

國立政治大學企業管理研究所

碩士論文

礦工行為與區塊鏈網絡性能的動態模擬分析

Dynamic Simulation of Miner Behaviors and
Blockchain System Performance



黃文志

Wen-Zhi Huang

指導教授：莊皓鈞 博士

Advisor: Chuang, Hao-Chun, Ph.D

中華民國 112 年 6 月

June, 2023

中文摘要

隨著區塊鏈技術應用範疇逐漸擴大，其技術原理與應用概念日益受到全球政府與企業的重視。特別是比特幣，作為區塊鏈最早的應用之一，已經吸引了大量公眾關注。本研究旨在以比特幣這一虛擬貨幣為研究對象，深入探討具有不同風險態度的礦工對比特幣網絡的性能所產生的影響。為此，我們將採用系統動力學方法對相關問題進行建模與分析。

根據比特幣網絡的特性，我們可以知道比特幣價格短期與中長期波動會影響礦工在網路停留的時間與礦工對報酬率的敏感度，而這兩者會改變比特幣網絡中礦工的數量，最終對比特幣網絡的哈希值產生影響。依照上述脈絡，本研究首先建構了一個基於比特幣網絡真實情境的系統動力學模型，並將比特幣礦工依照風險態度的不同而區分成三大種類 (1.) 風險趨避礦工 (2.) 風險中立礦工 (3.) 風險偏好礦工，探討這三種不同風險態度礦工會如何被比特幣價格波動所影響，進而對比特幣網絡中的哈希值產生變動。

通過模擬實驗，本研究發現三種不同風險態度礦工對比特幣網絡的運作有顯著的影響。風險趨避礦工可能在比特幣價格大幅下跌時而選擇降低挖礦時間，因而影響比特幣網絡中礦工數量，導致算力降低；而風險偏好礦工則較不受到比特幣價格下跌的影響，反而在比特幣價格上漲時，還會增加待在網絡中挖礦的時間，進而增加比特幣網絡中礦工數量，提升算力；而風險中立礦工在比特幣網絡中礦工數量中則是相對穩定。此外，本研究還發現即便是抱有相同風險態度礦工，在面臨短期和中長期價格波動的情況下，礦工數量及哈希值的影響程度也會有差異。

綜合來看，本研究對於理解比特幣等區塊鏈網絡中礦工行為的影響機制以及制定相應的政策措施具有重要意義，有助於幫助人們理解礦工行為在比特幣網絡扮演的角色，甚至幫助推動區塊鏈技術的健康發展和應用。未來研究可進一步考慮其他區塊鏈系統以及不同的礦工激勵機制，以擴大本研究的普適性和實用性。

關鍵字：比特幣、區塊鏈、礦工行為、系統動力學

ABSTRACT

As the application of blockchain continue to expand, its technology and concepts are increasingly receiving attention from governments and enterprises worldwide. Particularly, Bitcoin, as one of the earliest and successful blockchain applications, has gained significant public interests. This paper will discuss the impact of miners' different risk attitudes on the Bitcoin network performance, using system dynamics for modeling and analyzing.

Based on the characteristics of the Bitcoin network, it is clear that short-term and medium-long term fluctuations in Bitcoin prices will affect miners' residence time and their sensitivity to ROI. These two factors will change the number of miners in the Bitcoin network, ultimately affecting the hash rate of the Bitcoin network. With this concept, this study first constructs a system dynamics model based on the actual scenario of the Bitcoin network and classifies Bitcoin miners into three major categories according to their different risk attitudes: (1) risk-averse miners, (2) risk-neutral miners, and (3) risk-seeking miners. The study explores how these three types of miners with different risk attitudes are affected by fluctuations in Bitcoin prices, thereby causing changes in the hash rate in the Bitcoin network.

Through simulation experiments, this study finds that the three types of miners with different risk attitudes have a significant impact on the Bitcoin network. Risk-averse miners may choose to reduce their mining time if Bitcoin price plummet, thus affecting the number of miners in the network and leading to a decrease in hash rate. On the other hand, risk-seeking miners are less affected by the decline in Bitcoin price; instead, if

Bitcoin price rise, they will increase their time spent on mining significantly, resulting in a higher number of miners and an increased hash rate. Meanwhile, the number of risk-neutral miners in the bitcoin network remain relatively stable. On top of that, we also find that even for miners with the same risk attitudes, the extent of the impact on the number of miners and the hash rate varies when facing short-term and medium-long term price fluctuations.

This study is of great magnitude for understanding the impact mechanisms of miner behaviors on Bitcoin network. It helps people understand the role of miner behaviors in the Bitcoin network and even promotes the healthy development and application of blockchain technology. Future research can further consider other blockchain systems and different miner incentive mechanisms to increase the universality and practicality of this study.

Keywords: Bitcoins, Blockchain, Miner behaviors, System Dynamics.

CONTENTS

中文摘要	i
ABSTRACT	ii
CONTENTS	iv
Chapter 1 緒論.....	1
1.1 研究動機	1
1.2 加密貨幣概念	2
1.2.1 何謂加密貨幣	2
1.2.2 加密貨幣的起源與技術	3
1.3 區塊鏈	4
1.3.1 區塊鏈工作原理	4
1.3.2 區塊鏈應用	5
Chapter 2 比特幣網絡與系統動力學	7
2.1 比特幣網絡	7
2.2 系統動力學	9
Chapter 3 模型建置.....	11
3.1 模型背景	11
3.2 模型結構	12
3.3 內外生變數	17
3.3.1 外生變數	18

3.3.2 內生變數.....	19
Chapter 4 模型分析與結果	24
Chapter 5 結論與未來展望	32
5.1 研究結論	32
5.2 未來展望	33
參考文獻 35	



Chapter 1 緒論

1.1 研究動機

區塊鏈技術的發展已經進入到實際應用的階段，而區塊鏈系統中礦工行為是系統運作的重要因素之一。在區塊鏈系統中的礦工行為指的是網絡上有多少活躍礦工在參與挖礦、有多少礦工停留在網絡上、有多少礦工離開網絡等等。而這對區塊鏈系統的影響是一個重要的研究領域，本研究的動機就是希望探究比特幣礦工行為對區塊鏈系統的影響，從而更全面地了解區塊鏈系統的運作機制，促進區塊鏈技術的發展，提高系統的效率 and 可靠性。

首先，區塊鏈系統中的礦工是非常重要的參與者，他們的行為直接影響著區塊鏈系統的效率 and 可靠性。不同的礦工行為可能會影響到區塊鏈系統中存在的礦工數量、哈希值 (hash rate) 和交易費用等方面，進而影響到整個系統的運作狀態。因此，研究比特幣礦工行為對區塊鏈系統的影響，有助於提高區塊鏈系統的效率 and 可靠性，減少風險 (Kroll et al., 2013)。

此外，隨著區塊鏈技術應用範圍的不斷擴大，區塊鏈系統中參與者和利益攸關方也越來越多，對區塊鏈系統的要求也越來越高。因此，了解比特幣礦工行為對區塊鏈系統的影響，有助於提高系統的可靠性，滿足不同參與者和利益相關方的需求。比特幣礦工行為的研究也可以為區塊鏈技術的發展提供有益的啟示和指導，從而促進區塊鏈技術的發展 (Eyal & Sirer, 2013)。

最後，比特幣礦工行為的研究對於區塊鏈系統的未來發展也具有重要的參考價值。區塊鏈技術已經開始應用於金融、供應鏈管理、物聯網等領域，而未來的區

塊鏈系統將會更加複雜和多樣化。因此，通過研究比特幣礦工行為，可以更好地理解區塊鏈系統的運作機制，為未來區塊鏈系統的發展提供有益的參考和指導 (Qin et al., 2018)。

綜上所述，本研究旨在深入探究不同風險態度比特幣礦工受到價格波動影響後，會如何對區塊鏈系統產生改變，從而更全面地了解區塊鏈系統的運作機制，促進區塊鏈技術的發展，提高系統的效率和可靠性。本研究的結果將讓人們對區塊鏈系統的運作有更全面的了解。

1.2 加密貨幣概念

1.2.1 何謂加密貨幣

加密貨幣 (Cryptocurrency) 是一種沒有實體的貨幣，其交易記錄和發行受到密碼學技術的保護。加密貨幣使用區塊鏈技術，實現了去中心化的交易，並且不需要依賴任何機構。加密貨幣的交易過程相對匿名和安全，且具有去中心化和不可回溯等特點 (Kroll et al., 2013)。

加密貨幣的代表是比特幣 (Bitcoin)，它由 Nakamoto (2008) 提出，被認為是第一個成功實現去中心化虛擬貨幣的例子。比特幣在區塊鏈的基礎上利用工作量證明 (PoW) 的方式，通過計算數學問題的解來挖掘新的比特幣，保證了交易的安全性和可信度。

隨著加密貨幣的發展，其他種類的加密貨幣也相繼出現，例如以太幣 (Ethereum)、萊特幣 (Litecoin) 和瑞波幣 (Ripple) 等。這些加密貨幣各具特色，也因此獲得投資者的愛戴，然而，加密貨幣也存在著許多問題和挑戰，例如價值波

動大、可追溯性問題、匿名性被用於非法活動、安全性風險等。這些問題需要透過技術創新和監管等手段進行解決。

1.2.2 加密貨幣的起源與技術

中本聰在白皮書中提出，比特幣使用區塊鏈技術作為交易記錄的公共數據庫，並且可以實現去中心化的交易，不需要任何中央機構的干預。比特幣的交易記錄和發行受到密碼學技術的保護，交易過程相對匿名和安全，並且可以提高交易的速度和效率。於 2009 年，第一個區塊被中本聰在私人服務器上挖掘出來，這個區塊被稱為創世區塊，也是唯一沒有指向前一區塊哈希值的區塊，其中只包含了一段由中本聰或其團隊所指定的文字。就共識機制部分，比特幣採用了一種名為工作量證明 (PoW) 的共識機制，這是一種基於計算能力的挖礦方式，通過挖礦來驗證交易和新增區塊。挖礦過程中需要解決數學問題，計算出符合要求的哈希值，而這個計算過程需要大量的計算能力和電力消耗。只有當挖礦成功，其他節點才會認可新增的區塊，並把其添加到區塊鏈上。而採用該共識機制，可以保證交易的安全性和可信度，因為若想改變先前的交易紀錄，需要重新計算並生成新的區塊鏈，這過程會消耗大量的算力與電力，代價通常是非常高昂的，因此攻擊者很難改變交易的歷史記錄；就密碼學部分，比特幣採用 SHA-256 的哈希函數作為其加密算法，可以保證輸入數據的唯一性和不可竄改性。SHA-256 算法被用來計算區塊頭的哈希值，每個區塊頭都包含了前一個區塊的哈希值，這樣能夠保證區塊之間的連續性和安全性。

比特幣的推出引起了廣泛的關注，並且促進了其他種類的加密貨幣的出現。例如，以太幣 (Ethereum) 是一種支持智能合約執行的加密貨幣，它在比特幣的基礎

上進行了進一步的技術創新。萊特幣 (Litecoin) 採用了不同的共識機制，使得交易速度更快，費用更低。加密貨幣的起源可以說是一種革命性的創新，實現去中心化交易的方式，引起全球的關注，並仍不斷發展中。

1.3 區塊鏈

1.3.1 區塊鏈工作原理

區塊鏈是一種基於分散式系統的數據庫技術，由多個節點共同維護，而不是由單一的中央管理機構來控制。區塊鏈中的數據被儲存在稱為「區塊」的單元中，每區塊都包含了索引值 (index)、時間戳 (timestamp)、前一個區塊的哈希值 (hash)，而下一個區塊為與前一個區塊連結，形成了一個不斷增長的鏈狀結構。

$$f(\text{index, timestamp, previous hash, etc.}) = \text{hash}$$

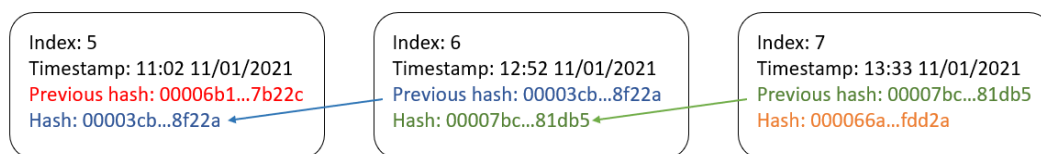


Figure 1-1：演示區塊鏈的鏈狀結構

區塊鏈的工作原理可以簡單地概括為三個步驟：驗證、記錄和傳播。首先，當一筆新的交易產生時，它會被傳送到網絡中的節點進行驗證。每個節點都會對交易進行驗證，包括驗證數字簽名和交易的合法性等。如果交易被認為是有效的，那麼它就會被加入到一個新的區塊中。

再來，當一個區塊中的所有交易都被驗證後，它就會被加密並記錄到區塊鏈中。

每個區塊都包含了先前區塊的加密哈希值，這樣可以形成一個不可修改的鏈狀結構。每個區塊的哈希值都是由區塊中所有交易的數據計算而來，因此如果有人嘗試更改任何一筆交易的數據，是難以成功的。

最後，當一個新的區塊被記錄到區塊鏈中後，它就會被傳播到整個網絡中的其他節點。每個節點都會獨立地驗證新的交易和區塊，從而確保整個區塊鏈的一致性和安全性。區塊鏈通過共識算法確定了每個節點對於新的交易和區塊的權威性，從而避免了任何單一節點對整個系統的控制。

1.3.2 區塊鏈應用

目前區塊鏈被廣泛應用在不同領域，例如加密貨幣、金融業和供應鏈等等，根據實現的需求不同，區塊鏈技術被設計了不同的機制和共識，從而產生不同類型的區塊鏈。依據不同的可訪問性和授權級別，區塊鏈主要可以分為四種類型：公共無權限、公共有權限、私有無權限和私有有權限 (Li et al., 2021)。

就加密貨幣領域來說，區塊鏈技術可以實現去中心化、安全和匿名的交易，從而保護用戶的資產和隱私。在加密貨幣交易中，區塊鏈記錄了每一筆交易的細節，例如交易方、交易時間和數量等，並通過共識機制確保交易的正確性和安全性。區塊鏈技術的透明性和不可篡改性，使其成為加密貨幣領域的一個理想解決方案。就金融業領域來說，區塊鏈的去中心化、安全和透明的交易過程，能協助金融業降低交易成本與風險，主要是應用於資產管理和交易方面，例如：於區塊鏈技術的股權登記和交易系統可以實現股權的數字化和即時交易，從而提高股權流動性和交易效率，又或者區塊鏈技術透過實現智能合約，從而在交易中自動執行合約，提高交

易效率和信任度。就供應鏈來說，區塊鏈可提供高透明度和可追溯性的資料，實現供應鏈上各個環節之間的數據共享與協同，進而使供應鏈上不同的參與者能準確地追蹤物品來源、製造方式、流通渠道等等，提高物品的品質與安全性，例如：基於區塊鏈技術的食品安全管理系統可以實現食品的全程追蹤和溯源，從而提高食品安全的管理和監管水平。

從以上例子，可以知道區塊鏈能被應用於許多領域，然而，加密貨幣是區塊鏈最早的應用之一，也是目前在區塊鏈上發展最具爭議的應用，本論文將透過系統動力學來探討複雜的加密貨幣系統，尤其是最早的加密貨幣—比特幣，並著重於礦工行為如何影響比特幣網絡。

第一章已進行加密貨幣與區塊鏈的介紹、背景與如何運作等基礎知識。在互聯網時代的當下，加密貨幣的相關議題已經成為金融和技術領域的熱門話題，引起多方利害關係的人關注，因此對於加密貨幣的研究，加深對其的認識，具有強烈的理論意義與實踐指導的意義。第二章將會講解為何比特幣網絡適合使用系統動力學進行研討。第三章，將利用系統動力學建構以比特幣為主的模型，主要為比特幣礦工數量與網絡中哈希值的模型圖，並新增三種不同風險態度的礦工的行為，清楚呈現該行為會如何影響到比特幣網路礦工的數量以及網絡中的哈希值。第四章將進行模擬結果的分析，解釋可能結果背後發生的原因。第五章是研究結論，會將本論文中研究中想探討的問題進行相互應，指出在未來，若要建構比特幣模擬模型，所需的研究方向與需要做的工作。

Chapter 2 比特幣網絡與系統動力學

2.1 比特幣網絡

首先，對於比特幣網絡來說，哈希值 (hash rate) 是一個非常重要的指標，它表示比特幣網絡的計算能力，也是保障比特幣網絡安全的重要因素之一。Figure 2-1 顯示了比特幣網絡歷史哈希值數值，可以發現從 2009 年開始呈指數型成長。在比特幣的挖礦過程中，礦工需要通過使用自己的電腦算力來解決數學謎題，從而獲得比特幣獎勵。網絡中的哈希值越高，代表著網絡中的計算能力越強，礦工解決謎題的速度也會越快，新的區塊也會被挖掘出來，從而增加了區塊產生的速度並提高整個比特幣網絡的效率。

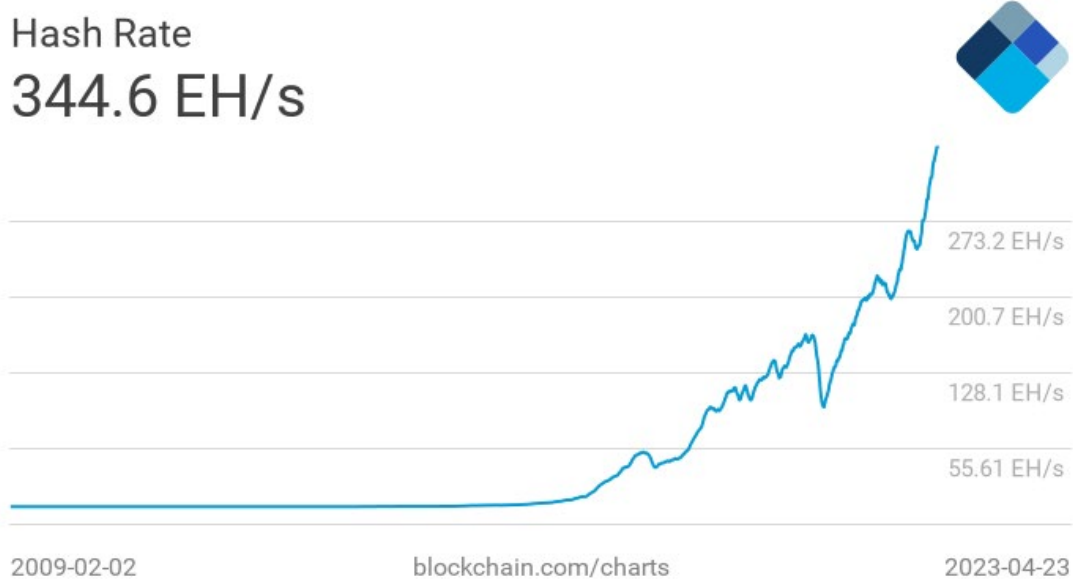


Figure 2-1：比特幣網絡哈希值歷史資料。Y 軸代表哈希值，X 軸代表時間線，圖片取自 blockchain.com。

哈希值在比特幣網絡中是一個動態的值，會隨著時間和礦工參與度的改變而

不斷變化。當網絡中有越來越多的礦工參與挖礦時，網絡的哈希值也會增加；同樣地，當礦工退出挖礦時，網絡的哈希值也會下降。對於比特幣網絡的重要性體現於以下兩點。第一點：能夠保障比特幣網絡的安全性，由於比特幣網絡的安全性依賴於足夠的計算能力來驗證交易和保護區塊鏈不受攻擊。如果網絡中的計算能力不足，那麼攻擊者可能會通過攻擊網絡來實現篡改交易等目的，因此，保持足夠的哈希值對於維護比特幣網絡的安全性是非常重要的。第二點：足夠的哈希值能夠提高區塊鏈的處理速度，在一個具有高哈希值的比特幣網絡中，礦工可以更快地驗證交易和產生新的區塊，這意味著更多的交易可以被快速處理，整個網絡的交易處理效率也會得到提高。

接著，比特幣網絡的另一個關鍵指標是網絡中礦工的數量。由於比特幣採用了工作量證明 (Proof of Work) 共識機制，網絡需要依賴礦工的計算能力來驗證交易並生成新的區塊。這意味著礦工數量對網絡的安全性和運行效率具有重要意義。

礦工數量對於比特幣網絡的重要性有以下兩點。第一點：礦工數量的增加可以提高比特幣的交易處理速度，比特幣網絡上的交易是通過礦工進行計算並驗證才能成功進行，如果礦工數量不足，交易處理速度就會變得緩慢，甚至可能導致交易阻塞，從而影響比特幣的使用體驗。因此，維持足夠的礦工數量對於保障比特幣網絡的正常運行至關重要。第二點：提高礦工數量也可以增強比特幣網絡的安全性。這是因為礦工的算力與比特幣網絡中的哈希值密切相關。當礦工數量增加時，網絡中的總算力也會隨之提高，進而使攻擊者難以通過竄改區塊鏈上的交易來實現非法獲利。因此，增加礦工數量有助於維護比特幣網絡的安全，從而提高比特幣系統的可信度和穩定性。

2.2 系統動力學

系統動力學 (System Dynamics) 是一種綜合應用系統思考、數學模型、電腦模擬等多學科知識的研究方法，主要用於研究和模擬複雜系統的行為和演變過程。它是由美國麻省理工學院的學者 Forrester 在 1961 年所提出。1970s 年代，一篇名為 “The Limits of Growth” 的書透過系統動力學，對全球環境的未來發展進行了預測與分析，該書廣受各大學者關注，也讓愈來愈多的研究者開始應用這種方法論來研究不同領域的問題 (Lasi & Saul, 2020)。

系統動力學的核心是建立動態模型，這些模型通常是基於差分方程和積分方程的數學模型，可以描述系統中各個元素之間的相互作用和反饋，並通過調整模型中各元件之間的參數，可以模擬出系統的不同狀態和變化趨勢，進而進行策略制定和決策分析。

系統動力學被廣泛應用在社會和經濟領域，能夠幫助人們理解這複雜系統的行為與演化規律，而上述所提及的比特幣網絡中的哈希值和礦工數量有著複雜的動態特性。系統動力學有辦法解讀這些複雜的動態特性，從中找到規律並模擬出不同狀態的變化，從而進行預測和分析。因此，系統動力學是一種非常適合研究加密貨幣的方法 (Majakivi, 2019; Mahmoodi, 2022)。

眾多學者已對此進行了全面的研究與探討。例如：Bissias et al. (2018) 曾分析了礦工算力變化對採用工作量證明協議的區塊鏈用戶安全性和使用者體驗所帶來的潛在影響。同時，Kubal and Kristoufek (2022) 的研究中，探討了比特幣價格與比特幣網絡中哈希值的相互關聯。再者，Fantazzini (2020) 著重研究了比特幣價格與算力間的關係。關於比特幣網絡哈希值和礦工數量的研究屢見不鮮，其中，

Gopalakrishnan (2022) 運用系統動力學方法進行模擬與深入分析比特幣網絡哈希值與礦工數量。然而 Gopalakrishnan 在模型中，將礦工的風險態度當作外生變數，並未考慮礦工的不同風險態度，如此將有失真的可能。因此，本研究旨在填補這方面的空白，將針對礦工行為對哈希值和礦工數量的影響展開探討，並運用系統動力學方法進行詳細的模擬與分析，旨在為相關領域的學術研究提供理論參考和實證分析。



Chapter 3 模型建置

3.1 模型背景

本論文參考 Gopalakrishnan (2022) 中所使用的模型，包含兩大部分：

1. 供給端：代表的是礦工透過比特幣挖掘的過程向網絡中添加新的區塊，隨著區塊增加，更多的比特幣被釋放到網絡中，這也是唯一能夠在網絡中增加比特幣數量的方式。
2. 需求端：代表不同用戶之間能夠透過互動以及市場均衡的方式來影響比特幣的價格。在這市場中，用戶可以為買家或賣家，他們能夠將比特幣當作投資或拿來當作替代性的貨幣。

供給和需求是該比特幣網絡中決定比特幣價格的重要兩個因素，能夠透過市場的調節來影響比特幣的供需平衡。模型背後是利用 (1.) 挖礦難度調節 (2.) 挖礦的成本和收益 (3.) 網絡中比特幣數量 (4.) 投資人的投資行為 (5.) 區塊創造時間和區塊創造數量，來達到比特幣網絡的均衡，以利後續分析。

在本研究中，我們將深度探討「比特幣網絡算力和礦工數量」的結構框架，特別聚焦於兩個關鍵內生變數：礦工在網絡中停留的時間 (residence time) 及對礦工退出與投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner exit to ROI)。首先，比特幣價格的波動會影響礦工在網絡中停留的時間，而停留的時間愈長，代表離開網絡的礦工數量愈少，反之，離開網絡的礦工數量愈多，這將會影響到比特幣網絡中礦工的數量。其次，礦工退出與投資報酬率的敏感性代表著礦工對於投資報酬率的敏感程度，若該數值愈大，則當投資報酬率下降一單位時，礦工數量將會有大幅度的減少，而若

該數值愈小，則當投資報酬率下降一單位時，礦工數量減少幅度會縮小，最終都將影響到比特幣網絡中礦工的數量，也因此該兩變數極具研究意義。而其他的模型建置和參數設定本論文參考 Gopalakrishnan (2022) 的模型。

3.2 模型結構

「比特幣網絡算力和礦工數量架構」最主要是探討哈希值和礦工數量的模型架構，從 Figure 3-1 可以看到所展示的雙流向 (co-flow) 模型示意圖，圖中標示紅線粗體的 sensitivity of miner exit to ROI 及 residence time 為本研究中主要的內生變數。如 3-1 所述，這兩個內生變數對於決定礦工數量有顯著的影響，並進一步塑造了網絡中的哈希值，因此在不同價格波動下，針對具有不同風險態度的礦工如何與這兩個內生變數相互作用，進行深入的研究將具有學術價值。

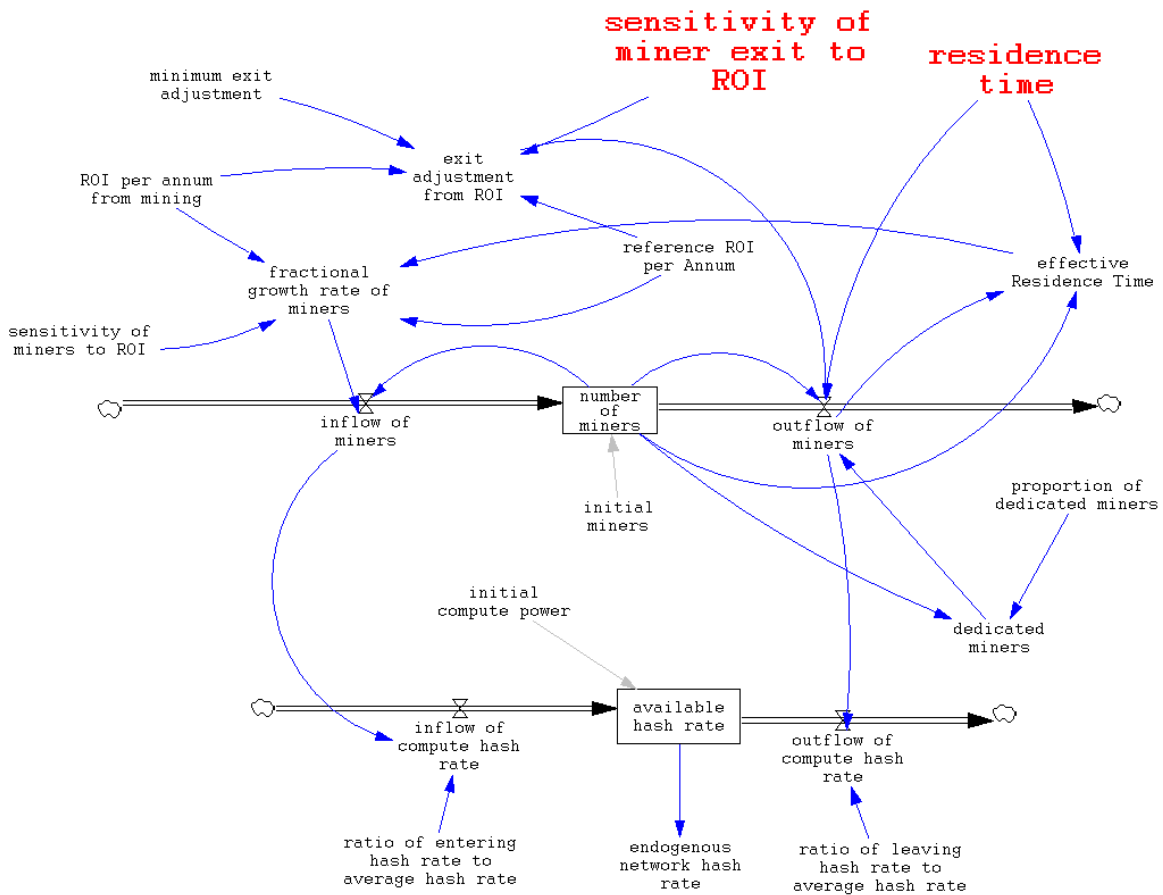


Figure 3-1：比特幣網絡算力和礦工數量架構

礦工數量 (number of miners) 在此架構中，用存量表示，為進場礦工 (inflow of miners) 扣除離場礦工 (outflow of miners)，算式如下：

$$\text{number of miners} = \text{inflow of miners} - \text{outflow of miners}$$

進場礦工 (inflow of miners) 會間接受到投資報酬率 (ROI) 與礦工在網絡中停留的時間 (residence time) 所影響，本研究設計投資報酬率會先決定礦工成長率 (fractional growth rate of miners) 的數值，再影響進場礦工。進場礦工的算式如下：

$inflow\ of\ miners = number\ of\ miners * fractional\ growth\ rate\ of\ miners$

離場礦工 (outflow of miners) 則是直接受到投資報酬率和礦工在網絡中停留的時間影響。離場礦工的算式如下：

$$outflow\ of\ miners = \frac{(number\ of\ miners - dedicated\ miners) * exit\ adjustment\ from\ ROI}{residence\ time}$$

綜上算式設計，當投資報酬率愈高，會使礦工增長的比例提升，使進場礦工上升，反之，離場礦工數量會提升；當礦工在網絡中停留的時間愈長，也會使進場礦工上升，離場礦工下降，反之，進場礦工會下降，離場礦工會上升。

網絡中的哈希值 (available hash rate) 用存量表示，為流入哈希值 (inflow of compute hash rate) 扣除流出哈希值 (outflow of compute hash rate)，算式如下：

$$available\ hash\ rate = inflow\ of\ compute\ hash\ rate - outflow\ of\ compute\ hash\ rate$$

在流入哈希值 (inflow of compute hash rate) 變數中，透過新加入哈希值與平均哈希值的比率 (ratio of entering hash rate to average hash rate) 來量化新進礦工相對於現有礦工的哈希值貢獻。此比例表明新進礦工的哈希值超過原有礦工平均哈希值的百分比。這樣的考量來自於新進礦工通常配備更新、更先進的挖礦設備，從而提供更高的計算能力。算式如下：

inflow of compute hash rate

$$= \text{inflow of miners} * \text{ratio of entering hash rate to average hash rate}$$

在流出哈希值 (outflow of compute hash rate) 變數中，同樣地，透過舊流出哈希值與平均哈希值的比率 (ratio of leaving hash rate to average hash rate) 來表示離場的舊礦工所減少的哈希值會少於礦工平均哈希值多少百分比，此比例反映了退出市場的舊礦工擁有較舊的挖礦設備，無法提供大量計算能力，因此離場時的哈希值將低於平均水平，算式如下：

outflow of compute hash rate

$$= \text{outflow of miners} * \text{ratio of leaving hash rate to average hash rate}$$

綜上算式，可以知道流入哈希值和流出哈希值主要受到進場礦工和離場礦工的影響，進場礦工愈多，會使網絡中流入的哈希值上升，反之，流出哈希值也會提升。

礦工增長率 (fractional growth rate of miners) 用以調整進場礦工 (inflow of miners) 的增長速度，算式如下：

fractional growth rate of miners

$$= \left(\frac{\text{ROI per annum from mining}}{\text{reference ROI per annum}} \right)^{\text{sensitivity of miners to ROI}} \div \text{effective residence time}$$

將每年挖礦投資報酬率 (ROI per annum from mining) 除以每年參考值投資報酬率 (reference ROI per annum) 後，能得到比較後的投資報酬率，並根據礦工對投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner to ROI) 來決定進場礦工程度大小，最後除以礦工在網路停留的時間，得到礦工進場成長率。

根據投資報酬率的礦工退出調整 (exit adjustment from ROI) 在此架構中，用以表示礦工會根據挖礦的投資報酬率而做出離場的決定，算式如下：

$$\text{exit adjustment from ROI} = \text{MAX} \left(\text{minimum exit adjustment}, \frac{\text{ROI per annum from mining}}{\text{reference ROI per annum}} \right)^{\text{sensitivity of miner exit to ROI}}$$

將每年挖礦投資報酬率 (ROI per annum from mining) 除以每年參考值投資報酬率 (reference ROI per annum) 後，能得到比較後的投資報酬率，並根據礦工退出與投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner exit to ROI) 來決定礦工離場程度大小。

在此架構下，本文新增了三種不同礦工行為變數，分別為風險趨避者 (risk-averse, 後續將以 RA 顯示)、風險中立者 (risk-neutral, 後續將以 RN 顯示) 以及風險喜好者 (risk-seeking, 後續將以 RS 顯示)。而區分三種礦工行為的方式是計算比特幣歷史價格的標準差後，經過三種礦工行為圖的轉換得來，詳細會在下一節進行說明。

在本研究中，將探討比特幣礦工對的三種風險態度類型及其對整個比特幣網

絡的影響。然而，由於本研究所使用的僅兩年期間的比特幣歷史價格數據，為確保模型計算的合理性，本研究將針對兩個不同時間長度的價格波動進行分析：短期價格波動 (30 天) 和中長期價格波動 (180 天)。

為了確保分析結果的完整性，本研究將分別對礦工在網絡中停留的時間 (residence time) 以及對礦工退出與投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner exit to ROI) 這兩種應變數產生影響，且分成不同礦工風險態度在不同時框架構下產生的影響，因此可得十三種分析結果 (三種不同礦工風險態度、兩種不同時框架構、兩種不同應變數加上模型預設結果)，在第四章會針對十三種模擬分析的結果進行解釋。

3.3 內外生變數

風險態度一直在經濟學和心理學領域中被用來解釋投資者在面臨不確定性時的行為選擇。根據對風險承受能力的不同程度，風險態度可以分為風險趨避者 (risk-averse)、風險中立者 (risk-neutral) 以及風險愛好者 (risk-seeking)。在比特幣網絡中，挖礦活動本質上是追求投資報酬率的行為。礦工需投入大量時間、資源和金錢來建立並運行挖礦設備，潛在的成本包括設備成本、電力成本以及維護和管理成本等。因此，若礦工所獲得的比特幣收益無法彌補這些成本，礦工可能退出比特幣網絡。

在比特幣網絡中，挖礦獲得的收益主要來自比特幣，而比特幣在市場上的價格對礦工挖礦意願具有顯著影響。然而，比特幣在市場中的未來價格充滿不確定性，無法百分之百預測。因此，在這樣不確定性的報酬下，礦工將會產生前述三種不同

風險態度。

3.3.1 外生變數

比特幣歷史價格：

決定比特幣歷史價格的因素有許多種，例如：有限的比特幣數量、挖礦獎勵、挖礦成本、市場投機者、法規環境等等多不勝數。本研究旨在探討比特幣價格波動對於礦工行為所造成影響後，會對比特幣網絡中的礦工數量、哈希值產生何種作用，因此將比特幣歷史價格作為外生變數來著重探討礦工行為，而不是將比特幣歷史價格設為內生變數。

為了確保模型的準確性，本研究從 Yahoo Finance 網站獲取了 2020 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日的比特幣歷史價格數據，並以收盤價作為參考值。這樣的數據選擇有助於我們更好地理解比特幣市場在此期間的價格波動，進而分析礦工行為與風險態度的關係。

比特幣價格波動：

在獲得歷史價格數據後，我們可以通過計算在不同時間框架下的 z-score 來評估比特幣價格的波動性和風險。算式如下：

$$30 \text{ 天} : Z_t^{30Days} = \frac{Price_t - Avg(Price_{t-1}, Price_{t-2}, \dots, Price_{t-30})}{\sigma}$$

$$180 \text{ 天} : Z_t^{180Days} = \frac{Price_t - Avg(Price_{t-1}, Price_{t-2}, \dots, Price_{t-180})}{\sigma}$$

其中， σ 是計算所有資料的標準差所求得。得出價格波動 Z_t^{30Days} 與

$Z_t^{180Days}$ 後，根據礦工在網絡中停留的時間 (residence time) 以及對礦工退出與投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner exit to ROI) 兩種變數，分別設計了不同的礦工行為模型，以反映他們在比特幣挖礦過程中的風險態度。

3.3.2 內生變數

礦工在網絡中停留的時間 (residence time) :

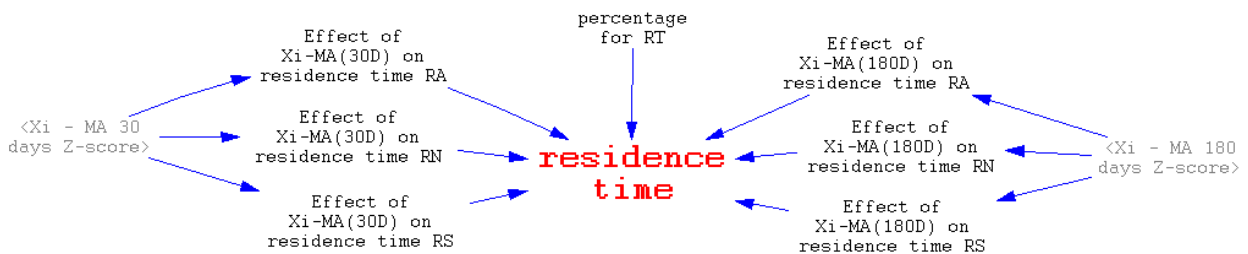


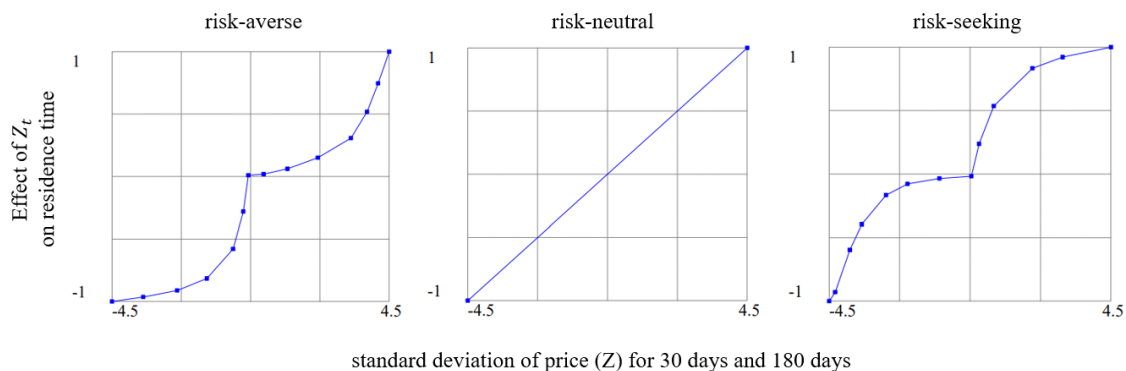
Figure 3-2：礦工在網絡中停留的時間架構，左半邊是短期 (30 天) 價格波動的不同風險態度，右半邊則是中長期 (180 天) 價格波動的不同風險態度。

Figure 3-2 顯示在兩個不同時間價格波動下，三種不同風險態度礦工在網絡中停留的時間的架構圖。本研究在礦工在網絡中停留的時間中，加入以下算式：

$$\varphi^{RT} * Z_t^{30Days} + (1 - \varphi^{RT}) * Z_t^{180Days}$$

其中， φ^{RT} 代表礦工對於短期或中長期的偏重程度。欲計算短期 (30 天) 價格波動對該變數的影響，則將網絡中停留的時間比例 (φ^{RT}) 數值設定為 1；欲計算中長天期 (180 天) 價格波動對該變數的影響，則將該數值設定為小於

1。為了增加分析結果的易懂性，本研究在調整中長期時，預設將該比例調



整為 0.5，來實現控制短期與中長期價格波動的轉換。

Figure 3-3：(左) 表示風險趨避礦工、(中) 表示風險中立礦工及 (右) 表示風險愛好礦工。三張圖顯示礦工受到不確定性狀況後，在網絡中停留時間的增減。Y 軸代表價格波動對礦工停留時間的影響，X 軸代表價格波動。(30 日與 180 日礦工行為並無二致)

Figure 3-3 顯示三種不同風險態度與礦工停留在網絡時間的關係圖，Y 軸為價格波動對礦工停留時間的影響，值範圍從 -1 至 1。若值為 1，則代表價格波動對礦工停留時間有完全正影響；反之，若值為 -1，則代表價格波動對礦工停留時間有完全負影響。

圖左表示風險趨避型礦工的行為，當價格波動 (風險) 呈現負數值時，這意味著比特幣價格負偏離移動平均值。由於礦工在網絡中挖礦會消耗一定的成本，風險趨避型礦工在可能產生負報酬 (收益不足以彌補成本) 的情況下，會迅速降低其待在網絡中的意願，導致礦工在網絡中的停留時間快速下降；相反，當價格波動呈現正數值時，表明比特幣價格正偏離移動平均值。然而，風險趨避型礦工並不會迅速增加其在網絡中的停留時間，因為這類型的礦工需要更高的報酬來承擔單位風險。因此，在這種情況下，風險趨避型

礦工在網絡中的停留時間只會緩慢增加。

圖中表示風險中立型礦工的行為，這類型的礦工在面對風險時，並不會有不固定比例的情形發生。這意味著當價格波動呈現負數值時，該類型礦工會以固定比例降低停留在網絡中的時間；當價格波動呈現正數值時，該類型礦工仍以固定比例增加停留在網絡中的時間。

圖右表示風險愛好型礦工的行為。當價格波動呈現負數值時，由於風險愛好型礦工在風險承擔的意願上更高，即使意識到繼續待在網絡中可能產生負報酬，該類型礦工在網絡中的停留時間只會呈現緩慢下降。而當價格波動呈現正數值時，由於風險愛好型礦工僅需微小報酬便願意承擔單位風險，因此，在這種情況下，風險愛好型礦工在網絡中的停留時間將快速增加。

礦工退出與投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner exit to ROI) :

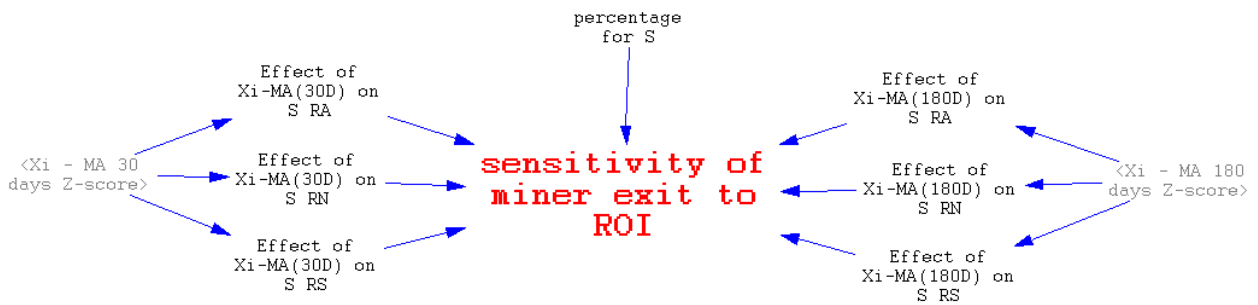


Figure 3-4：礦工退出與投資報酬率的敏感性架構，左半邊是短期（30 天）價格波動的不同風險態度，右半邊則是中長期（180 天）價格波動的不同風險態度。

Figure 3-4 顯示在兩個不同時間價格波動下，三種不同風險態度礦工和退出與投資報酬率的敏感性架構，同樣地，本研究在礦工退出與投資報酬率的敏

感性比例 (sensitivity of miner exit to ROI) 中，加入以下算式：

$$\varphi^{ROI} * Z_t^{30Days} + (1 - \varphi^{ROI}) * Z_t^{180Days}$$

與前述內生變數相同， φ^{RT} 代表礦工對於短期或中長期的偏重程度，預設將此比例調整為 0.5，透過此方法來實現控制短期與中長期價格波動的轉換。

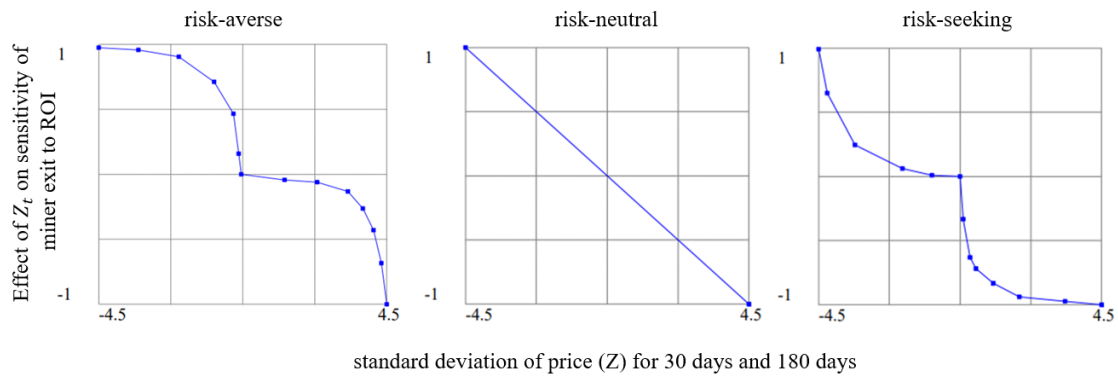


Figure 3-5 (左) 表示風險趨避礦工、(中) 表示風險中立礦工及 (右) 表示風險愛好礦工。三張圖顯示礦工受到不確定性狀況後，對退出與投資報酬率的敏感性。Y 軸代表價格波動使礦工對報酬率的離場敏感程度，X 軸代表價格波動。(30 日與 180 日礦工行為並無二致)

Figure 3-5 顯示了三種不同風險態度礦工對退出與投資報酬率敏感性的關係，Y 軸為價格波動使礦工對報酬率的離場敏感程度，值範圍從 -1 至 1。若值為 1，則代表價格波動將使礦工對報酬率敏感程度有完全正影響；反之，若值為 -1，則代表價格波動將使礦工對報酬率敏感程度有完全負影響。

圖左表示風險趨避型礦工當價格波動呈現負數值時，這意味著比特幣價格負偏離移動平均值，風險趨避型礦工在可能產生負報酬 (收益不足以彌補成本) 的情況下，會迅速提升其對退出與投資報酬率的敏感性，此時可以理解成若投資報酬率下跌，礦工離開比特幣網絡的意願會提升；相反，當價格波動呈

現正數值時，表明比特幣價格正偏離移動平均值，然而風險趨避型礦工不會快速減少敏感性，因為這類型的礦工需要更高的報酬來承擔單位風險。因此，在這種情況下，風險趨避型礦工的敏感性只會慢慢下降。

圖中表示風險中立型礦工，這類型礦工面對風險時，不會有不固定比例的狀況發生。這意味著當價格波動呈現負數值時，該類型礦工會以固定比例增加對退出與投資報酬率的敏感性；當價格波動呈現正數值時，該類型礦工仍以固定比例減少退出與投資報酬率的敏感性。

圖右表示風險愛好型礦工的行為。當價格波動呈現負數值時，由於風險愛好型礦工在風險承擔的意願上更高，即使意識到繼續待在網絡中可能產生負報酬，該類型礦工對退出與投資報酬率的敏感性只會緩慢增加。而當價格波動呈現正數值時，由於風險愛好型礦工僅需微小報酬便願意承擔單位風險，因此，在這種情況下，風險愛好型礦工對退出與投資報酬率的敏感性會快速降低，意味著想待在網絡的意願提升。

Chapter 4 模型分析與結果

在理解模型的整體架構後，本研究透過參數調整，達到尚未加入礦工風險態度之前的平衡數值。內生變數：礦工在網絡中停留的時間 (residence time) 的預設數值設定為 1825；礦工退出與投資報酬率的敏感性 (sensitivity of miner exit to ROI) 的預設數值設定為 0.0625，並載入比特幣歷史價格真實數據，如 Figure 4-1 所顯示。

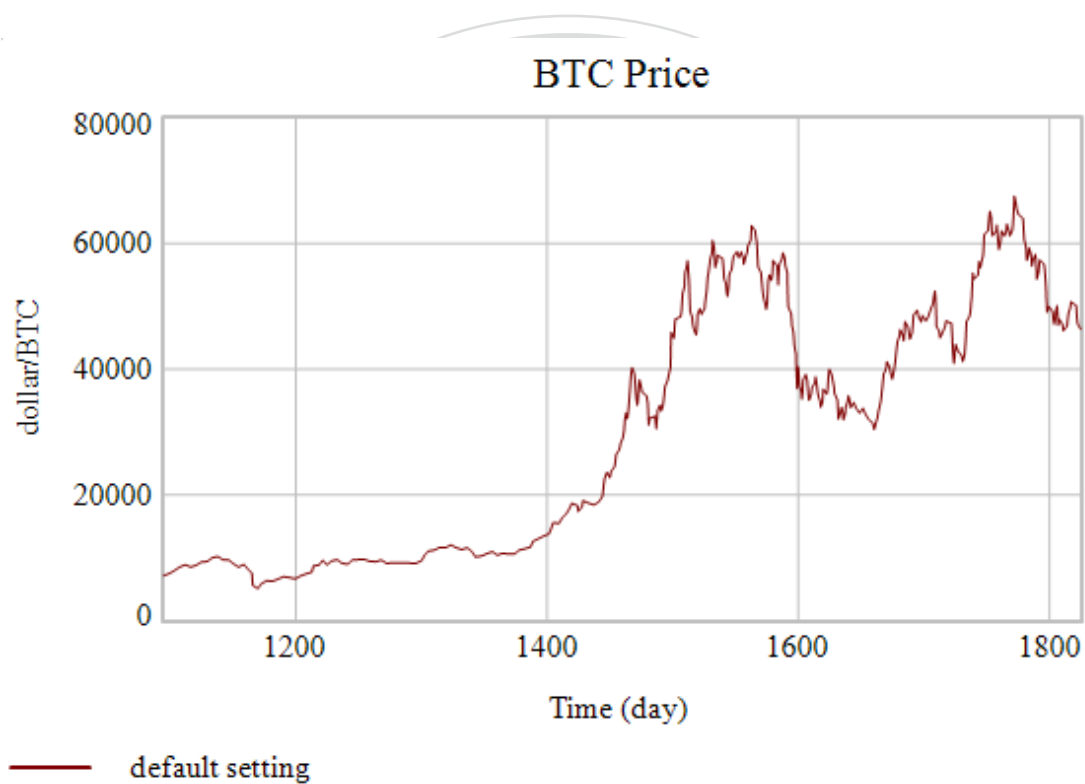


Figure 4-1：比特幣歷史價格圖，從 2020/01/01 至 2021/12/31。

礦工數量在模型預設時，會呈現穩定的增長趨勢。這種現象的主要原因在於，礦工認為參與挖礦行為能夠獲得一定的收益，這意味著投資報酬率是正面的。因此，在這種情況下，新加入的礦工數量穩定地稍高於退出的礦工數量，如 Figure 4-2 左圖所示

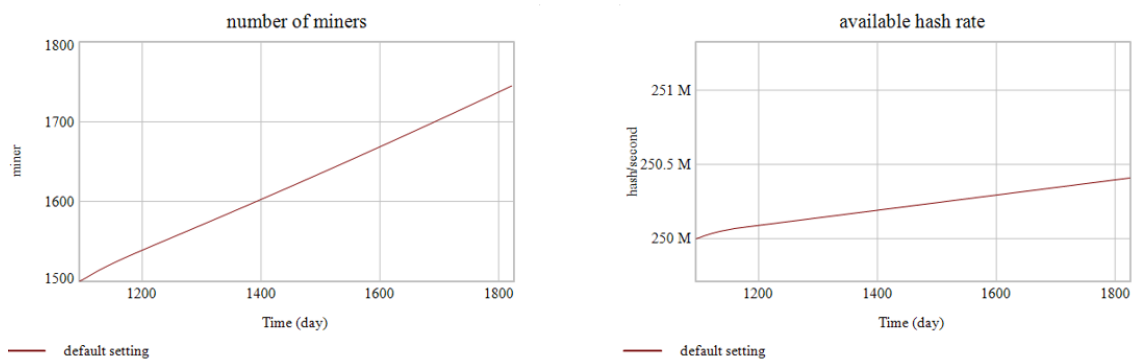


Figure 4-2：圖左為礦工數量，圖右為網絡中目前存在的哈希值。

在哈希值部分，當目前網絡達到哈希值均衡值，哈希值存在穩定上升，維持在 250 百萬／日上下，這意味著流入礦工所帶來的哈希值大於流出礦工所帶走的哈希值，如 Figure 4-2 右圖所示。

本研究將分析拆分成下列幾種方式，並依照順序呈現：

- A. 在短天期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係，對礦工數量與哈希值的影響。
- B. 在短天期、中長天期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係，對礦工數量與哈希值的影響。
- C. 在短天期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係且加入礦工退出與投資報酬率的敏感性後，對礦工數量與哈希值的影響。
- D. 在短天期、中長天期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係且加入礦工退出與投資報酬率的敏感性後，對礦工數量與哈希值的影響。

E. 其他分析。

A. 在短天期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係，對礦工數量與哈希值的影響 (以 RT 30days RA/RN/RS 示例)：

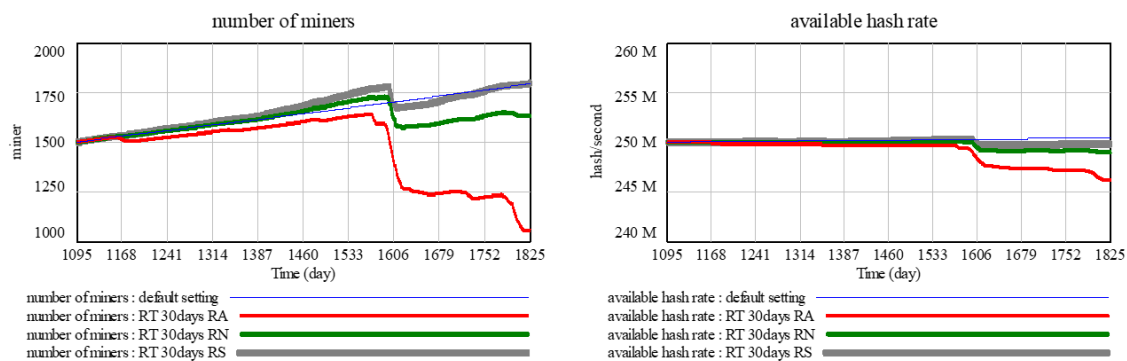


Figure 4-3：圖左為礦工數量，圖右為網絡中目前存在的哈希值。

Figure 4-3 左圖展示了礦工數量的變化。在 $t < 1600$ 時，由於比特幣價格穩定上升，三種不同風險態度的礦工數量均呈現穩定增長。然而，在 $t > 1600$ 時，比特幣價格經歷了一次較大幅度的下跌 (約 -45%)，導致三種風險態度的礦工數量都出現了下降。特別值得關注的是，風險趨避礦工 (用 RA 表示) 的數量減少幅度最大，其次是風險中立礦工 (用 RN 表示)，最後是風險喜好礦工 (用 RS 表示)。這種現象可以解釋為，在價格下跌時，雖然所有礦工都認為挖礦所獲得的比特幣獎勵無法抵消挖礦成本，但是風險趨避礦工對於這種想法更加強烈，因此更大幅減少在網絡上挖礦的時間，以規避損失。

右圖表展示了網絡哈希值的變化，其結果與礦工數量的變化趨勢相似。這主要是因為風險趨避礦工減少了在網絡上挖礦的時間，間接導致網絡中哈希

值的下降幅度大於其他風險態度的礦工。

B. 在短天期、中長期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係，對礦工數量與哈希值的影響（以 RT 30days+180days RA/RN/RS 示例）：

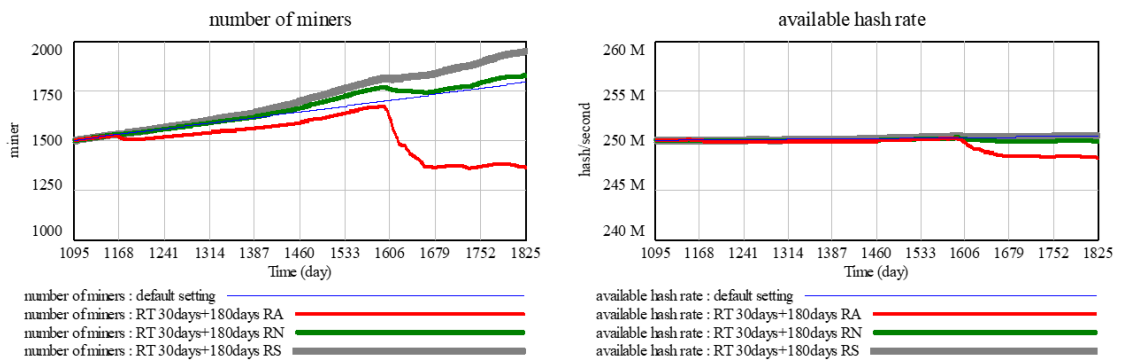


Figure 4-4：圖左為礦工數量，圖右為網絡中目前存在的哈希值

Figure 4-4 左圖展示了在短期、中長期價格波動下的礦工數量變化。在 $t < 1600$ 時，三種不同風險態度的礦工的變化趨勢與前述實驗結果 A 相同。有趣的是，在 $t > 1600$ 時，風險喜好的礦工並未因價格劇烈下跌而顯著減少網絡中的礦工數量。反而，儘管價格未立即恢復到之前的水平，礦工數量仍呈現穩定增長。本研究認為這一現象的解釋為，中長期價格波動較為平穩，且考慮中長期價格波動的礦工，對比特幣是抱有前景持樂觀態度，因此在網絡中的停留時間維持不變，甚至增加，使得礦工數量能無視價格下降的影響而持續增長。

右圖則顯示了網絡哈希值的變化，與模擬結果 A 的趨勢相似，僅風險趨避礦工在網絡中的哈希值明顯減少。

值得關注的是，比較模擬結果 A 與模擬結果 B，我們可以發現在礦工數

量方面，若 $t > 1600$ ，相對於僅考慮短期價格波動的礦工，考慮中長期價格波動因素的礦工數量下降幅度較小，網絡哈希值變化也呈現相似結果，且網絡中哈希值也是相似結果。Figure 4-5 以風險趨避礦工為例，展示了模擬結果 A 與模擬結果 B 的比較圖。

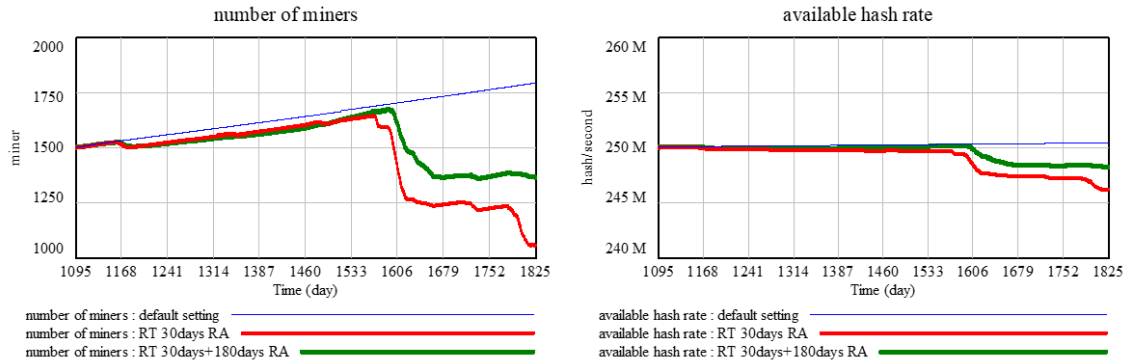


Figure 4-5：只考慮短期價格波動 v.s 考慮短期、中長期價格波動的礦工數量 (左)
與哈希值 (右)

本研究認為這一結果的成因在於：考慮中長期價格波動的礦工並不是短視近利的，他們對未來的收益持有期待，因此無論其風險態度如何，整體上他們的風險承受能力應該是相對較高的。在面臨價格下跌時，這些礦工並不會大幅縮短在網絡中的停留時間。另一方面，僅考慮短期價格波動的礦工在面對價格下跌時，可能會擔心收益受到侵蝕，因此會大幅減少在網絡中的停留時間。

C. 在短天期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係
且加入礦工退出與投資報酬率的敏感性後，對礦工數量與哈希值的影響。

(以 RT 30days + S 30days RA/RN/RS 示例)：

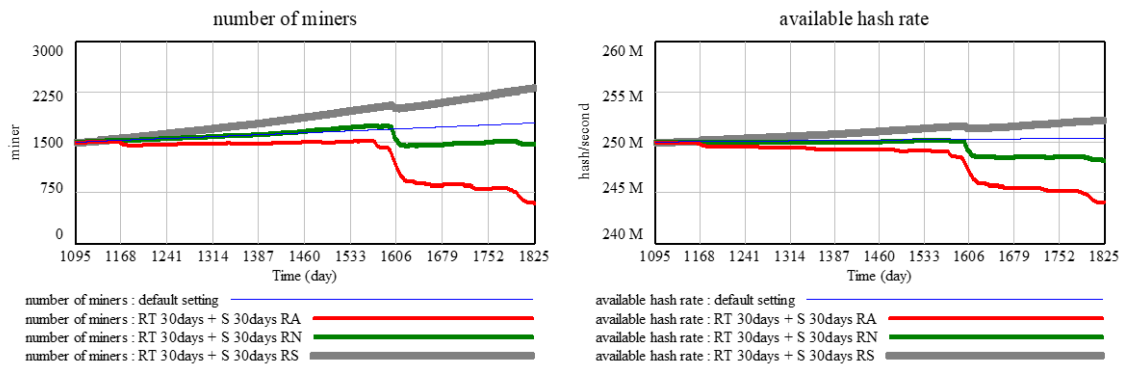


Figure 4-6：圖左為礦工數量，圖右為網絡中目前存在的哈希值

Figure 4-6 左圖展示了在短期價格波動下，考慮礦工停留在網絡中的時間且礦工退出與投資報酬率的敏感性後的礦工數量圖。在 $t > 1600$ 後，可以發現與模擬結果 A 或模擬結果 B 相比，風險趨避礦工在礦工數量方面，下降的幅度明顯較大。在 $t = 1825$ 時，礦工數量下降至 750 左右；而風險喜好礦工在礦工數量方面，上升的幅度明顯較大。在 $t = 1825$ 時，礦工數量上升至 2250 左右。這一現象可以解釋為，在這種情況下，三種風險態度的礦工都將投資報酬率納入考量，對價格變動更加敏感。因此，風險趨避和風險喜好兩種不同態度的礦工在礦工數量上會出現明顯變化。

右圖則展示了網絡中哈希值的變化，與前述礦工數量的結果相同，哈希值變化與模擬結果 A 或模擬結果 B 相比，也有一定差距。

D. 在短天期、中長期價格波動下，三種不同風險態度礦工與停留在網絡時間的關係且加入礦工退出與投資報酬率的敏感性後，對礦工數量與哈希值的影響。(以 RT 30 180days + S 30 180days RA/RN/RS 示例)：

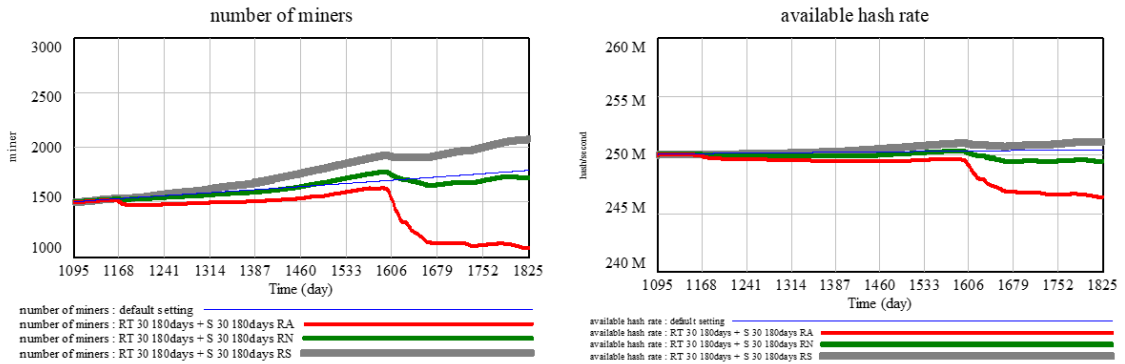


Figure 4-7：圖左為礦工數量，圖右為網絡中目前存在的哈希值

Figure 4-7 左圖展示了在考慮短期與中長期價格波動、礦工停留在網絡中的時間以及礦工退出與投資報酬率敏感性的礦工數量變化。在 $t > 1600$ 之後，與模擬結果 C 相比，風險趨避礦工的礦工數量下降幅度並不顯著，風險喜好礦工的礦工數量上升幅度也相對較小。這一現象可以合理解釋為在考慮了中長期價格波動後，無論風險態度如何，這些礦工已經不再是短視近利者。因此，即使他們對價格變動具有一定敏感度，也不會大幅縮短在網絡中的停留時間，所以相對於模擬結果 C，礦工數量的變化較不明顯。

右圖展示了網絡中哈希值的變化。該變化也沒有模擬結果 C 明顯，因此與上述解釋相同。

E. 其他分析

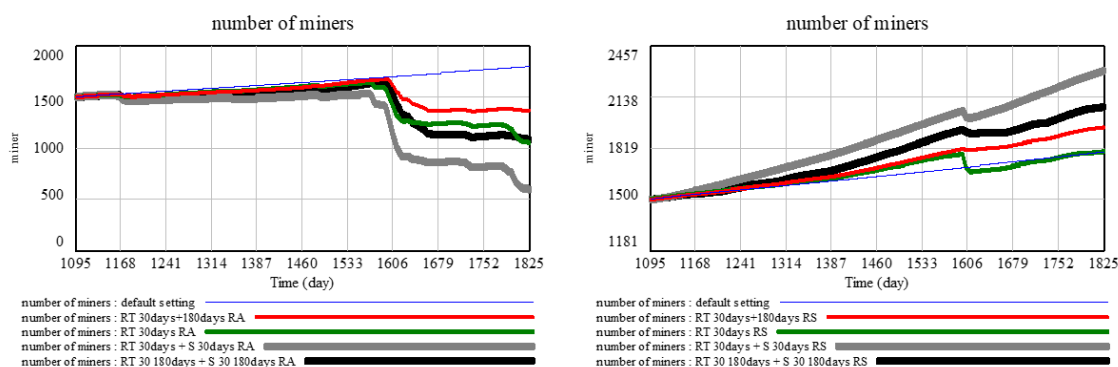


Figure 4-8：模擬結果 A、B、C 與 D 對礦工數量的影響，圖左探討風險趨避礦工的模擬結

果，圖右則探討風險喜好礦工的模擬結果。

Figure 4-8 左圖展示了風險趨避礦工在四種模擬結果中對礦工數量的影響。其中，模擬結果 C (考慮短期價格波動且考慮停留在網絡中時間和報酬率敏感性) 的風險趨避礦工，礦工數量下跌幅度在四種模擬結果中最大。右圖則展示了風險喜好礦工在四種模擬結果中對礦工數量的影響。在這些結果中，模擬結果 C 的礦工數量上升速度較快。

根據 Figure 4-8 的分析，本研究認為在模擬結果 C 中的礦工，無論其風險態度如何，由於僅關注報酬率並對價格變動敏感，因此他們在網絡中的停留時間會有最大的波動。這一特點使得模擬結果 C 中礦工數量的變化相對於其他模擬結果更為明顯。

Chapter 5 結論與未來展望

5.1 研究結論

礦工對風險態度的差異對比特幣網絡具有顯著影響，然而，有關這一領域的研究仍相對較少。本研究利用 2020 年至 2021 年的比特幣歷史價格數據，並採用系統動力學方法來模擬比特幣網絡的實際狀況。通過對礦工在風險態度（風險趨避、風險中立和風險喜好）及不同時間價格波動（短期和中長期）的變化進行研究，我們探討了比特幣網絡的變化情況，特別關注網絡中礦工數量和哈希值的變化。

在本研究中，我們觀察到礦工風險態度的差異對比特幣網絡具有顯著影響。具體而言，風險趨避礦工在面對比特幣價格下跌的情況時，往往會縮短在網絡中挖礦的時間，導致礦工數量和網絡中的哈希值顯著下降。相對地，風險喜好型礦工在比特幣價格下跌期間，能夠保持相對穩定的礦工數量，並在價格回升時迅速恢復到下跌前的水平，這使得網絡中的哈希值維持在一個相對穩定的增長範圍。

為了更深入地探究此問題，我們將研究的焦點擴展到了短期和中長期價格波動的影響。研究結果顯示，在具有相同風險態度的礦工群體中，他們對短期價格波動的反應更為敏感。換句話說，價格下跌期間，只考慮短期的礦工，其礦工數量會更快地下降，從而導致網絡中哈希值更迅速地降低。

本研究模擬出來的結果，與現實中比特幣網絡的現況一致。依據我們的模擬結果顯示，面對比特幣價格的初始下跌，風險偏好型的礦工數量會短暫地減少。然而，經過一段時間後，礦工數量將緩慢地回升，甚至超越價格下跌之前的礦工數量，由此使得網絡中的哈希值能夠維持在一個穩定的增長範圍。在現實世界中，比特幣投

資者相較於其他金融產品的投資者，顯得更加偏好風險。每當比特幣價格出現大幅度的下跌時，礦工數量也會短暫地下降，隨後又會恢復且上升，這使得網絡中的哈希值能保持在穩定的增長範圍內。這一現象與我們的模擬結果相吻合，從而驗證了模型的有效性。

5.2 未來展望

本研究揭示了礦工風險態度對比特幣網絡穩定性的影響，尤其在短期與中長期價格波動的情景下，這樣的影響更為顯著。這些發現對於深化我們對比特幣網絡的理解具有重要價值。然而，本研究存在一些局限性，這也將成為我們未來研究的方向和焦點：

1. 歷史價格資料範疇：本論文參考 Gopalakrishnan (2022) 所使用的比特幣網絡模型，而該篇論文發布時間為 2022 年，為了確保模型完整性，本研究所使用的歷史價格資料僅涵蓋了 2020 年至 2021 年的數據，尚未包含最新的資訊。為了讓研究結果更具時效性和廣泛性，未來研究應考慮擴展資料範圍並針對模型參數進行相應調整。
2. 礦工行為分類：本研究針對三種不同風險態度的礦工行為進行了探討，包括風險趨避、風險中立和風險偏好。然而，實際上比特幣網絡中的礦工可以被劃分為礦池和個人礦工，因此衍生出的礦工行為遠不止以上三種類型。未來研究可以將關注點放在不同情境下的礦工行為以及它們如何影響比特幣網絡，以期更深入地理解比特幣網絡的實際運作。
3. 影響範疇：本研究主要探討了礦工行為如何影響網絡中的礦工數量與哈希

值，從而揭示比特幣網絡運作機制。然而，對比特幣網絡的影響不僅限於此，還可能涉及比特幣交易手續費、交易確認速度、區塊產生速度和挖礦難度等方面。未來研究可以將焦點擴展至這些相關變數，以獲得更全面的理解。



參考文獻

- Bissias, G., Levine, B.N., & Thibodeau, D. (2018). *Using Economic Risk to Model Miner Hash Rate Allocation in Cryptocurrencies*, Lecture Notes in Computer Science, 11025, 155–172.
- Eyal, I. & Sirer, E. G. (2013). *Majority is not enough: bitcoin mining is vulnerable*, Communications of the ACM (July). 61(7), 95-102.
- Fantazzini, D. & Kolodin, N. (2020). *Does the Hashrate Affect the Bitcoin Price?* Journal of Risk and Financial Management. 13(11), 263.
- Forrester, J.W. (1993). *System Dynamics and the Lessons of 35 Years*. In: De Greene, K.B. (eds) *A Systems-Based Approach to Policymaking*. Springer, Boston, MA.
- Gopalakrishnan, V. (2022). *Modeling the Trajectory of Bitcoin using System Dynamics*, (Master's thesis). System Design and Management Program, Massachusetts Institute of Technology.
- Härdle, W.K., Harvey, C.R. and Reule, R.C.G. (2020). *Understanding Cryptocurrencies*, Journal of Financial Econometrics. 18(2), 181-208.
- Kroll, J.A., Davey, I.C., & Felten, E.W. (2013). *The Economics of Bitcoin Mining, or Bitcoin in the Presence of Adversaries*. The 12th Workshop on the Economics of Information Security, Washington DC, 11-12 June 2013.
- Kubal, J. & Kristoufek, L. (2022). *Exploring the relationship between Bitcoin price and network's hashrate within endogenous system*, International Review of Financial Analysis. Elsevier, 84, 102375.
- Lasi, D. & Saul, L. (2020). *A System Dynamics Model of Bitcoin: Mining as an Efficient Market and the Possibility of 'Peak Hash'*, Applied Economics and Finance, 7(4), 78-88.

- Li, K., Liu, Y., Wan, H. & Huang, Y. (2021). *A discrete-event simulation model for the Bitcoin blockchain network with strategic miners and mining pool managers*, Computers & Operations Research. 134, 105365.
- Mahmoodi, S., Jalaei, S.A. & Sadeghi, Z. (2022). *Investigation of Environmental Effects of Bitcoin Mining Using System Dynamics Method*, (Doctoral thesis). Shahid Bahonar University.
- Majakivi, A. (2019). *Modeling the Bitcoin Ecosystem*, (Master's thesis). Aalto University. School of Electrical Engineering.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. (1972). *The limits of growth.:* Potomac Associates.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.
- Qin, R., Yuan, Y., Wang, S., and Wang, F. -Y., (2018). *Economic Issues in Bitcoin Mining and Blockchain Research*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 268-273.