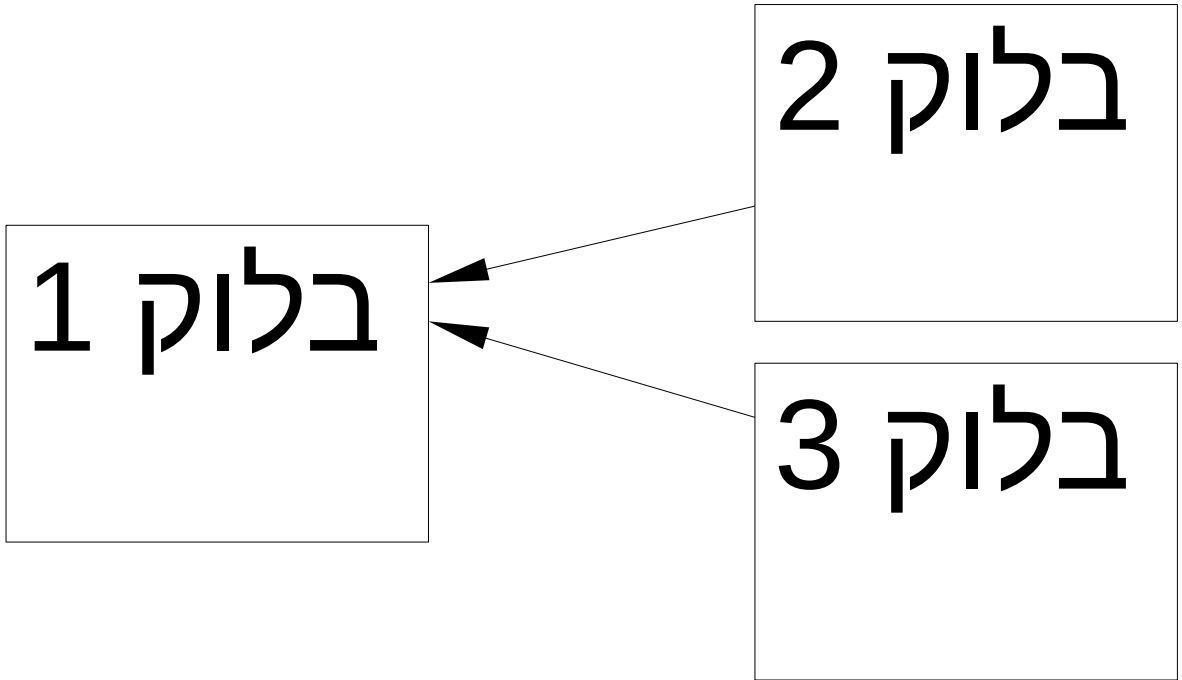
- ברז ביטקוין לניסויים: https://testnet.manu.backend.hamburg/faucet

מועדוני כריה – mining pools

- לכורה בודד יש סיכוי מאד קטן למצוא בלוק.
- שיתוף פעולה בין כמה כורים מגדיל את הסיכוי.
- ב**מועדון כריה** העבודה על כל בלוק מתחלקת בין הרבה כורים; כשמישהו מוצא בלוק, המועדון לוקח את הכסף ומחלק אותו בין הכורים.
- https://blockchain.info/pools

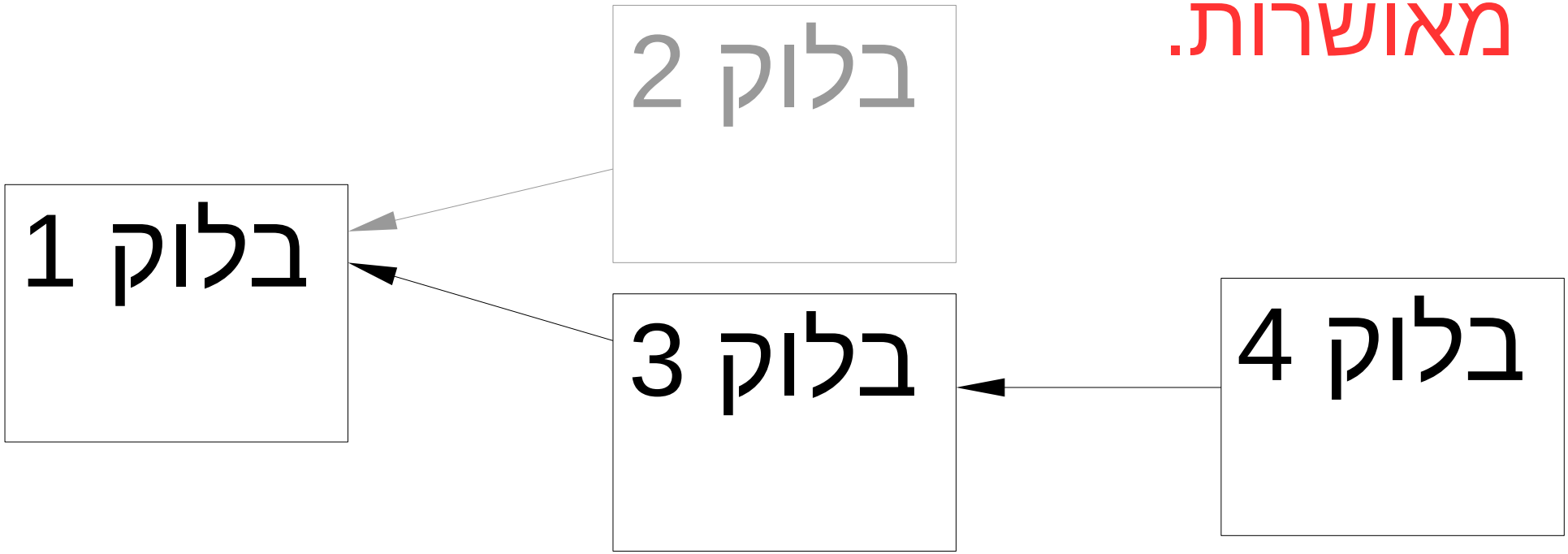
מזלגות ובלוקים יתומים

- ברגע שבלוק מאושר נשלח לרשת – כל שאר הכורים צריכים לזרוק את הבלוק שניסו לאשר, ולהתחיל לעבוד על בלוק חדש שבו ה"קישור לבלוק הקודם" הוא מזהה הבלוק החדש שאושר.
- אם שני כורים מאשרים בלוקים שונים בערך באותו זמן, נוצר **מזלג** (fork) בשרשרת הבלוקים.



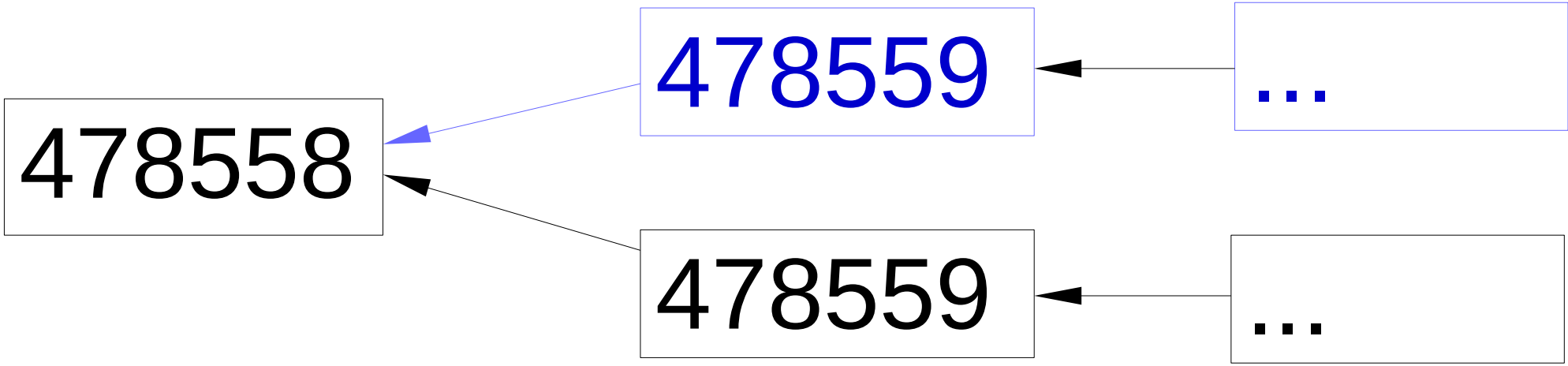
מזלגות ובלוקים יתומים

- איך מחליט כל כורה, לאיזה בלוק-קודם לקשר?
- **כלל א**: בחר את השרשרת הארוכה ביותר.
- **כלל ב**: אם יש כמה שרשראות ארוכות ביותר
  - קשר לבלוק ששמעת עליו מוקדם ביותר.
- בלוק שנמצא מחוץ לשרשרת הארוכה ביותר נקרא "יתום" (orphaned); העסקאות בו לא מאושרות.



פיצולים מכוונים

- הקוד של ביטקוין פתוח, ויש ויכוחים בין המפתחים.
- כשלא מצליחים להכריע בויכוח, המטבע מתפצל.
- למשל: ב 1/8/2017 היה פיצול בשרשרת ביטקוין בגלל ויכוח על גודל הבלוק – להשאיר 1 מ"ב או להגדיל ל-8 מ"ב.
- הרוב תמכו ב-1 מ"ב; תומכי ה-8 מ"ב התפצלו וקראו לעצמם "Bitcoin Cash" - מטבע חדש:



שרשראות בלוקים (blockchain)

- ביטקוין היה היישום הראשון של שרשרת בלוקים.
- אבל שרשרת בלוקים היא מושג כללי יותר – **מבנה-נתונים מבוזר להסכמה על סדר אירועים**.

- סוגי שרשראות בלוקים:
  - **ציבורית** – כל אחד יכול לקרוא, לכתוב ולאשר. דרושה הוכחת-עבודה (PoW) או שיטה דומה.
  - **קבוצתית** – כל אחד יכול לקרוא ולכתוב, אבל רק קבוצה נבחרת של מנהלים יכולה לאשר (ברוב).
  - **פרטית** – רק המנהל יכול לכתוב ולאשר.

תוכנה לבניית שרשראות בלוקים:
https://www.hyperledger.org

מתקפות על
שרשראות-בלוקים

האם פרוטוקול ביטקויין אמיתי?

- פרוטוקול נקרא "אמיתי" אם התנהגות בהתאם לפרוטוקול ממקסמת את הרווחים.
- התשלומים לכורים נועדו לעודד אותם לפעול לפי הפרוטוקול.
- אבל יש כמה מקרים שבהם כדאי לכורה לפעול בניגוד לפרוטוקול. -->

מתקפת תשלום-כפול (double-spend, 51%)

כורה המחזיק מעל 50% מכוח-הכרייה יכול לשלם פעמיים באותו מטבע, באופן הבא:

- נניח שהבלוק הנוכחי הוא בלוק א. התוקף קונה חפץ, והתשלום מאושר בבלוק ב המקושר ל-א.
- התוקף כורה בלוקים המקושרים לבלוק א, עד שהשרשרת שלו ארוכה יותר מהשרשרת העוברת דרך בלוק ב.
- בלוק ב נעשה "יתום", והאישור מתבטל!

לכן, תנאי הכרחי לאמיתיות של ביטקוין הוא שכוח-הכרייה של כל כורה יחיד קטן מ-50%.

מתקפת 51% במציאות:

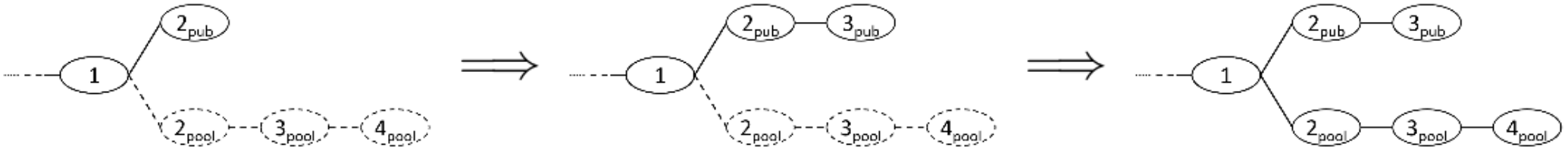
ttps://www.investopedia.com/news/bitcoin-gold-hack-shows-51-attack-re
/

מתקפת קרטל הכורים (mining cartel)

מועדון-כורים המחזיק מעל **שליש** מכוח-הכרייה יכול להרויח מהסתרת בלוקים שמצא.

נניח שהבלוק הנוכחי הוא א, והקרטל מצא בלוק ב המקושר אליו. במקום לפרסם את הבלוק, התוקף ממשיך לחפש בלוק ג המקושר לבלוק ב.

- **מקרה א**: מישהו אחר מצא בלוק ד המקושר לבלוק א – התוקף הפסיד את תשלום בלוק ב.
- **מקרה ב**: התוקף מצא בלוק ג – הוא ממשיך כך עוד כמה בלוקים ואז מפרסם את כל השרשרת.



מתקפת קרטל הכורים (mining cartel)

- המתקפה גורמת לשאר הכורים לבזבז אנרגיה על בלוקים שבסוף יהפכו להיות יתומים.
- אפשר להוכיח, שאם הקרטל מחזיק לפחות 1/3, הרווח לכורה בקרטל גדול יותר מהרווח לכורה מחוץ לקרטל (ראו mining-cartel.ods).
- לכן לכורים בודדים יש תמריץ להצטרף לקרטל!
- הקרטל גדֵל עד שהוא מגיע מחזיק מעל 50%.

- המתקפה מעולם לא נצפתה במציאות.
- מאמיני-ביטקוין מאמינים שהיא לא תקרה:

//hackingdistributed.com/2013/11/04/bitcoin-is-br
n/

צליפת-עמלות (fee-sniping)

- בעתיד הקרוב, דמי-הכריה הקבועים (coinbase) יקטנו, ועמלת-העיסקה תהיה חלק משמעותי יותר מהשכר של הכורים.
- זה ייתן תמריצים חדשים להתנהגות מתחכמת.
- נניח, שבבלוק האחרון שנוסף לשרשרת, יש עיסקה עם עמלה מאד גבוהה.
- לכורה יש תמריץ להמשיך את הבלוק הלפני-אחרון, כדי שיוכל לשים בבלוק שלו את העיסקה הזאת ולקחת את העמלה לעצמו.
- זה נקרא **fee-sniping**.
- אם כולם יעשו כך – השרשרת תיתקע.

שבירת-שיוויון אנוכית (selfish tie-breaking)

- לפי הפרוטוקול, במקרה של פיצול בשרשרת, כל כורה צריך להמשיך את הבלוק ששמע עליו ראשון.
- כשיש רק דמי-כריה קבועים, זה לא משנה.
- אבל כשיש גם עמלות-עיסקה משתנות – כדאי להמשיך דווקא את הבלוק שיש בו **פחות** עמלות, כי הוא משאיר **יותר** עמלות לכורים הבאים ומגדיל את הסיכוי ש"צלפי עמלות" ימשיכו אותך.

חיתוך (undercutting)

- נניח שכמה כורים מבצעים שבירת-שיוויון אנוכית.
- אז כדאי לכורים אחרים "לחתוך" את הבלוק הנוכחי - להמשיך את הבלוק הקודם בבלוק שמכיל פחות עמלות, בתקוה שה"אנוכיים" ימשיכו אותך.
- כשכולם "חותכים" אחד את השני, נוצרת פרימת-שוק (unraveling), וכולם יוצרים בלוקים עם מעט מאד עמלות.
- *כל המתקפות האלו עדיין לא נצפו בשטח כי העמלות עדיין נמוכות, אבל מה יהיה בעתיד?*

?