



**Kauno technologijos universitetas**  
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

# **Arbitražo galimybių vertinimas kriptovaliutų rinkoje taikant grafų teoriją**

Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Dovilė Drazdovaitė**  
Projekto autorė

Doc. Kristina Šutienė  
Vadovė

Prof. Lina Dagilienė  
Vadovė

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

# **Arbitražo galimybių vertinimas kriptovaliutų rinkoje taikant grafų teoriją**

Baigiamasis magistro studijų projektas  
Didžiųjų verslo duomenų analitika (6213AX001)

---

**Dovilė Drazdovaitė**

Projekto autorė

**Doc. Kristina Šutienė**

Vadovė

**Prof. Lina Dagilienė**

Vadovė

**Doc. Audrius Kabašinskas**

Recenzentas

**Doc. Šviesa Leitonienė**

Recenzentė

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

Dovilė Drazdovaitė

## **Arbitražo galimybių vertinimas kriptovaliutų rinkoje taikant grafų teoriją**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autorius ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Dovilė Drazdovaitė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Dovilė Drazdovaitė. Arbitražo galimybių vertinimas kriptovaliutų rinkoje taikant grafų teoriją. Magistro studijų baigiamasis projektas vadovės doc. Kristina Šutienė, prof. Lina Dagilienė; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Taikomoji matematika.

Reikšminiai žodžiai: arbitražas, kriptovaliutos, grafų teorija.

Kaunas, 2021. 54 p.

### **Santrauka**

Kriptovaliutų rinka yra labai plati ir pasižyminti nepastovumu, todėl atsiranda palankios galimybės susidaryti arbitražui. Tyrime pateikiamos 5 keityklos, esančios JAV ir JK rinkose, duomenų rinkinio laikotarpis prasideda nuo 2019 metų pradžios ir baigiasi 2020 metų lapkritį, siekiant išsiaiškinti ar situacija rinkoje per COVID-19 pandemiją keitėsi. Keitykloms apibūdinti naudojami centrališkumo rodikliai, jų potencialui nustatyti aprašytas optimizavimo uždavinys. Didžiausi arbitražo vidurkiai gauti keityklose *Cexio* ir *Bitstamp*. Remiantis rodikliais valiutos pardavimui labiausiai tinkama *Gemini* keitykla, o pirkimui *Cexio*. Šioje keitykloje taip pat yra geriausia galimybė susidaryti arbitražui. Palankiausia įsigijimui taip pat yra *Cexio* keitykla, ji taip pat rodo ir gerus pardavimo pelningumo rezultatus. COVID-19 pandemija arbitražo susidarymo galimybei įtakos neturėjo, tačiau susidaręs arbitražas buvo didesnis nei įprastai. Potencialiausia keityklų pora didžiausiam arbitražo susidarymui yra *Bittrex* ir *Bitstamp*.

Drazdovaitė Dovilė. Evaluation of Arbitration Possibilities in Cryptocurrency Market Using Graph Theory. Master's Final Degree Project / supervisors assoc. prof. Kristina Štutienė, prof. Lina Dagilienė; Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Applied Mathematics.

Keywords: argitrage, cryptocurrency, graph theory.

Kaunas, 2021. 54 p.

### **Summary**

The cryptocurrency market is very wide and volatile, which creates favorable opportunities for arbitrage. The data set for the 5 exchanges in the USA and UK markets presented in the research starts in the beginning of 2019 and ends in November 2020 to find out whether the market situation changed during the COVID-19 pandemic. Indicators of centrality are used to describe the exchanges, and the optimization task is described to determine their potential. The highest arbitrage averages were obtained at Cexio and Bitstamp exchanges. According to indicators, the currency is most suitable for the sell in Gemini exchange and for the buying in Cexio. This exchange is also the best opportunity for arbitration. The Cexio exchange is also the most favorable for the currency acquisition, it also shows good sales profitability results. The COVID-19 pandemic did not affect the possibility of arbitrage, but the resulting arbitrage was higher than usual. The most potential pair of exchanges for the largest arbitrage formation are Bittrex and Bitstamp.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Kriptovaliutų rinkos ir arbitražo galimybių vertinimo mokslinės literatūros apžvalga ....</b>	<b>11</b>
1.1. Kriptovaliutų rinkos tyrimas.....	11
1.2. Bitkoino atliktų tyrimų analizė .....	13
1.3. Arbitražo susidarymo atliktų tyrimų analizė .....	18
1.4. Grafų panaudojimas finansų rinkoje .....	20
<b>2. Arbitražo galimybių vertinimo kriptovaliutų rinkoje metodika .....</b>	<b>26</b>
2.1. Tyrimo eiga .....	26
2.2. Duomenų rinkinys ir jo apimtis .....	27
2.3. Naudojama programinė įranga .....	28
2.4. Koreliacinė analizė .....	29
2.5. Arbitražo apskaičiavimo metodai .....	30
2.6. Grafų sudarymas ir centrališkumo parametrų apskaičiavimas .....	31
2.7. Optimizavimo uždavinys.....	33
<b>3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas.....</b>	<b>35</b>
3.1. Bitkoino kainos dinamika laike .....	35
3.2. Koreliacijos analizė .....	36
3.3. Arbitražo analizė kriptovaliutų rinkoje .....	38
3.4. Grafų sudarymas ir gautų centrališkumo rodiklių analizė.....	40
3.5. Optimizavimo uždavinio rezultatai .....	46
3.6. Lyginamoji rezultatų analizė .....	49
<b>Išvados .....</b>	<b>51</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>52</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>54</b>
1 priedas. Skirtumai tarp <i>in</i> ir <i>out</i> reikšmių .....	54

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Bitkoino koreliacija su pagrindinėmis valiutomis, adaptuota pagal [13] .....	14
2 lentelė. Koreliacija tarp didžiausio bitkoino keitimų dydžio per dieną ir bitkoino <i>Open Price</i> , adaptuota pagal [22] .....	18
3 lentelė. Koreliacijos laipsniai pagal klasifikavimo standartus.....	29
4 lentelė. Prekybos sprendimų medis, adaptuota pagal A. Shynkevich straipsnį [24].....	31
5 lentelė. Arbitražo gražų statistika tarp keityklų porų .....	39
6 lentelė. Arbitražo gražų statistika tarp keityklų panaikinus neigiamas reikšmes .....	40
7 lentelė. <i>In-degree</i> ir <i>out-degree</i> skirtumai .....	46
8 lentelė. Didžiausią arbitražo potencialą turėjusios keityklų poros .....	48
9 lentelė. Išreitinguotos keityklų poros pagal arbitražo potencialą .....	49

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Geriausiai įvertintos keityklos pagal mainų rezultatų rodiklį, adaptuota pagal <i>CoinMarketCap</i> .....	12
2 pav. Kripto valiutų dalis rinkoje [7] .....	13
3 pav. Bitkoino kainos kitimas laike nuo jo išleidimo pradžios [C12].....	14
4 pav. Keityklos, vertinamos pagal informacijos dalinimąsi [17].....	16
5 pav. Baimės lygis ir bitkoino kainos evoliucija [19].....	17
6 pav. Arbitražo grąžos vidurkis, adaptuota pagal [24].....	19
7 pav. Arbitražo galimybės susidarymo pavyzdys [27] .....	20
8 pav. Grafo struktūra.....	21
9 pav. Gautas minimalus svorių medis [31] .....	22
10 pav. Laipsnio centrališkumo reikšmės [32].....	23
11 pav. Porų ryšiai tarp realizuoto bitkoino nepastovumo [34] .....	24
12 pav. Tyrimo eiga.....	27
13 pav. Pradinio duomenų rinkinio apimtys.....	28
14 pav. Slenkančios koreliacijos atvaizdavimas [35].....	29
15 pav. Gretimumo matrica .....	32
16 pav. Bitkoino kainų dinamika laike.....	35
17 pav. Bitkoino kainų dinamika laike 2019 metų pradžioje .....	36
18 pav. Keityklų kintamųjų koreliacinė matrica .....	37
19 pav. Slenkanti koreliacija tarp kintamųjų .....	37
20 pav. Sudarytas grafas vienam laiko momentui .....	41
21 pav. Centrališkumo rodikliai savaitės dienomis .....	42
22 pav. <i>Authority</i> rodiklis kintantis laike .....	42
23 pav. <i>Hub</i> rodiklis kintantis laike.....	43
24 pav. <i>Page rank</i> rodiklis kintantis laike .....	43
25 pav. <i>Gemini</i> keityklos <i>in-degree</i> ir <i>out-degree</i> .....	44
26 pav. <i>Bitfinex</i> keityklos <i>in-degree</i> ir <i>out-degree</i> .....	44
27 pav. <i>Cexio</i> keityklos <i>in-degree</i> ir <i>out-degree</i> .....	45
28 pav. <i>Bittrex</i> keityklos <i>in-degree</i> ir <i>out-degree</i> .....	45
29 pav. <i>Bitstamp</i> keityklos <i>in-degree</i> ir <i>out-degree</i> .....	45
30 pav. Didžiausi arbitražai tarp keityklų porų .....	47



## Įvadas

Arbitražas, tai uždarbis, gaunamas iš kainų skirtumo, kai prekė vienoje rinkoje yra nuperkama pigiau ir kitoje parduodama brangiau. Arbitražo galimybėmis prekybininkai naudojami vertybinių popierių rinkoje, ne išimtis ir kriptovaliutų rinka. Ši rinka yra labai plati, pasaulyje yra daugiau nei 500 kriptovaliutų keityklų, o pačių kriptovaliutų daugiau nei 4 500. Viena populiariausių ir žinomiausių valiutų – bitkoinas yra dažniausiai parduodama valiuta keityklose. Bitkoino pirminis populiarumas buvo atspirties taškas kitų kriptovaliutų atsiradimui, (N. Gandal'as, H. Halaburda, 2014). Kadangi bitkoinas yra populiariausia ir brangiausiai vertinama valiuta, su ja yra atlikta daug įvairių tyrimų, tokių kaip bitkoino panaudojimas kitų valiutų papildymui (J. Carrick'as, 2016), tyrime teigiama, kad pagrindinės valiutos, tokios kaip JAV doleris, su bitkoinu yra labai reikšmingai susijusios. Bitkoino prekybos mastai priklauso nuo informacijos dalijimosi ir pagrindinių kasybos vietų, didžiausi pardavėjai randami Šiaurės Amerikoje, Europoje ir Azijoje (N. Gandal'as, H. Halaburda, 2014). Šios valiutos vertė yra nustatoma tose biržose, kur yra didelės pardavimų apimtys, 2014 metais dominavo biržos *Mt Gox* ir *BTC-e* (M. Brandvold'as ir kiti, 2015). Bitkoino kainos dinamika priklauso ir nuo esamos situacijos pasaulyje. Naujausi tyrimai parodo, kad COVID-19 pandemija palietė ir kriptovaliutų rinkas (C. Chen'as ir kiti, 2020, J. W. Goodell'as ir kiti, 2021, Y. Huang'as ir kiti, 2021, J. Johnson'as, 2020). Bitkoino kaina, pagal tyrimus, atitinkamai reaguoja į kintančias ekonomines aplinkybes. Atlikti tyrimai ir su arbitražo galimybių vertinimu kriptovaliutų rinkose, iki 2018 metų susidarantis arbitražas bitkoinų rinkoje buvo didesnis nei prasidėjus 2018 metams, kada biržos bitkoinu prekiaavo griežtesniu diapazonu (A. Shynkevich'ius, 2020). Taip pat, įdomus pastebėjimas, kad arbitražas yra labiau tikėtinas tarp kripto ir grynos valiutos nei tarp dviejų kriptovaliutų (I. Makarov'as ir kiti, 2018). Taip pat buvo atlikti tyrimai vertinantys arbitražo strategijų stiprumą (S. Bistarelli ir kiti, 2019) ir ar arbitražą lemia vyriausybės įsikišimas (G. Pieters ir S. Vivanco, 2015). Vienas iš būdų atlikti rinkos analizę yra pritaikyti grafų teoriją. Vieni iš pirmųjų tyrimų buvo atlikti su socialiniais tinklais (A. Kheyrkhah'as ir kiti, 2016). Taip pat, buvo tirti akcijų ir kriptovaliutų tinklų panašumai ir skirtumai, taikant minimalius svorių grafus (M. Durcheva, Tsankov'as, 2019). Tinklo panaudojimas ir centrališkumo rodiklių vertinimas buvo naudojamas įvertinti sisteminei rizikai, kuri sukelia didelius finansinius sunkumus (W. Huang'as ir kt., 2015), taip pat centrališkumus vertino ir akcijų rinkoje (H. E. Moghadam'a ir kiti, 2019). Kriptovaliutos, ypač bitkoinas, yra viena iš labiausiai nagrinėjamų temų šiuo laikotarpiu. Kadangi atlikti tyrimai parodo, kad įmanoma taikant grafų teoriją įvertinti tokias kaip akcijų rinkas, išskyla klausimas, **kaip grafų teorijos taikymas padeda nustatyti arbitražo galimybes kriptovaliutų keityklose?**

**Tyrimo tikslas:** atlikti bitkoino arbitražo susidarymo kriptovaliutų rinkoje tyrimą taikant grafų teorijos metodus ir identifikuoti didžiausią arbitražo potencialą turinčias keityklų poras.

### Darbo uždaviniai:

1. Ištirti mokslinėje literatūroje analizuojamas temas apie kriptovaliutų rinkas, atliktus tyrimus susijusius su bitkoinu ir arbitražo susidarymu rinkose bei grafų teorijos panaudojimą finansų rinkoje;
2. Sudaryti arbitražo galimybių vertinimo kriptovaliutų rinkoje metodiką;
3. Išanalizuoti pasiekiamus duomenis, juos susisteminti bei atlikti koreliacinę analizę, siekiant įvertinti kainų priklausomybes skirtingose bitkoino keityklose;
4. Apskaičiuoti arbitražą, taikant A. Shynkevich'iaus (2020) pasiūlytą prekybos algoritmą;

5. Atlikti arbitražo analizę taikant grafų teorijos metodus, apskaičiuoti centrališkumo parametrus ir įvertinti keityklų charakteristikas;
6. Identifikuoti keityklas, generuojančias didžiausią arbitražo potencialą;
7. Vertinti COVID-19 pandemijos įtaką arbitražo susidarymui.

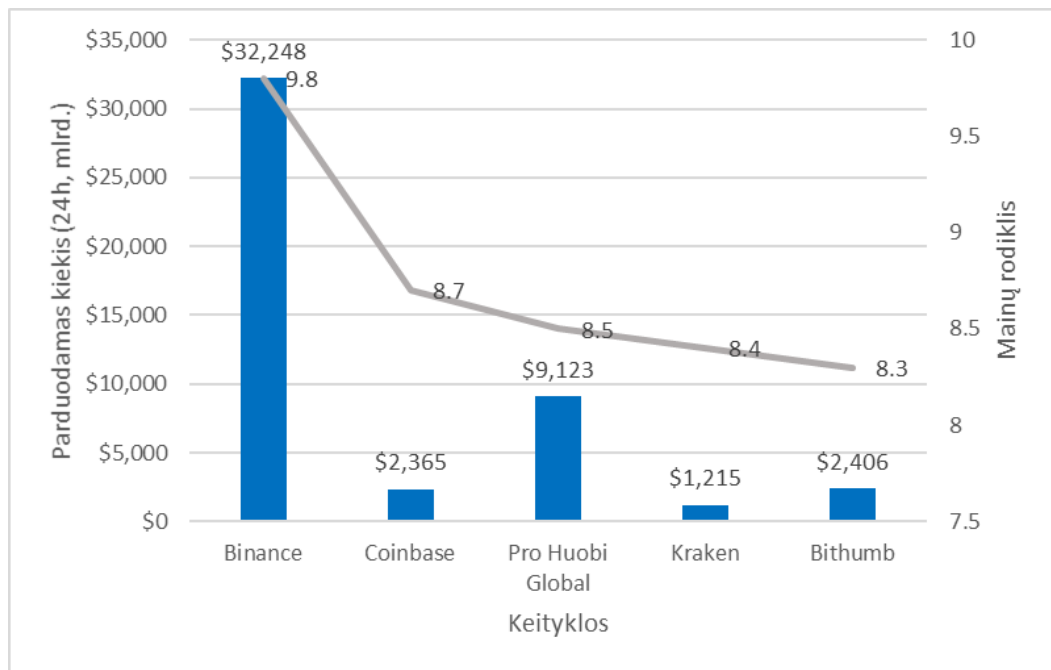
## 1. Kriptovaliutų rinkos ir arbitražo galimybių vertinimo mokslinės literatūros apžvalga

Šioje dalyje pateikiama atliktų tyrimų ir rezultatų analizė, pateikiamas kriptovaliutų rinkos tyrimas, bitkoino atliktų tyrimų analizė, su arbitražu susiję atlikti tyrimai, grafų teorijos panaudojimas finansuose.

### 1.1. Kriptovaliutų rinkos tyrimas

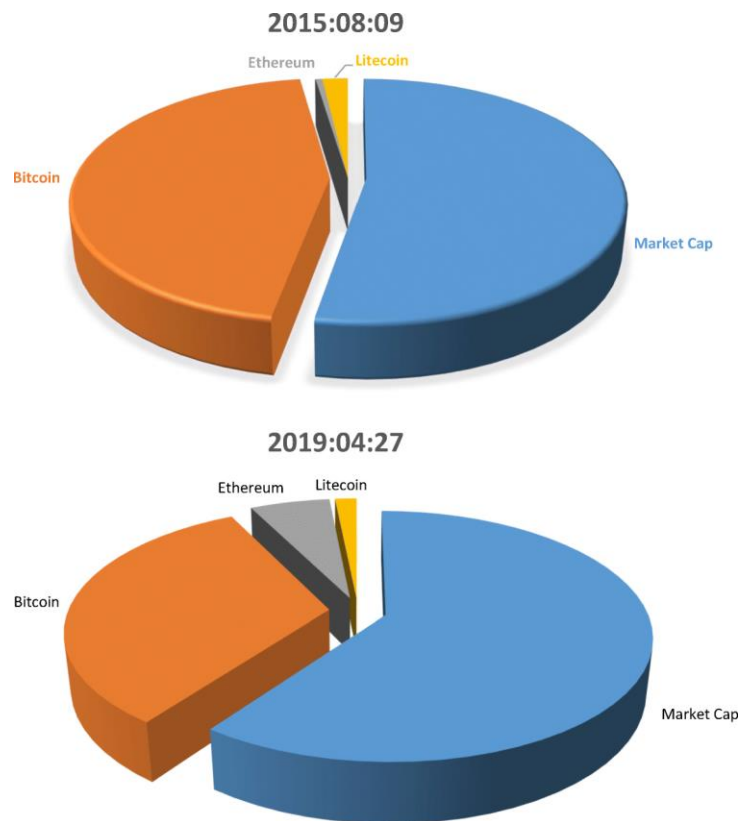
Kriptovaliutos, tai sparčiai augančios internetinių mokėjimų ir tarpininkavimo tarp trečiųjų šalių skaitmeninės valiutos, kurios remiasi blokų grandinės technologija. Remiantis *Statista* Vokietijos įmonės statistiniais duomenimis, 2021 metų vasario mėnesį pasaulyje buvo 4 501 skirtinga kriptovaliuta [1]. Palyginus su 2013 metų duomenimis, valiutų skaičius išaugo 68,2 karto. Viena populiariausių ir pirmųjų valiutų – bitkoinas, kuris buvo aprašytas 2008 metais Satoshi Nakamoto ir pradėtas naudoti 2009 metais [2]. Remiantis *Cryptocurrencychart* internetinės svetainės [3] statistiniais duomenimis, 2021-04-03 dieną bitkoino kaina siekė 59 370,14 JAV dolerių, jo kapitalizacijos vertė yra daugiau kaip 1,104 mlrd. dolerių. Tą dieną iš viso 84 valiutų kapitalizacijos vertė buvo daugiau kaip 1 mlrd. JAV dolerių. Bitkoino kapitalizacija sudaro net 57,86 % visų valiutų kapitalizacijos [3]. Dėl savo tariamo anonimiškumo skaitmeninės valiutos yra dažnai lyginamos su grynaisiais pinigais, tačiau, skirtingai nei gryniesi, šios valiutos yra naudojamos tik internete ir yra skaitmeninės. Jos gali konkuruoti su kitais mokėjimo būdais, kaip kredito ar debeto kortelės, PayPal [4].

Nuo bitkoino atsiradimo kriptovaliutų rinka išaugo labai stipriai – šiuo metu pasaulyje yra daugiau kaip 500 kriptovaliutų keityklų [5] ir jų skaičius kasdien auga. Kriptovaliutų keityklos leidžia iškeisti bitkoiną ar kitas kriptovaliutas į paprastas valiutas, kaip doleris ar euras bei skaitmenines valiutas. Remiantis *CoinMarketCap* internetinės svetainės duomenimis [6], populiariausios keityklos, vertinamos pagal mainų rezultatų rodiklį (angl. *Exchange score*), kuris reitinguoja ir vertina keityklas, atsižvelgdamas į: žiniatinklio srauto faktorių, vidutinį likvidumą, parduodamą valiutų kiekį ir pasitikėjimą, svoriai yra priskiriami ankščiau paminėtiems veiksniams ir suteikiamas balas nuo 0.0 iki 10.0. Geriausiai įvertintos keityklos yra *Binance*, *Coinbase Pro*, *Huobi Global*, *Kraken* ir *Bithumb* [6] (žr. 1 pav.).



1 pav. Geriausiai įvertintos keityklos pagal mainų rezultatų rodiklį, adaptuota pagal *CoinMarketCap*

J. Liu ir A. Serletis (2019) straipsnyje nurodo, kad kriptovaliutų rinka yra nepastovi ir daugelis pirkimų vertinami kaip neapdorotos spekuliacijos, siekiama gauti naudos dėl kriptovaliutų kainos kitimo nei gauti tiesioginio pelno [7]. Nurodoma, kad vidutinė kriptovaliutų kainos amplitudė yra iki 10 kartų didesnė nei pinigų rinkoje, taip pat nustatyta, kad nagrinėjamu laikotarpiu bitkoinas, eteris ir laitkoinas užima 40 % visos kriptovaliutų rinkos (žr. 2 pav.). Šiuo metu daugiau nei 1 600 kriptovaliutų išnyko dėl sukčiavimo [8], tačiau, nepaisant to, žinomos ir pripažintos įstaigos nuo 2018 metų dalyvauja kriptovaliutų rinkoje. Tokios įmonės kaip *Nasdaq*, *Fidelity* stiprina kriptovaliutas palaikantį gamybos procesą kaip turto klasę. Tai parodo, kad investuotojai tampa lankstesni, priima kriptovaliutų sektorių ir jaučiasi patogiau naudodami tokio tipo turtą. Kriptovaliutos sukelia daug iššūkių ir galimybių politikos formuotojams, ekonomistams taip pat investuotojams. Kriptovaliuta yra mainų priemonė, kuri remiasi decentralizuotu turtu ir tai yra nepastovi gražos norma, kuri atlieka panašias funkcijas kaip ir tradicinis turtas. Ką kriptovaliutos reiškia ir kaip gali būti traktuojamos, buvo atliekamas tyrimas įvertinti jų gražų suderinimą su finansiniu turtu. Gauti rezultatai parodė, kad ryšiai tarp kriptovaliutų rinkos ir finansų rinkų yra stipresni šalyse, kur kriptovaliutos yra labiau priimtinos ir naudojamos. Taip pat, finansų rinkos tyrimas parodė, kad kriptovaliuta gali apjungti kai kuriuos akcijų pranašumus finansų rinkose ir tai gali teikti naudos portfelio valdymui, rinkos analizei [7].



2 pav. Kriptovaliutų dalis rinkoje [7]

N. Gandal'as, H. Halaburda (2014) straipsnyje nagrinėja valiutos kurso duomenų pokyčius tarp kriptovaliutų. Jie atsižvelgia į du aspektus: konkurenciją tarp skirtingų valiutų ir konkurenciją tarp biržų, kurios prekiauja tomis valiutomis. Kadangi kriptovaliutų pasiūla yra fiksuota arba kinta deterministiškai, kainų pokyčiai parodo paklausos pokyčius [4]. Buvo tirta besiformuojanti kriptovaliutų rinka, išnagrinėta konkurencija tarp skirtingų valiutų dviem laikotarpiais (nuo 2013 m. gegužės – rugsėjo mėn. ir 2013 m. spalio – 2014 m. vasario mėn.). Pirmuoju laikotarpiu bitkoino kaina buvo pakankamai stabili, o antruoju – labai nestabili. Gauti rezultatai parodė, kad bitkoino populiarumas pirmuoju laikotarpiu padidėjo JAV dolerių ir kitų valiutų atžvilgiu. Tačiau antruoju laikotarpiu kitų kriptovaliutų kainos pakilo labiau nei bitkoino JAV dolerio atžvilgiu. Tai parodo, kad bitkoinas dėl savo pirminio populiarumo atvėrė kelią į rinką kitoms kriptovaliutoms [4].

## 1.2. Bitkoino atliktų tyrimų analizė

Bitkoinas, tai kotiruojama valiuta, kuria keičiamasi decentralizuotu P2P (angl. *peer-to-peer*) tinklu, jos galima įsigyti valiutų biržose ir bitkoinų keityklose [9]. Šios valiutos kursą formuoja pasiūla ir paklausa. 2021 metų balandžio 13 dieną bitkoino kaina padidėjo iki rekordiško skaičiaus, ji buvo didesnė nei 63 000 JAV dolerių, kaina šoko dėl investuotojų labai laukiamos *Coinbase* biržos debiuto [10]. Įkūrėjas siekė sukurti valiutą, kuri būtų atspari infliacijai, dėl to bitkoinų programa yra sukurta taip, kad iš viso į apyvartą išleista 21 mln. bitkoinų [11]. Ši kriptovaliuta yra populiariausia ir brangiausiai vertinama valiuta pagal rinkos kapitalizaciją, su ja atlikta daug įvairių tyrimų.

10/01/2013 to 05/18/2021

1h 12h 1d 1w 1m 3m 1y all



3 pav. Bitkoino kainos kitimas laike nuo jo išleidimo pradžios [12]

Vieną iš jų atliko J. Carrick'as (2016), tyręs bitkoino naudojimą kaip besivystančių rinkų valiutų papildymą, t.y. analizuojama bitkoino vertė ir nepastovumas, lyginant su besivystančiomis rinkos valiutomis ir tiriami būdai, kurie gali papildyti besiformuojančių rinkų valiutas. Bitkoinas buvo empiriškai ištirtas iš trijų perspektyvų:

1. Palyginta jo santykinė vertė ir kintamumas su pagrindinėmis pasaulio valiutomis;
2. Palyginama bitkoino santykinė vertė ir kintamumas su labiausiai parduodamomis besivystančios rinkos valiutomis;
3. Peržvelgtas besiformuojančių rinkos valiutų krepšelis, prekiaujamas internetiniu būdu ir palygintas su grąža, kur įtrauktas į valiutos krepšėlį ir bitkoinas.

Pateikiama koreliacija tarp bitkoino ir kitų valiutų (žr. 1 lentelę), kuri parodė, kad pagrindinės valiutos su bitkoinu yra susijusios labai reikšmingai, išskyrus Australijos doleris [13].

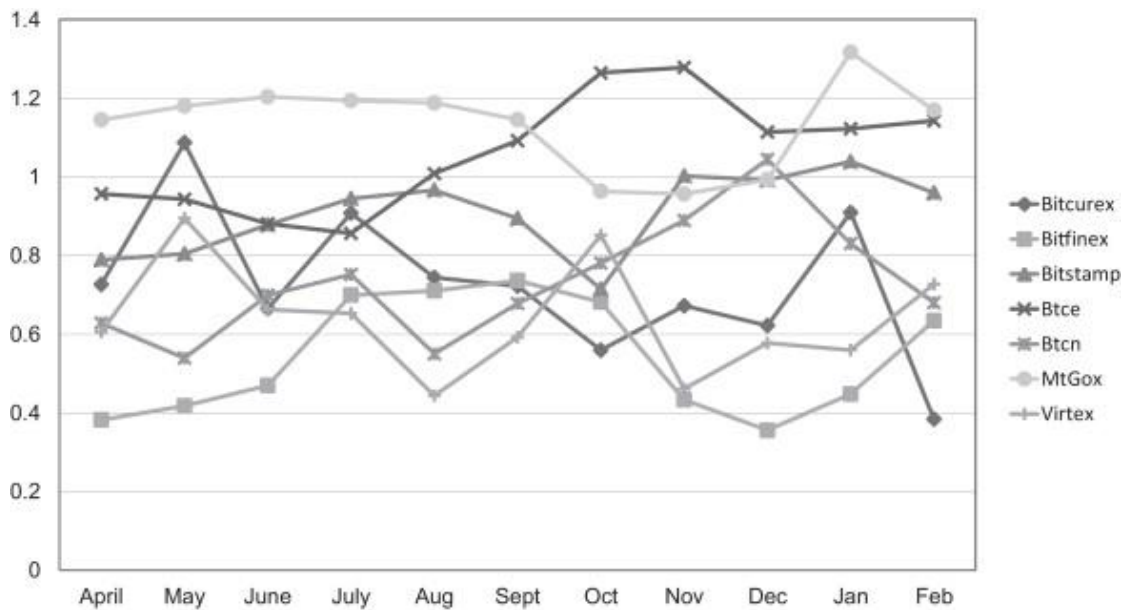
1 lentelė. Bitkoino koreliacija su pagrindinėmis valiutomis, adaptuota pagal [13]

Valiutos	Koreliacijos koeficientas tarp bitkoino
EUR	-0,10
GBP	0,36
CHF	-0,03
AUD	0,54
CAD	-0,50
JPY	-0,64

Šis tyrimas išskirtinis tuo, kad bitkoinas nagrinėjamas ne kaip grynų valiutų pakaitalas, o kaip papildymas. Analizuojami buvo 5 metų duomenys ir nustatyta, kad yra pagrindo galvoti, kad bitkoinas gali papildyti grynas valiutas. Tyrimas parodė, kad galima bitkoino neapibrėžtumą sumažinti ir jo naudą maksimaliai padidinti [13].

Y. Chen'as, P. Giudici, B. H. Misheva ir S. Trimborn'as (2019) atliktame tyrime klasifikavo bitkoinų savininkus pagal pastebėtą prekybos elgesį dešimtyje didėjančio vidutinio dydžio klasių. Prie klasifikacijos pridedama ir geografinė padėtis, kuri apibrėžiama pagal tai, kuriam žemynui priklauso savininkas. Naudojant tinklo ekonometrinius modelius buvo siekiama suprasti žemėlapi ir tarpusavio ryšius tarp apibrėžtų savininkų grupių. Tokiu būdu nustatomos prekybos grupės, kurios yra apibrėžiamos kaip vadovaujančios bitkoino rinkoms. Straipsnyje buvo pasiulytas modelis, kuris paaiškina bitkoino prekybos apimčių dinamiką. Remiantis koreliacijos tinklo VAR modeliu, kuris susieja dabartinius kintamojo stebėjimus su ankstesniais kitų sistemos kintamųjų stebėjimais [14], sumodeliuoti tarpusavio ryšiai tarp skirtingų prekybininkų grupių. Gauti rezultatai rodo, kad prekybos apimtys geografiniuose regionuose yra labai susijusios. Prekybininkų grupės, kurios turi dideles operacijų apimtis visuose žemynuose, naudojantis tinklo modeliu, dalijasi abipusiu informacijos rinkiniu. Taip pat gauti rezultatai prisideda prie bitkoinų prekybininkų grupių, darančių didžiausią įtaką rinkai, identifikavimo. Randama didelių pardavėjų Šiaurės Amerikoje, Europoje ir Azijoje. Šie rezultatai atitinka tai ko buvo tikėtasi, kad prekyba vyksta pagal naujienų pasidalijimo modelius ir pagrindinius bitkoino kasybos vietos modelius [15].

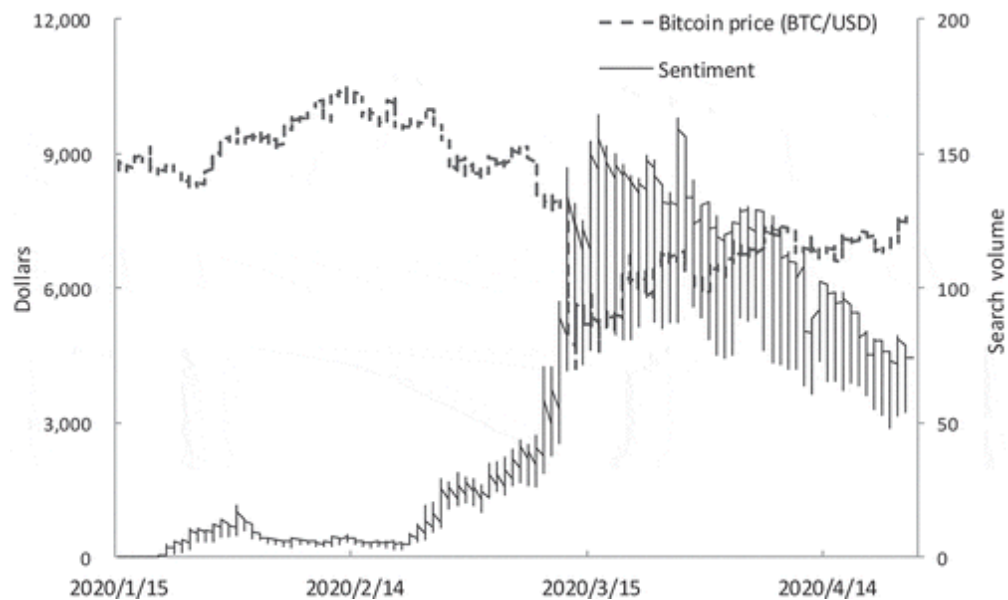
Bitkoinu yra prekiaujama daugybėje biržų, kurios palaiko skirtingas valiutas ir yra išsibarsčiusios visame pasaulyje. Dienos, kai tik viena birža dominavo rinkoje, praėjo, tad kyla klausimas kuriose keityklose yra nustatoma bitkoino vertė. Į šį klausimą bandė atsakyti M. Brandvold'as, P. Molnar'as, K. Vagstad'as, O. C. A. Valstad'as (2015) savo straipsnyje apie bitkoino kainų nagrinėjimą keityklose. Straipsnyje buvo ištirtas skirtingų biržų vaidmuo bitkoino kainų paieškos procese. Dalį kainos sudaro informacijos mainų dalis, natūralu, kad kainos atsiradimo dalis vyksta tose biržose, kur prekyba yra didesnės apimties. Pagal gautus rezultatus išskirtos dvi keityklos: *Mt Gox* ir *BTC-e*, kurios yra žymiausios kainų lyderės. Likusios nagrinėtos biržos yra mažiau informatyvios, tačiau vis tiek teikia informaciją rinkai (žr. 4 pav.). *Mt Gox* 2014 metais buvo didžiausia bitkoino tarpininkė ir pasaulyje pirmaujanti birža [16], tais metais didėjantis Kinijos susidomėjimas bitkoinu lėmė ir informacijos dalies padidėjimą keitykloje *BTC-e*. Tuo tarpu mažesnės biržos rinkai teikia mažiau informacijos ir dažniausiai atsilieka, jos yra vadinamos sekėjomis, o *Mt Gox* ir *BTC-e* turėjo didesnę koreliaciją su būsimais rinkos pokyčiais, tad šios rinkos yra vadinamos lyderėmis ir jose yra nustatoma bitkoino vertė [17].



4 pav. Keityklos, vertinamos pagal informacijos dalinimąsi [17]

Toliau, kalbant apie pasaulinę COVID-19 pandemiją ir jos poveikį Europoje ir JAV, buvo pastebima, kad valstybės, turėjusios didesnius ligos protrūkius, patyrė didesnių ekonominių nuostolių [18]. COVID-19 pandemija palietė ir kriptovaliutų rinkas. C. Chen‘as, L. Liu ir N. Zhao (2020) straipsnyje nagrinėjo koronaviruso pandemijos sukeltos baimės poveikį bitkoino kainų dinamikai. Naudojamos *Google* paieškos užklausos, kurios susijusios su koronaviruso žodžiu. COVID-19 protrūkio metu bitkoinas nukentėjo smarkiai – per kelias dienas prarado beveik pusę savo vertės: 2021 metų kovo 8 dieną nuo 8 925 JAV dolerių jo kaina sumažėjo iki 5 355 JAV dolerių kovo 16 dieną [12]. Tyrimo tikslas yra ištirti kaip bitkoino kaina reaguoja esant pandemijai, nes šiuo metu juo yra aktyviai prekiaujama. Gauti rezultatai parodė, kad padidėjęs susidomėjimas pandemija yra susijęs su padidėjusiu finansų rinkos netikrumu. Pastebima, kad COVID-19 baimė neigiamai veikė bitkoino gražą (žr. 5 pav.) ir didelę prekybos apimtį, o tai parodo, kad kuomet rinkoje yra sunkumų bitkoinas elgiasi labiau kaip kitas finansinis turtas, pavyzdžiui, akcijos, obligacijos, o ne tradicinis saugus turtas, pavyzdžiui, auksas. Tyrimas parodo, kad pandemijos metu tai negali būti saugus prieglobstis investuotojams [19].





5 pav. Baimės lygis ir bitkoino kainos evoliucija [19]

Taip pat, ar bitkoinas yra saugus prieglobsčio investicija tiria ir J. W. Goodell‘as, S. Goutte (2021). Jų atliktas tyrimas prisideda prie supratimo kaip COVID-19 veikia finansines sistemas, taip pat bitkoino veikimą kaip apsidraudimas, diversifikatorius ir ar yra saugus prieglobstis esant ekstremaliom ir globaliom krizem. Buvo tirtas bendras bitkoino judėjimas su COVID-19 susijusių mirčių lygiais. Gauti rezultatai rodo, kad pastebimas neigiamas bitkoino kainų ir COVID-19 judėjimas, tai parodo kaip COVID-19 veikia finansines sistemas. Tačiau judesio intensyvumas per visą tiriamą laikotarpį skiriasi, kai kurie trumpi laikotarpiai rodo ir teigiamą ryšį [20].

Ar bitkoinas yra saugus prieglobstis nuo neigiamo akcijų ir obligacijų turto judėjimo pagrindinėse ekonomikose tyrė ir Y. Huang‘as, K. Duan‘as, T. Mishra (2021). Jie atliko empirinę analizę naudojant Bajeso skydo VAR metodą, kuris apima potencialią sąveiką ir heterogeniškumą visose šalių ar regionų segmentų rinkose [21]. Gauti rezultatai parodė, kad bitkoinas kiekvienoje ekonomikoje gali prisidėti prie efektyvaus rizikos mažinimo arba diversifikavimo ir už rinkos ribų. Taip pat, atskleidė ar bitkoinas gali būti traktuojamas kaip saugi investicinė priemonė pagrindinėse pasaulio finansų rinkose nuosmukių, susijusių su vykstančia pandemija, metu [21].

COVID-19 poveikį bitkoino prekybos veiklai ištyrė ir preliminarų vertinimą pateikė J. Johnson‘as (2020). Jo tyrimo tikslas iširti bitkoino prekybos veiklą penkioms valiutom: JAV doleriui, eurui, Japonijos jenai, JK svarui ir Australijos doleriui. Tyrimo laikotarpis prasideda nuo 2019 m. spalio, kuomet liko du mėnesiai iki nustatyto pirmojo atvejo, iki 2020 kovo mėn. Per šiuos šešis mėnesius stebimi bitkoino prekybos elgsenos pokyčiai. Gauti rezultatai parodo, kad yra didelė koreliacija tarp bitkoino sandorių aktyvumo ir atidarymo kainos nuo 2019 metų lapkričio iki 2020 metų vasario mėnesio (žr. 2 lentelę) [22].

2 lentelė. Koreliacija tarp didžiausio bitkoino keitimų dydžio per dieną ir bitkoino *Open Price*, adaptuota pagal [22]

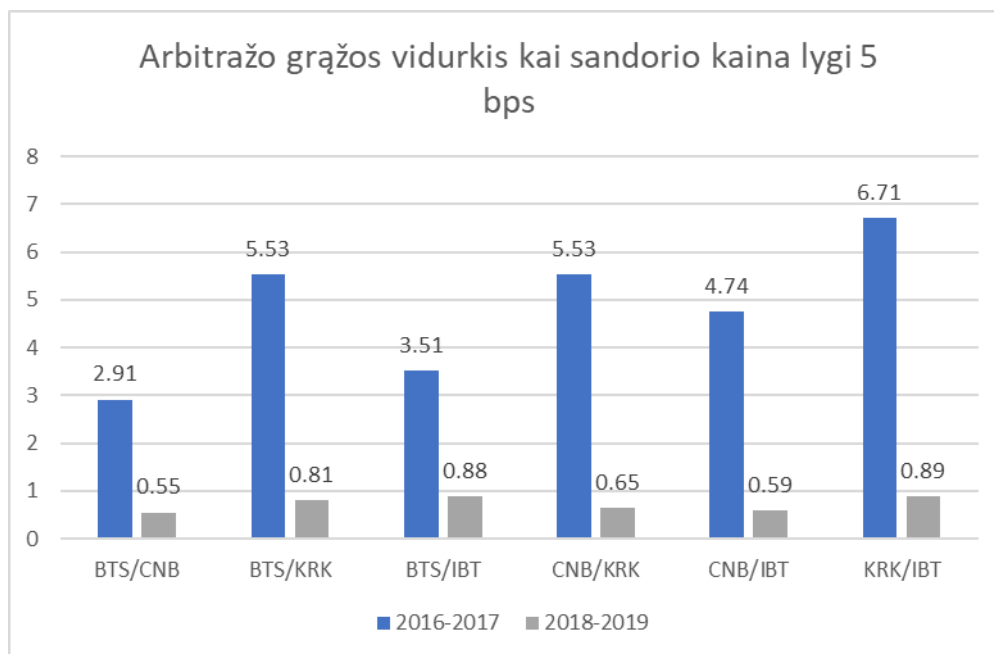
Keitykla	Valiuta	2019 m. spalio	2019 m. lapkritis	2019 m. gruodis	2020 m. sausis	2020 m. vasaris	2020 m. kovas
Kraken	JAV doleris	0,7433	0,8357	0,9055	0,9335	0,8740	0,7927
Kraken	Euras	0,9298	0,8346	0,9067	0,6571	0,8353	0,6514
Coincheck	Jena	0,9687	0,7934	0,9689	0,9256	0,9868	0,8831
Coinfloor	Svaras	0,9279	0,9438	0,9163	0,9390	0,9267	0,8805
BTC Markets	Australijos doleris	0,6570	0,5934	0,8473	0,6668	0,7474	0,6774

Pastebima, kad bitkoinas juda kartu su akcijų rinka. COVID-19 labai stipriai paveikė pasaulio ekonomiką, taip pat palietė ir akcijas, kurių rinkos rodikliai rodo stiprų ir staigų kritimą. Buvo tikimasi, kad ekonominės sąlygos, sukeltos COVID-19, neturės įtakos bitkoinui, tačiau ankstesni tyrimai rodo kitaip, o bitkoino kainos atitinkamai reaguoja į kintančias ekonomines aplinkybes. Bitkoino nepriklausomybė nuo ekonominių sąlygų pradėjo ryškėti 2020 metų kovo mėnesį. Garsūs investuotojai įsigijo bitkoinus, taip pat gauti geri atsiliepimai iš stambių bankų, kad ši skaitmeninė valiuta gali turėti šviesią ateitį, tai didino pasitikėjimą bitkoinu. Be to PayPal suteikė galimybę klientams pirkti, laikyti ir parduoti bitkoinus tiesiogiai iš savo PayPal sąskaitų, didėja ir kitų pardavėjų, priimančių šią kriptovaliutą kaip atsiskaitymo formą, skaičius [23]. Daroma išvada, kad kriptovaliuta buvo pradėta vertinti kaip investicija už pasaulio ekonomikos nuosmukio ribų ir pradėjo visiškai reaguoti į pasiūlą ir paklausą, o ne į akcijų rinką [22].

### 1.3. Arbitražo susidarymo atliktų tyrimų analizė

Svarbią rolę finansų rinkoje užima arbitražas, kurio sąvoka apibrėžiama kaip identiškų ar panašių finansinių vertybinių popierių pirkimas ir pardavimas tuo pačiu metu siekiant pasipelninti iš jų skirtingų kainų skirtingose rinkose. Arbitražo egzistavimo tyrimas ir vertinimas yra aktualus, kai tas pats turtas yra prekiaujamas keliose rinkose arba kai turtą galima iškeisti į pagrindinę jo vertę. A. Shynkevich'ius (2020) įvertino arbitražo galimybes, lygindamas valandines bitkoino kainas 4 skirtingose kriptovaliutų rinkose: *BitStamp*, *Coinbase*, *Kraken* ir *ItBit*, laikotarpiu nuo 2016 metų sausio 1 iki 2019 metų gruodžio 31 dienos. Jo atliktame tyrime vertinamos arbitražo galimybės, lyginant valandines bitkoino kainas keturiose kriptografinėse biržose, kurios yra indekso, naudojamo atsiskaityti bitkoinų ateities sandoriams, sudedamosios dalys. Taip pat vertinamas arbitražo investavimo strategijų našumas bitkoinų rinkoje. Arbitražo investavimo strategija sukurta remiantis prielaida, kad dideli kainų neatitikimai lemia suartėjimą su paritetu [24].

Arbitražo investavimo strategija susideda iš ilgos (angl. *long*) bitkoino pozicijos biržoje, kur ji yra santykinai maža, ir trumpos (angl. *short*) pozicijos biržoje, kur ji yra palyginus didelė tam tikru laiko momentu. Arbitražo vertė yra nustatoma, kai bitkoinų kainos neatitinkamas (matuojamas nuokrypiu nuo pariteto) peržengia nustatytą ribą. Gauti A. Shynkevich'io rezultatai parodė, kad arbitražas gerai veikė nuo 2018 metų bitkoinų rinkoje, nuo tada biržos juo prekiaavo daug griežtesniu diapazonu, palikdamos mažai vietos pelningai arbitražo prekybai (žr. 6 pav.). [24]



6 pav. Arbitražo gražos vidurkis, adaptuota pagal [24]

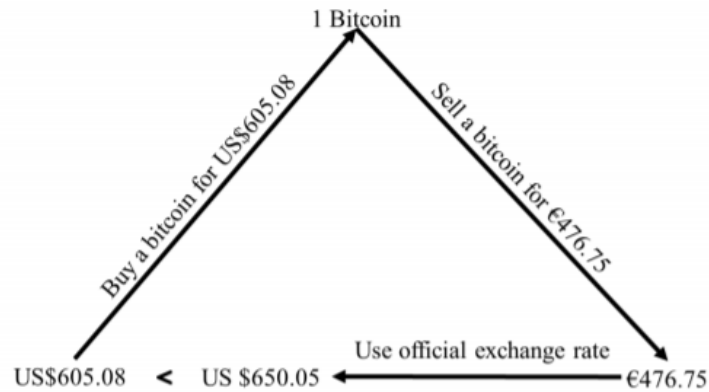
I. Makarov‘as ir A. Schoar‘as (2018) pateikė savo įžvalgas ir pagrindė faktus apie kainų formavimąsi kriptovaliutų biržose. Analizė buvo atlikta remiantis 34 keityklų duomenimis iš 19 šalių. Parodoma, kad biržose yra dideli ir pasikartojantys bitkoino kainų nesutapimai, išliekantys kelias valandas, o kai kuriais atvejais dienas ir savaites. Taip pat arbitražo skirtumas yra daug didesnis vykstant mainams tarp skirtingų šalių, o ne tos pačios šalies viduje, priešingai, skirtingų kriptovaliutų kursai rodo daug mažesnius nukrypimus visose keityklose. Tačiau kai kurių šalių teisės aktai apsunkena mainus tarp šalių mažmeniniams investuotojams, o didelės institucijos šių apribojimų gali išvengti, tačiau tai gali sulėtinti arbitražo kapitalo pasiūlą. Gauta analizė parodė, kad arbitražo pelno suma buvo didesnė nei 75 mln. dolerių, o laikotarpiu nuo 2017 metų gruodžio iki 2018 metų vasario mėnesio buvo apskaičiuota mažiausiai 2 mlrd. dolerių viso galimo arbitražo pelno. Kainų skirtumas tarp biržų toje pačioje šalyje vidutiniškai neviršija 1 procento [25].

Taip pat, autoriai atliko analizę tarp kurių valiutų egzistuoja didesnis arbitražas – tarp dviejų kriptovaliutų ar tarp kriptovaliutos ir grynos valiutos. Gauti rezultatai parodė, kad susidarantis arbitražas tarp kriptovaliutų yra mažesnis nei tarp kripto ir grynos valiutos [25].

Taip pat, atlikus tyrimą pastebima, kad bitkoino kainų skirtumai šalyse yra labai asimetriški. Šalyse, kurios yra už JAV ir Europos ribų, paprastai bitkoinu prekiaujama aukštesne kaina, palyginus su JAV ir beveik niekada už žemesnę nei JAV nustatytą kainą. Be to, yra pastebimas ir didelis kainų nukrypimų judėjimas tarp šalių: arbitražas skleidžiasi ir užsidaro tuo pačiu metu visose šalyse [25].

S. Bistarelli, A. Cretarola, G. Figa-Talamanca, I. Mercanti ir M. Patacca (2019) atliko tyrimą, kurio tikslas išsiaiškinti ar prekiaujant bitkoinu skirtingose biržose yra įmanoma arbitražo strategija. Atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad arbitražo galimybės yra įmanomos prekiaujant bitkoinu skirtingose biržose, nes bitkoino tinklas yra decentralizuotas, o operacijas atlieka patys vartotojai [26].

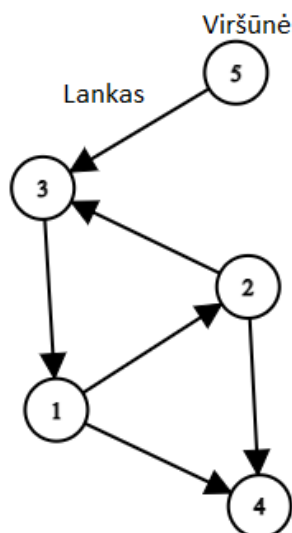
Bitkoino kursas tarp kitų valiutų ir gaunamą arbitražą tyrė G. Pieters ir S. Vivanco (2015). Autorės parodo, kad skirtumą iš dalies galima paaiškinti vyriausybės įsikišimu. Tyrimo tikslas išsiaiškinti ar bitkoino palengvinti valiutų kursai sudaro arbitražą (žr. 7 pav.). Kadangi bitkoinas suteikia lengvai prieinamą valiutų keityklų sandorių rinką, buvo galima tikėtis, kad bitkoino ir kitos valiutos kursas bus panašūs, kitaip jie suteiktų lengvą galimybę gauti pelno. Gauti rezultatai parodė, kad bitkoino kursas gali būti naudojamas kaip metodas įvertinti tarptautinių sandorių valiutų kursų tikslumą ir juodosios rinkos egzistavimo laipsnį [27].



7 pav. Arbitražo galimybės susidarymo pavyzdys [27]

#### 1.4. Grafų panaudojimas finansų rinkoje

Grafas, tai mazgų ir briaunų rinkinys plokštumoje, kurių kiekviena sujungia du taškus arba taškas jungiasi su savimi. Jie yra labai universalūs, skirti analizuoti įvairias praktines problemas, kai taškai ir ryšiai tarp jų turi tam tikrą fizinę ir konceptualią interpretaciją. Grafo apibrėžimas skamba taip: grafas  $G = (V, E)$  tai matematinė struktūra, susidedanti iš dviejų baigtinių aibių  $V$  ir  $E$ . Elementai  $V$  yra vadinami viršūnėmis (mazgais), o elementai  $E$  vadinami lankais (briaunomis) (žr. 8 pav.). Grafas yra vadinamas orientuotu grafu, kai jo briaunos turi kryptį [28].



8 pav. Grafo struktūra

Investuotojams ir vadovams yra labai svarbu nustatyti ir išanalizuoti finansų rinkoms įtaką darančius veiksnius, kad būtų sumažinama rizika ir priimti optimalūs sprendimai. Rinkos analizės svarba ir noras pagerinti supratimą, analitikus paskatino naudoti kitų sričių, tokių kaip socialiniai mokslai ir matematika, žinias ir patirtį, kad būtų galima skirtingai iširti rinkos sąveiką. A. Kheyrkhah'as, F. R. Roodposhti ir M A.A. Kazemi (2016) straipsnyje apžvelgė tinklų ir grafų teorijos panaudojimą analizuojant socialinių ir finansinių reiškinių elgesį. Ažvalga parodė, kad kiekvienas kintamasis priklauso nuo kitų veiksnių, todėl negalima manyti, kad kintamasis yra nepriklausomas. Taikant metodą, kad kintamieji yra laikomi nepriklausomais, santykis tarp jų nustatomas panaudojus galimus metodus ir modelius [29].

M. Durcheva ir P. Tsankov'as (2019) straipsnyje tyrė akcijų ir kriptovaliutų tinklų panašumus ir skirtumus, kurie buvo gauti iš gražos (angl. *log-return*) ir nepastovumo (angl. *volatility*) laiko eilučių. Buvo tikrintos koreliacijos ir Furje transformacijos pagrindu sukurti grafai ir minimalus svorių grafas (angl. *Minimum Spanning tree*) iš 100 kriptovaliutų ir 100 *NASDAQ* akcijų rinkinio per fiksuotą laiko tarpą. Taip pat buvo iširti mazgų laipsniai ir briaunų svorių pasiskirstymai. Gauti rezultatai parodė, kad tinklų, gautų iš kriptovaliutų topologija per daug nesiskiria nuo *NASDAQ* akcijų duomenų gautos topologijos. Taip pat mazgo ir briaunų laipsnių pasiskirstymas yra panašus abiejose ekonomikose. Dabartiniame lyginimo kontekste nustatyta, kad kriptovaliutų ekonomika yra labiau susijusi su *NASDAQ* akcijomis; mazgų (t. y. laiko eilučių) skirtumai yra mažesni. Tokios valiutos kaip BTC, ETH, XMR ir didelės kapitalizacijos akcijos MSFT, GOOG/GOOGL, AMZN dažniausiai būna tankiai sujungtos arba grafuose užima centrinės pozicijas [30].

Vienas iš tinklo panaudojimų yra rizikos įvertinimas. Sistemine finansų rizika yra tokia rizika, kada dalyvis, neįvykdęs savo sutartinių įsipareigojimų, gali sukelti kitų dalyvių įsipareigojimų neįvykdymą, o ši grandininė reakcija sukelia didesnius finansinius sunkumus: kapitalo rinkos sustingimą, įmonės, pramonės, finansų įstaigos ar visos ekonomikos žlugimą. W. Huang'o, X. Zuang'o, S. Yao ir S. Uryasev'o (2015) tyrime nagrinėjama Kinijos akcijų birža, atsižvelgiama į

finansų institucijų topologinės struktūros poveikį finansiniam tinklui, jų sisteminei rizikai [31]. Tikslas buvo ištirti ryšius tarp sisteminės rizikos įnašų ir institucijų topologinės struktūros finansiniuose tinkluose. Pirmiausia buvo matuojamas dinamiškas sisteminės rizikos indėlis, įvertinant CoVaR (angl. *Conditional Value at Risk*) pokytį. CoVaR, tai sąvoka, vartojama finansinės rizikos matavimo srityje norint įvertinti portfelio rizikos rinkos ar kredito riziką. Tuomet, iš dinaminių sąlyginių koreliacijų sukonstruojami besiplečiantys minimalūs svorių medžiai (MST). Paskutiniame etape naudojama panelinių duomenų regresija (angl. *panel data regression*) ir susiejami laiko skirtumai CoVaR su kiekvienos įstaigos vietinio tinklo struktūrų matais, tokiais kaip mazgo stiprumas (angl. *node strength*), mazgo tarp-centrališkumas (angl. *node betweenness centrality*), mazgų uždarmo centrališkumas (angl. *node closeness centrality*), mazgo užimtumo sluoksnis (angl. *node occupation layer*) ir mazgų grupavimo koeficientas (angl. *node clustering coefficient*) [31].

Tyrimo metu finansinės institucijos tinkle užėmė mazgų vietą, kiekviena jų yra sujungtos briaunomis su svoriu, kuris yra lygus atitinkamų akcijų dinaminei sąlyginei koreliacijai. Toliau buvo konstruojamas medis, tam panaudotas Kruskalo algoritmas, kurį sudaro šie etapai [31]:

1. pasirenkama pora mazgų, kurių atstumas yra mažiausias ir jie jungiami lanku;
2. sujungiama pora su antru mažiausiu atstumu;
3. sujungiama artimiausia pora, kuri nesudaro ciklo su kitomis briaunomis.

Trečias etapas kartojamas tol, kol institucijos yra sujungiamos į unikalų medį (žr. 9 pav.)

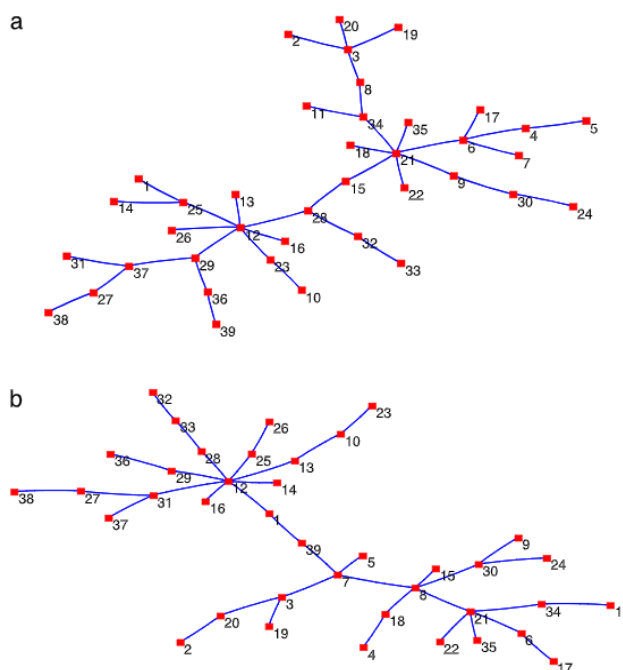


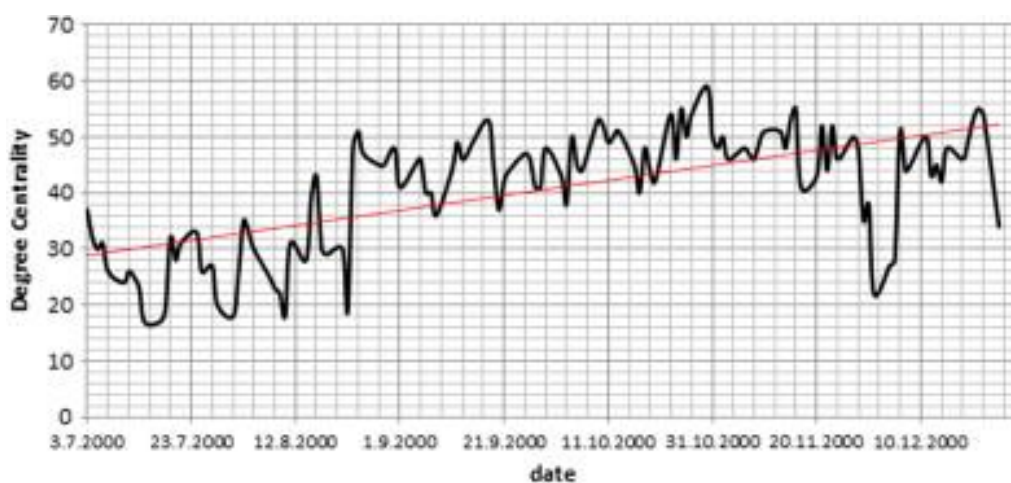
Fig. 3. The minimum spanning trees on (a) 4th January 2011, and (b) 5th June 2015.

9 pav. Gautas minimalus svorių medis [31]

Atlikus vietinių finansų įstaigų tinklo topologijos struktūros poveikį sisteminei rizikai, pastebėta, kad vidutiniai mažų ir vidutinių akcijų turinčių komercinių bankų sisteminės rizikos indėliai yra didesni nei milžiniško dydžio komercinių bankų. Straipsnyje parodoma, kad finansų įstaiga turi didesnę sisteminės rizikos indėlį, didesnę mazgų stiprumą ir tarpusavio centrališkumą, taip pat didesnę

uždarumo centrališkumą ir didesnę mazgų grupavimo koeficientą finansiniame tinkle. Daugiausiai dėmesio tyrime skirta vietinio tinko topologijos struktūrai [31].

Grafų teorijos centralizavimo priemonių taikymą analizavo ir T. U. Kuzubas, I. Omercikoglu, B. Saltoglu (2014), naudojant 2000 m. duomenis iš Turkijos tarpbankinės rinkos finansų krizės metu. Buvo naudojamos įvairios tinklo tyrimo priemonės kaip apimtis, operacijos, nuorodos, ryšiai ir abipusiškumas, tam, kad nustatyti aiškesnę tarpbankinės rinkos tinklo topologijos vaizdą. Šio tyrimo tikslas išbandyti tinkle pagrįstas sisteminės rizikos teorijas, ypač įstaigos centrališkumą ir jos indėlį į sisteminę riziką [32]. Buvo pastebimas vienos operacijos apimtys padidėjimas, kuri daugiausiai lemia paskolos prieš krizės laikotarpį, kuri vėliau sumažėjo ir padidėjo operacijų skaičius. Buvo sukurtos laipsnio, tarpusavio artumo ir *Bonacich* centralizavimo priemonių laiko eilutės ir tiriama jų raida. Stebima priemonių tendencija, kuri patvirtina, kad įstaigų centrališkumo vertės padeda nustatyti tarpbankinėse rinkose esančias sistemiškai svarbias įstaigas. Pavyzdžiui, buvo naudotas laipsnio centrališkumo rodiklis, kuris apibrėžiamas kaip mazgų įvykių skaičius ir šis rodiklis pavaizduotas kaip kintantis laike konkrečiai vienos įmonės (žr. 10 pav.) [32].



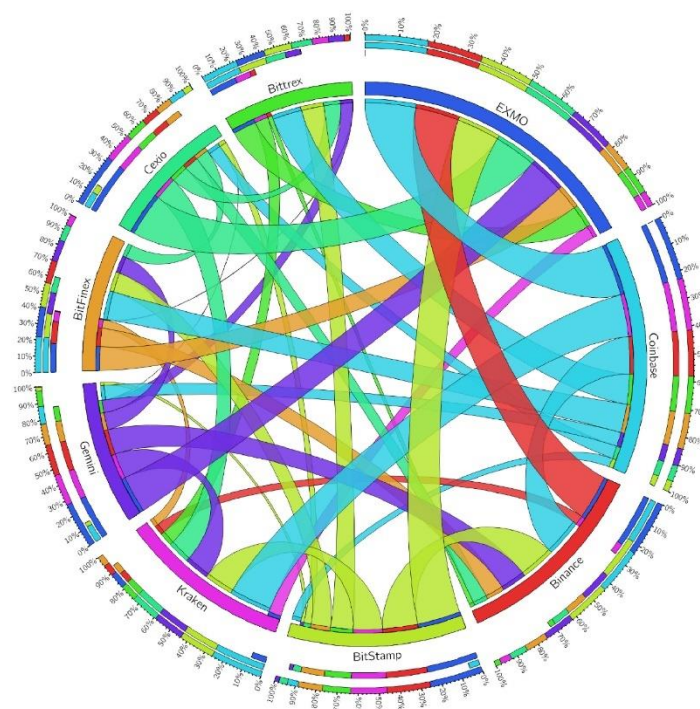
10 pav. Laipsnio centrališkumo reikšmės [32]

Grafų teorijos centrališkumas gali būti taikomas ir akcijų rinkoje, tą parodė H. E. Moghadam'as, T. Mohammadi, M. F. Kashani ir A. Shakeri (2019). Jie tinklais atvaizdavo didelę akcijų rinkos elgseną, akcentavo centrališkumą, aptarė pagrindinius ekonominius ir finansinius padarinius, kuriuos gali lemti akcijų rinkos centralizavimas [33]. Šiame straipsnyje centrališkumas tinkle buvo vertinamas keturiais kriterijais: laipsnis, tarpiskumas, artumas ir tikrinio vektoriaus centrališkumas. Įvertinus akcijų centrališkumą gauti rezultatai parodė, kad didesnę rinkos kapitalizaciją, didesnę sandorių apimtį ir didesnius kainų svyravimus turinčios akcijos yra svarbesnės. Akcijų kainų svyravimai gali atsirasti dėl tokių veiksnių kaip ekonominiai, su įmone ir pramone susiję veiksniai, kurie susiję su investuotojais ir akcijų prekybininkais rinkoje. Apžvelgus santykį tarp centrališkumo ir pramonės šakų augimo, matoma, kad pramonė ar sektorius, kuris turi didesnę ekonomikos augimą, turi didesnę centrališkumo vertę ir yra labiau centralizuotas akcijų rinkos tinkle [33].

Bitkoinų keityklų tinklo analizę pateikė Q. Ji, E. Bouri, L. Kristoufek, B. Lucey (2021), kad atskleisų aiškų bitkoino dinamikos lyderį. Buvo pritaikyta vektorinės autoregresijos sistema, pagrįsta kasdieniu bitkoino kainų svyravimu [34]. Tokia atlikta analizė gali padėti rinkos dalyviams nustatyti



pagrindines bitkoino rinkas, kurios labiausiai prisideda prie kainų nepastovumo formavimosi tinklo sistemoje (žr. 11 pav.). Buvo ištirtas tarpusavio ryšys tarp bitkoino keityklų ir realizuotas nepastovumas, pagrįstas valandos gražos duomenimis. Gauti rezultatai parodė, kad rinkoje stiprus lyderis yra *Coinbase*, po jos eina *Bitstamp*, *Cexio* ir *Gemini* keityklos. Nors ir *Coinbase* apyvarta nepatenka į „Top 3“, tačiau tai yra viena populiariausių biržų vien dėl savo vietos JAV ir jo prekyba JAV doleriu (ne teteriu (USDT)). Ši priežastis yra svarbus veiksnys, nes rinkos lyderiai taip pat daugiausiai perkiauja USD, o tai yra lengvesnė galimybė atsiimti investuotą valiutą. Ši išvada parodo, kad nors ir *Binance* yra populiariausia birža, tačiau visapusiškai yra silpna ir nėra tarp įtakingiausių biržų [34].



11 pav. Porų ryšiai tarp realizuoto bitkoino nepastovumo [34]

Taigi, mokslinės literatūros analizė parodė, kad kriptovaliutų rinka yra nepastovi, tad iš kainos kitimų investuotojai tikisi gauti daugiau naudos. Ryšiai tarp kriptovaliutų ir finansų rinkos yra stiprūs tose šalyse, kur kriptovaliutos yra dažniau perkamos ar parduodamos, taip pat išnagrinėta, kad bitkoinas atvėrė kelią kitoms kriptovaliutomis ir jų kainos kitimai būna didesni nei pačio bitkoino. Ši populiariausia valiuta reikšmingai yra susijusi su kitomis grynomis valiutomis bei jas gali papildyti. Taip pat nustatyta, kad bitkoinų prekybos apimtys skirtinguose regionuose yra labai susijusios, prekybininkai, kurių operacijų apimtys yra didelės, dalijasi abipusiu informacijos rinkiniu ir po to tampa didelę įtaką rinkai darantys pardavėjai. 2014 metais bitkoino rinkos lyderė buvo *Mt Gox*, kartu su *BTC-e* birža jos buvo informatyviausios biržos. Toliau, nagrinėjant kriptovaliutų rinkos reakciją į COVID-19 pandemiją, gauti rezultatai parodė, kad esant dideliame baimės indeksui, tai neigiamai paveikia ir bitkoino gražas. Pandemijos pradžios metu, bitkoino birža nebuvo saugus prieglobstis investuotojams. Taip pat, pastebėta, kad bitkoinas judėjo kartu su akcijų rinka, tačiau 2020 metų kovo mėnesį nepriklausomybė nuo ekonominių sąlygų pradėjo ryškėti ir kriptovaliuta buvo pradėta vertinti kaip investicija už nuosmukio ribų. Tiriant arbitražo galimybes, pastebėta, kad jis yra įmanomas tarp kriptovaliutų ir grynų valiutų, priešingai, mažesnis arbitražas susidaro tarp dviejų kriptovaliutų. Grafų



panaudojimas ir centrališkumo rodiklių vertinimas daugiausiai naudojamas įvertinti sisteminę riziką ir akcijas.

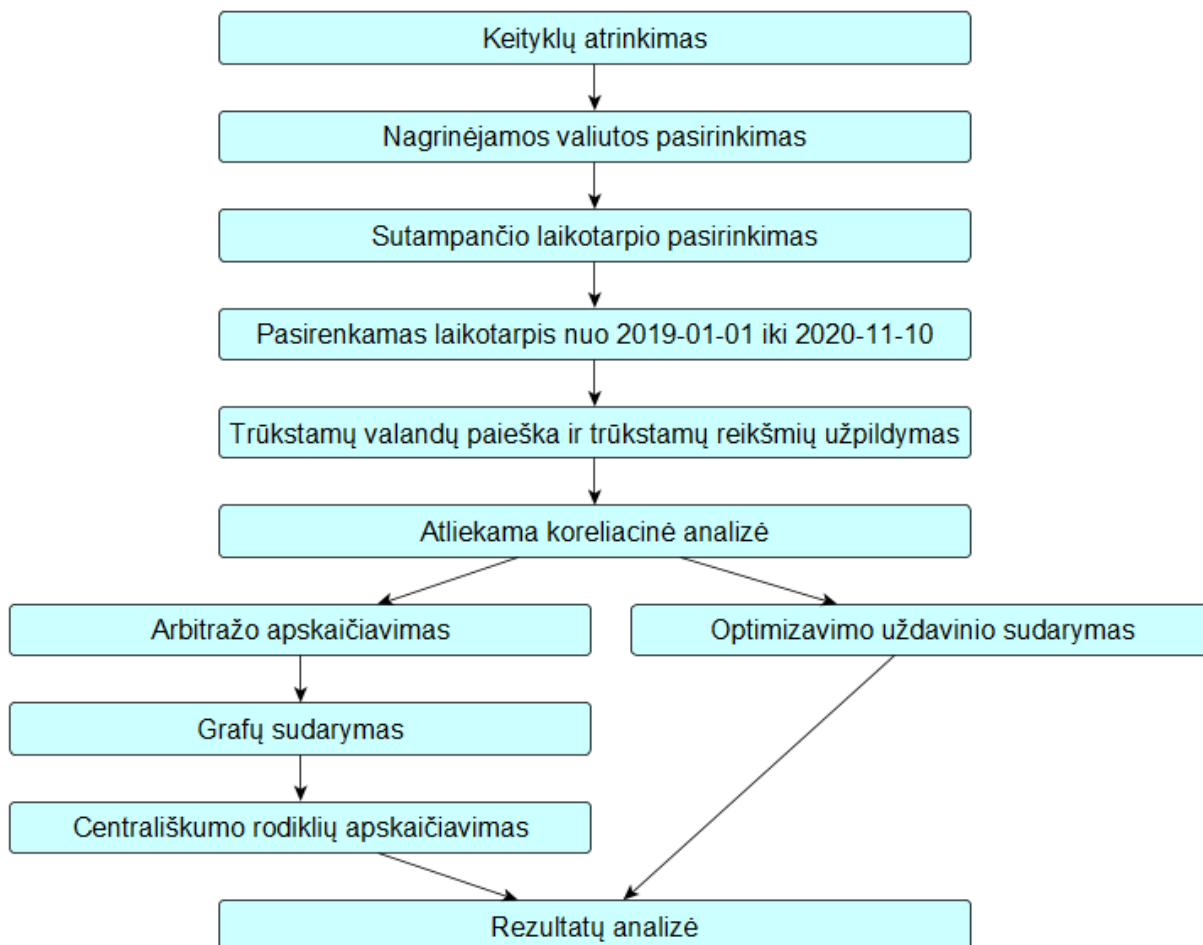
Išanalizavus mokslinę literatūrą, su arbitražo galimybių vertinimu, taikant grafų teoriją, susijusių straipsnių nebuvo rasta. Pritaikius grafų teoriją kriptovaliutų rinkoje būtų galima stebėti koks uždarbis yra galimas perkant ir parduodant valiutas skirtingose keityklose, taip pat matyti tendencijas, kurios keityklos yra palankesnės bitkoino pirkimui, o kurios pardavimui. Tokia informacija ir analizė būtų naudinga investuotojams, finansinėms institucijoms ir tiems, kurie domisi kriptovaliutų rinka.

## 2. Arbitražo galimybių vertinimo kriptovaliutų rinkoje metodika

Šiame skyriuje yra pateikiama informacija apie naudotus duomenų rinkinius, jų apimtį, aprašomi arbitražo apskaičiavimo metodai, naudota programinė įranga, yra įvertinamas tyrimų patikimumas ir atsikartojamumas.

### 2.1. Tyrimo eiga

Pirmiausia, prieš pradėdant tyrimą, buvo pasirinkta kurių šalių keityklas pasirinkti. Pagal didžiausią kriptokeityklų kiekį *cryptodatadownload.com* internetinėje svetainėje buvo pasirinkti Jungtinės Karalystės ir JAV šalių keityklų duomenys. Iš viso, šalyse, buvo galima rasti 8 keityklų duomenis, tačiau ne visose buvo galima rasti valandinius ir norimo laikotarpio duomenis. Pagal šiuos kriterijus buvo atrinktos 5 keityklos, kurių kiekviena turėjo įvairių valiutų kainų duomenis, pasirinkta nagrinėti BTC/USD valiutų duomenis, nes bitkoinas yra pirmoji ir viena iš populiariausių kriptovaliutų, o USD, nes nagrinėjama JAV rinka. Taip pat, kadangi arbitražui apskaičiuoti reikia valiutų kainos, o jų iš viso buvo 4 (*Open, Close, Low, High*), buvo pasirinkta analizuoti *Open Price* valiutų duomenis, nes tai yra svarbus rodiklis dienos prekeiviams, kurie domisi trumpalaikių rezultatų matavimu. Atsirinkus valiutą ir kainą, duomenų rinkinį nuo 2017 metų liepos iki 2021 metų vasario iš viso sudarė 155 795 elementai matricoje. Kitas etapas buvo pasirinkti sutampantį laikotarpį visose keityklose. Atsižvelgus į šiuo metu pasaulyje vyraujančią epidemiologinę situaciją, buvo nuspręsta pažiūrėti kaip keitėsi arbitražas prieš prasidedant COVID-19 pandemijai ir jai jau vykstant, tad visose keityklose sutampantis ir pasirinktas laikotarpis buvo 2019-01-01 iki 2020-11-10. Pasirinkus laikotarpį buvo ieškoma trūkstamų reikšmių, t.y. kurių valandų metu kainos nebuvo užfiksuotos, jas pažymėjus kaip trūkstamas reikšmes sudarytą duomenų rinkinį sudarė 16 320 elementų kiekvienai keityklai. Toliau buvo vertinamas koreliacijos koeficientas, tam, kad patikrinti duomenų monotonišumą priklausomybę Sudarius duomenų rinkinį toliau buvo skaičiuojamas arbitražas, arbitražų skirtumai tarp keityklų buvo formuojami į daugiamačius masyvus, kuriuos sudarė gretimumo matricos. Toliau buvo sudaromi grafai kiekvienai matricai, apskaičiuoti ir išanalizuoti centrališkumo rodikliai. Kitame žingsnyje buvo sudaromas optimizavimo uždavinys, kurio tikslas surasti didžiausias arbitražo sumas, jas išreitinguoti ir pagal tai atrinkti keityklų poras, kuriose tikėtinos didžiausios arbitražo galimybės. Atlikus visą rezultatų analizę buvo padarytos išvados ir pateiktos rekomendacijos.



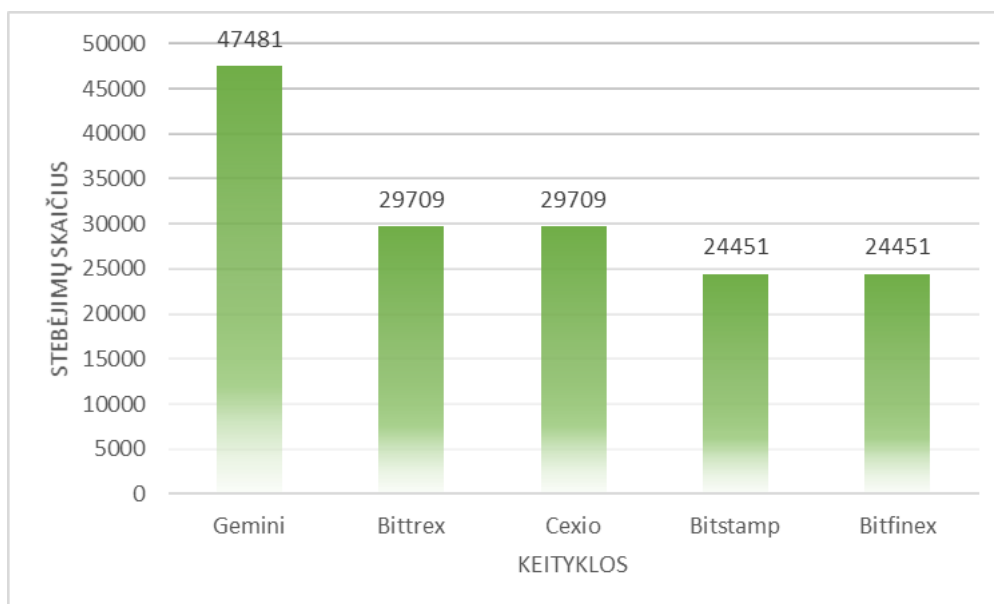
12 pav. Tyrimo eiga

## 2.2. Duomenų rinkinys ir jo apimtis

Literatūros apžvalgos dalyje mokslininkai vertino arbitražo sumas pagal savo pasirinktas metodikas. Atliktas arbitražo galimybių tyrimas yra unikalus tuo, kad yra vertinamas arbitražo skirtumas tarp keityklų taikant grafų teoriją, taip pat vertinamas arbitražo susidarymo potencialas tarp keityklų porų bei ieškoma arbitražo susidaryme aktyvios keityklos pagal centrališkumo rodiklius. Kadangi valiutų kainos yra labai nepastovus rodiklis ir jis gali keistis kas minutę, tai įvertinus ir pagal galimybes buvo pasirinkta nagrinėti valandinius valiutų kursų sumų duomenis.

Duomenys buvo traukiami iš svetainės *cryptodatadownload.com*, kadangi norimas keityklų skaičius buvo tarp 4-6, pasirinkta nagrinėti JAV ir Jungtinės Karalystės keityklų duomenis – *Gemini*, *Bittrex*, *Bitstamp*, *Bitfinex* ir *Cexio*. Kiekvienoje keitykloje valiutų porų duomenys buvo pateikti atskiruose .csv formato failuose. Juose nurodytos datos su valandomis, atidarymo, aukščiausia, žemiausia, uždarymo kainos ir parduodamas valiutų kiekis. Buvo pasirinkta visose keityklose esanti valiutų pora, kuri taip pat turėjo pakankamai ilgo laikotarpio duomenis – BTC/USD. Bitkoinas viena iš

populiariausų ir pirmoji kriptovaliuta pasaulyje, doleris pasirinktas, nes tai yra plačiausiai pasaulyje cirkuliuojanti valiuta bei dėl to, kad pasirinkta nagrinėti JAV rinka. Kiekvienos keityklos atrinktų duomenų laikotarpiai skyrėsi – *Gemini* keitykla turėjo įrašus nuo 2015-10-08 13:00 iki 2021-03-09 00:00 ir tai sudarė 47 481 stebėjimą, *Bittrex* ir *Cexio* kriptokeityklų duomenų imtis buvo sudaryta nuo 2017-07-01 11:00 iki 2020-11-20 07:00 ir tai sudarė 29 709 stebėjimus, likusių keityklų *Bitstamp* ir *Bitfinex* užfiksavo įrašus nuo 2018-06-15 06:00 iki 2021-02-27 00:00 ir tai viso sudarė 24 451 įrašą. Kadangi laikotarpiai skiriasi, jie buvo suvienodinti ir paimtas bendras laikotarpis nuo 2019-01-01 00:00 iki 2020-11-10 23:00, pasirinktas laikotarpis toks ilgas, nes atsižvelgiama į šiuo metu vykstančią pasaulinę pandemiją, kurią Pasaulio sveikatos organizacija paskelbė nuo 2020 metų kovo mėnesio 11 dienos. Atrinkus laikotarpį buvo ieškota trūkstančių reikšmių, tam buvo pasirašyta programa R kalba, kuri randa kiekvienos dienos valandų skaičių ir atrinkus dienas, kuriose trūksta valandų (nėra lygios 24 valandoms) tos eilutės buvo užpildomos NA reikšmėmis. Prieš atliekant skaičiavimus šiuos duomenis reikėjo apjungti į bendrą duomenų rinkinį – buvo pasiruoštas *.xlsx* formato failas, kuriame buvo nurodoma data, keityklos ir prie kiekvienos iš jų atidarymo kainos (angl. *open price*). Apjungus duomenis į duomenų rinkinį iš viso buvo gauta 81 600 elementų, kiekvieną keityklą sudarė 16 320 įrašų.



13 pav. Pradinio duomenų rinkinio apimtys

### 2.3. Naudojama programinė įranga

Duomenų rinkinys buvo saugomas „Microsoft Excel“ *.xlsx* formato faile. Visi skaičiavimai buvo atlikti R programavimo kalba, naudojantis *RStudio* programine įranga. Duomenų nuskaitymui iš failo buvo panaudotas *readxl* paketas, kadangi duomenys yra kintantys laike, jų apdorojimui naudojamas *xts* paketas. Spirimo koreliacijos koeficiento apskaičiavimui naudojamas paketas *Hmisc*. Lengvesniam darbui su laiko eilutėmis naudojamas paketas *lubridate*. Grafų sudarymui naudojamas paketas *igraph* ir funkcija *graph\_from\_adjacency\_matrix*, grafų analizei, centrališkumo rodikliams apskaičiuoti buvo naudojamos funkcijos *hub\_score*, *authority\_score*, *page\_rank*, *degree*. Duomenų agregavimui buvo naudojamas paketas *dplyr*. Grafikų kūrimui buvo naudojamas paketas *ggplot2*, o grafikų interaktyviam atvaizdavimui naudojamas paketas *plotly*.

## 2.4. Koreliacinė analizė

Sutvarkius duomenis buvo vertinamas ryšys tarp kintamųjų, tam buvo atlikta koreliacinė analizė, kurios tikslas yra įvertinti ryšio tarp keityklos A ir B tendenciją, kuri gali būti monotonišė (kai visoms A reikšmėms ryšio tarp A ir B keityklų reikšmių tendencija yra vienoda, visada padidėjus A reikšmėms padidėja ir B) arba nemonotonišė. Tam įvertinti buvo pasirinktas Spirmeno koreliacijos koeficientas, kuris apibūdina ryšio tarp A ir B stiprumą monotoniškumo prasme, t.y. A didėjant, B monotoniškai didėja (nebūtinai tiesiškai), kai  $p_S > 0$  arba mažėja, kai  $p_S < 0$ .

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)},$$

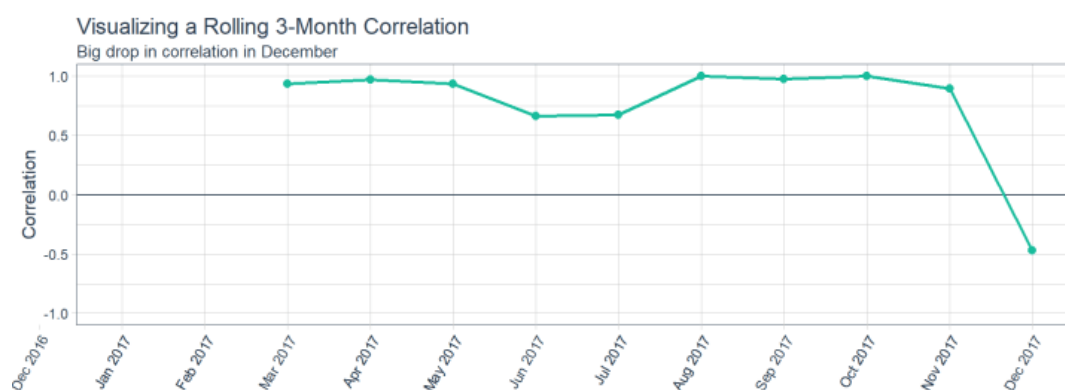
čia  $\rho$  – Spirmeno koreliacijos koeficientas,  $d_i$  – skirtumas tarp atitinkamų kintamųjų rangų,  $n$  – stebėjimų skaičius.

Koreliacijos stiprumui apibūdinti yra naudojamos absoliučios vertės pavaizduotos 3 lentelėje.

3 lentelė. Koreliacijos laipsniai pagal klasifikavimo standartus

Klasifikavimo standartai ( $p_S$ reikšmė)	Koreliacijos laipsnis
$p_S = 0$	Koreliacijos nėra
$0 < p_S \leq 0.19$	Labai silpna
$0.20 \leq p_S \leq 0.39$	Silpna
$0.40 \leq p_S \leq 0.59$	Vidutinė
$0.60 \leq p_S \leq 0.79$	Stipri
$0.80 \leq p_S \leq 1.00$	Labai stipri

Taip pat buvo atlikta slenkanti koreliacija (pavyzdys parodytas 14 pav.), tai koreliacijos tarp dviejų laiko eilučių apskaičiavimas. Vienas iš šios koreliacijos privalumų, kad yra galimybė atvaizduoti koreliacijos pokyčius laikui bėgant. Slenkanti koreliacija gali signalizuoti apie įvykius, dėl kurių dvi koreliuojančios laiko eilutės nukrypsta viena nuo kitos. Galima nustatyti tendencijos pokyčius, nes laiko eilutės laikui bėgant tampa daugiau ar mažiau susijusios.



14 pav. Slenkančios koreliacijos atvaizdavimas [35]

## 2.5. Arbitražo apskaičiavimo metodai

Kadangi buvo turimos tik valiutų keitimų kainos, tai arbitražas buvo apskaičiuojamas remiantis A. Shynkevich (2020) pateiktu skaičiavimo metodu [24]. Arbitražo investavimo strategija susideda iš ilgos bitkoino pozicijos biržoje (pirkti), kur ji yra santykinai per maža, ir trumpos bitkoino pozicijos (parduoti) biržoje, kur ji yra palyginti per didelė tam tikru momentu. Arbitražo pozicijos nustatymas priklauso nuo bitkoino kainų, pastebėtų per tą valandą, todėl tai yra praktiškai įmanoma. Arbitražo prekybos bitkoinais grąža tarp biržų poros  $A$  ir  $B$ , tam tikrą valandą  $h$ ,  $R_h$ , yra valandinis pokytis nuo  $h-1$  iki  $h$  santykiniam kainų skirtumui tarp ilgųjų ir trumpųjų bitkoinų pozicijų. Norint apskaičiuoti valandos arbitražo grąžas, sudaromas kiekvienos valandos  $h$  sprendimų medis, kuriame arbitražo investavimo strategija priklauso nuo:

1. santykinio valiutos kainų skirtumo tarp dviejų keityklų  $h-1$  valandą,  $P_{h-1}^A$  palyginus su  $P_{h-1}^B$ ;
2. santykinio valiutų kainos skirtumo tarp dviejų keityklų valandą  $h$ ,  $P_h^A$  palyginus su  $P_h^B$ ;
3. vienkryptės proporcingų sandorio išlaidų,  $c$ , pridedamų prie pirkimo savikainos ir atimamos iš pardavimo pajamų (šiam tyrimui ji buvo nustatyta lygi 0);
4. padėties indekso  $I_{h-1}$  valandą  $h-1$ .

Pozicijos indeksas gali įgyti vieną iš trijų galimų reikšmių:  $I_{h-1} = 1$ , jei yra ilga valiutos pozicija keitykloje  $A$  ir trumpa pozicija keitykloje  $B$ , kuri buvo atidaryta prieš  $h-1$  ir vis dar laikosi valandos  $h-1$  pabaigoje;  $I_{h-1} = 0$  jei nei viena valiutos pozicija dviejose keityklose, kuri buvo atidaryta prieš valandą  $h-1$  yra vietoje pasibaigus valandai  $h-1$ ;  $I_{h-1} = -1$  jei ilga pozicija keitykloje  $B$  ir trumpa pozicija keitykloje  $A$ , kuri buvo atidaryta prieš  $h-1$  yra vis dar tokia pati pasibaigus valandai  $h-1$ .

Prekybos sprendimų medis, apibūdinantis arbitražo investavimo strategiją pavaizduotas 4 lentelėje.

4 lentelė. Prekybos sprendimų medis, adaptuota pagal A. Shynkevich straipsnį [24]

Sprendimas	Pozicijos indeksas $I_h$	Arbitražas $R_h$	Sąlygos
Atidaryta ilga pozicija keitykloje A ir trumpa pozicijos B valandą $h-1$ , abi uždaromos valandą $h$	0	$\ln \frac{P_h^A(1-c)}{P_{h-1}^A(1+c)} - \ln \frac{P_h^B(1+c)}{P_{h-1}^B(1-c)}$	$I_{h-1} = 0, \frac{P_h^A}{P_h^B} \geq 1, \frac{P_{h-1}^B}{P_{h-1}^A} > 1+x$
Atidaryta ilga A ir trumpa pozicijos B valandą $h-1$ , išlaikomos pozicijos ir valandą $h$	1	$\ln \frac{P_h^A}{P_{h-1}^A(1+c)} - \ln \frac{P_h^B}{P_{h-1}^B(1-c)}$	$I_{h-1} = 0, \frac{P_h^A}{P_h^B} < 1, \frac{P_{h-1}^B}{P_{h-1}^A} > 1+x$
Išlaikoma ilga pozicija A ir trumpa B atidarytos keityklose prieš valandą $h-1$ esant valandai $h$	1	$\ln \frac{P_h^A}{P_{h-1}^A} - \ln \frac{P_h^B}{P_{h-1}^B}$	$I_{h-1} = 1, \frac{P_h^A}{P_h^B} < 1$
Uždaryta ilga A ir trumpa B atidaroma prieš $h-1$ esant $h$	1	$\ln \frac{P_h^A(1-c)}{P_{h-1}^A} - \ln \frac{P_h^B(1+c)}{P_{h-1}^B}$	$I_{h-1} = 1, \frac{P_h^A}{P_h^B} \geq 1$
Atidaryta ilga B ir trumpa A valandą $h-1$ , uždarytos abi pozicijos valandą $h$	0	$\ln \frac{P_h^B(1-c)}{P_{h-1}^B(1+c)} - \ln \frac{P_h^A(1+c)}{P_{h-1}^A(1-c)}$	$I_{h-1} = 0, \frac{P_h^B}{P_h^A} \geq 1, \frac{P_{h-1}^A}{P_{h-1}^B} > 1+x$
Atidaryta ilga B ir trumpa A valandą $h-1$ , išlaikomos abi pozicijos valandą $h$	-1	$\ln \frac{P_h^B}{P_{h-1}^B(1+c)} - \ln \frac{P_h^A}{P_{h-1}^A(1-c)}$	$I_{h-1} = 0, \frac{P_h^B}{P_h^A} < 1, \frac{P_{h-1}^A}{P_{h-1}^B} > 1+x$
Išlaikyta ilga B ir trumpa A atidaryta prieš $h-1$ esant valandai $h$	-1	$\ln \frac{P_h^B}{P_{h-1}^B} - \ln \frac{P_h^A}{P_{h-1}^A}$	$I_{h-1} = -1, \frac{P_h^B}{P_h^A} < 1$
Uždaryta ilga B ir trumpa A atidaryta prieš $h-1$ esant valandai $h$	0	$\ln \frac{P_h^B(1-c)}{P_{h-1}^B} - \ln \frac{P_h^A(1+c)}{P_{h-1}^A}$	$I_{h-1} = -1, \frac{P_h^B}{P_h^A} \geq 1$
Nei viena pozicija neatidaryta, išlaikyta ar uždaryta valandą $h$	0	0	$I_{h-1} = 0, \frac{P_h^B}{P_h^A} \leq 1, \frac{P_{h-1}^A}{P_{h-1}^B} \leq 1+x$

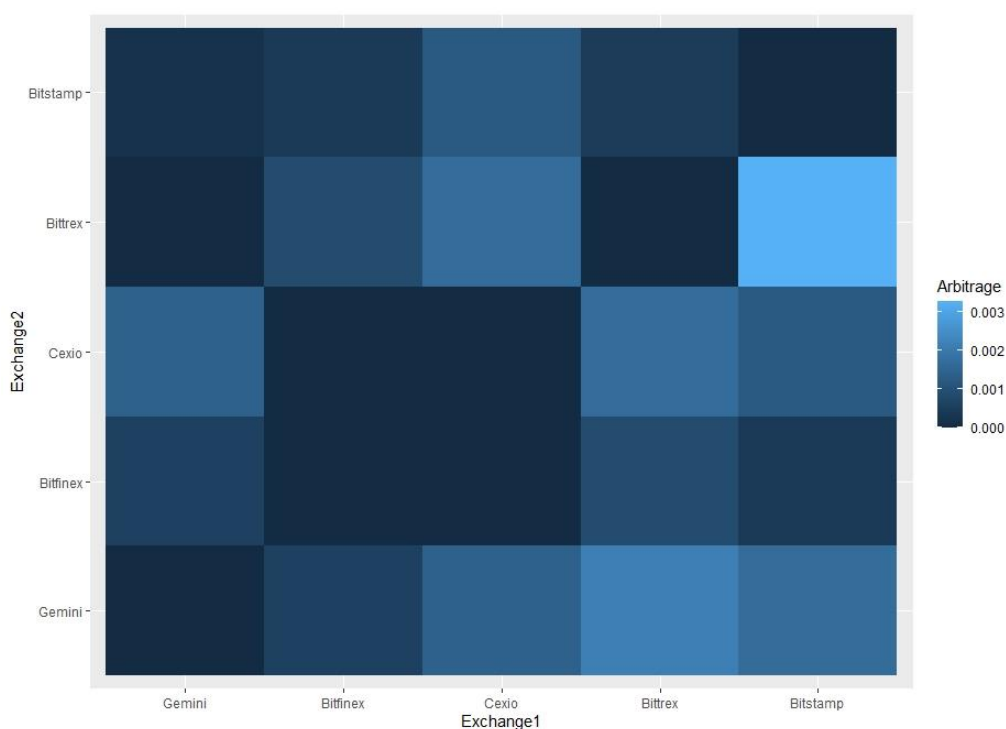
4 lentelėje pavaizduotos arbitražo formulės buvo realizuotos R kalba, gauti arbitražų skirtumai sudėti į daugiamačius masyvus.

## 2.6. Grafų sudarymas ir centrališkumo parametru apskaičiavimas

Įvertinus keityklų koreliacijas ir apskaičiavus arbitražus, suformuotas grafas, kurio viršūnėse yra keityklos, o briaunos aprašo arbitražo potencialą ir srauto kryptį. Tokia analizė leido atvaizduoti sistemą kaip tinklą ir vertinti jo viršūnių charakteristikas.

Pirmiausia buvo sudaromos gretimumo matricos (žr. 15 pav.) iš arbitražo reikšmių, iš viso buvo sudaryta 16 315 matricų kiekvienai valandai nuo 2019 m. sausio 1 dienos iki 2020 m. lapkričio 10 dienos. Kiekvienai matricai buvo sudaryti grafai, kurių mazgai yra keityklos, o briaunų svoriai

atitinkamai yra gauti arbitražų skirtumai. Kiekvienam grafui buvo apskaičiuoti jo pagrindiniai centrališkumo rodikliai kaip: *Hub* ir *Authority Scores*, *PageRank*, *In Degree* ir *Out Degree*.



15 pav. Gretimumo matrica

Centrališkumo rodikliai (angl. *Centrality measures*) grafų teorijoje pateikia įvertinimą kiek mazgas ar briauna yra svarbūs tinklo ryšiui, remiantis mazgo pozicija tinkle. Buvo teikta pirmenybė tiems rodikliams, kurie galėtų padėti atrasti arbitražo galimybes tinkle:

- *Hub* ir *Authority* įvertinimai priklauso HITS (*hyperlink-induced topic search*) algoritmui. HITS yra nuorodų analizės algoritmas, kuris padeda nustatyti pagrindinius grafų mazgus. Mazgo *Authority* rodiklis yra vertingos informacijos, kurią turi šis mazgas, kiekio matas. Mazgo *Authority* balas rodo į kiek labai informatyvių viršūnių rodo šis mazgas. Aukštas *Hub* įvertinimas rodo, kad mazgas nukreiptas į daugelį kitų informatyvių mazgų. Kita vertus, mazgas, kuris turi aukštą *Authority* balą, rodo, kad jis nukreiptas į daugybę mazgų, taigi tarnauja kaip naudingos informacijos turintis mazgas tinkle. Matematiškai įvertinimai yra apskaičiuojami taip: *Authority* balas yra proporcingas į jį nukreiptų mazgų *Hub* centrų sumai ir apibrėžiamas kaip

$$x_i = \sum_j y_j,$$

čia  $x_i$  – *Authority* centrališkumas,  $y_j$  – *Hub* centrališkumas.

Mazgo *Hub* centrališkumas yra proporcingas į jį nukreiptų mazgų *Authority* centrų sumai ir apibrėžiamas kaip

$$y_i = \sum_j x_j,$$

čia  $y_j$  – *Hub* centrališkumas,  $x_j$  – *Authority* centrališkumas.

Arbitražo galimybių analizėje *Hub* ir *Authority* įvertinimai yra skirti įvertinti kriptovaliutų keityklų svarbą tinkle. Geras *Hub* rodiklio įvertinimas rodo keityklas, kur kaina yra didesnė



ir jose valiuta gali būti perkama. Aukštas *Authority* rodiklis rodo keityklas, kur kaina taip pat yra didesnė ir jose valiuta gali būti parduodama. Gautos reikšmės svyruoja nuo 0 iki 1, kur didesnė reikšmė parodo didesnę kriptovaliutų keityklos, atitinkamai pirkėjo ar pardavėjo, svarbą [36].

- *PageRank* centrališkumo rodiklis yra naudojamas *Google* paieškos tinklapiams reitinguoti paieškos sistemų rezultatuose. Tai būdas įvertinti svetainės puslapių svarbą. *PageRank* rodiklis gali padėti atskleisti įtakingus ar svarbius mazgus, kurių pasiekiamumas viršija ne tik jų tiesioginius ryšius. Tai yra ypač naudinga scenarijuose, kai nuorodos kryptis yra svarbi. Matematiškai *PageRank* yra apibrėžiamas taip [36]:

$$x_i = \alpha \sum_j A_{ij} \frac{x_j}{k_j^{out}} + \beta;$$

čia  $A_{ij}$  yra gretimumo matricos narys ir  $x_i$  yra matricos  $A$  tikrinio vektoriaus elementas toks kaip  $Ax = \lambda x$ , parametras  $k_j^{out}$  yra viršūnės  $x$  išėjimo laipsnis, kuris yra lygus 1 kai mazgas neturi įėjimo laipsnio, kad būtų išvengta dalybos iš nulio,  $\alpha, \beta > 0$ . *PageRank* centrališkumo rodiklis atskleidžia svarbias kriptovaliutų keityklas.

- Taip pat buvo apskaičiuoti laipsnių rodikliai *in-degree* ir *out-degree*. Orientuotame grafe  $G = (V(G), E(G))$ , kurio mazgai  $v \in V(G)$  *out-degree* rodiklis  $v$  mazgui rodo iš jo išėjusių briaunų skaičių, tai yra lankų, nukreiptų nuo  $v$  mazgo, skaičius. *In-degree* rodiklis parodo kiek lankų yra nukreiptų į mazgą  $v$ . Matematiškai šie laipsniai apibrėžiami taip – *in-degree* žymimas  $deg^-(v)$ , *out-degree* žymimas  $deg^+(v)$ . Mazgas, kurios  $deg^-(v) = 0$  vadinama šaltinio mazgu (angl. *source*), nes iš jos eina kitos briaunos. Analogiškai kai  $deg^+(v) = 0$ , toks mazgas yra pabaigos mazgas (angl. *sink*). Jei mazgas nėra nei pabaigos, nei pradžios mazgas, jis yra vadinamas vidiniu (angl. *internal*). Orientuoto grafo laipsnių sumos formulė apibrėžiama taip:

$$\sum_{v \in V} deg^+(v) = \sum_{v \in V} deg^-(v) = |A|$$

Jeigu kiekvieno mazgo įeinančių ir išeinančių laipsnių skaičius sutampa, toks grafas yra vadinamas subalansuotu orientuotu grafu (angl. *balanced directed graph*).

Šiame tyrime *in-degree* rodiklis parodo, kiek mazge esanti keitykla siejasi su kitomis keityklomis, galima įvertinti kuriose keityklose būtų galima pelningai parduoti valiutą kai tik tam būtų palankios salygos. *Out-degree* parodo, kokiose keityklose būtų galima pelningai parduoti valiutą, kai ji yra įsigyta mazge esančioje keitykloje. Kuo didesnė *in-degree* reikšmė, tuo keitykla, kuri yra mazge, yra palanki valiutos pardavimui ir jos arbitražo susidarymo tikimybė yra didesnė. Didesnė *out-degree* reikšmė parodo, kad mazge esanti birža yra patraukli valiutos pirkimui, nes esant kainų skirtumui, valiutą būtų galima parduoti su tuo mazgu susijusiose keityklose.

## 2.7. Optimizavimo uždavinys

Apskaičiavus arbitražus ir centrališkumo rodiklius buvo išsikeltas optimizavimo uždavinys, kurio tikslas yra apskaičiuoti rangų sumas ir surasti, kurios keityklų poros sudarydavo didžiausius arbitražus ir koks yra jo potencialas. Tam, kad tai būtų galima apskaičiuoti reikėjo suranguoti kiekvienos valandos keityklų porų arbitražus nuo 1 iki 20. Tai buvo daroma imant kiekvieną matricą

iš masyvo, kurią sudaro arbitražo reikšmės, ieškoma didžiausia arbitražo reikšmė ir jo vieta matricoje, tuomet į naują matricą, tą pačią vietą įrašomas rangas, t.y. kokią vietą pagal savo arbitražo dydį pora užima matricoje. Arbitražas yra nunulinamas ir ieškoma nauja maksimali reikšmė matricoje, kol visos reikšmės yra išranguojamos ir tampa nulinėmis, tuomet einama prie kitos laiko eilutės (pseudo kodas pavaizduotas žemiau).

```
FOR arbitražų matrica per visą laikotarpį
  rangas = 1
  WHILE rangas != 0
    Randama didžiausia reikšmė matricoje
    IF rangas != 0
      Randama didžiausios reikšmės vieta
      Matricoje didžiausia reikšmė sulyginama -1
      Rangas įrašomas į matricą
      Rangas padidinamas 1
    ENDIF
  ENDWHILE
ENDFOR
```

Didžiausia reikšmė priskiriama -1

Tuomet buvo sudaryta rangų funkcija, nusakanti arbitražo potencialo tarp keityklų porų rangus per nagrinėjamą laikotarpį, pavaizduota žemiau:

$$F(rank) = \sum_{n=1}^{16315} rank_{i,j,n}$$

Apribojimai kintamiesiems:

$$1 < n < 16315, 1 < j < 20, 1 < i < 20, j = 1, i = 1, j = j + 1, i = i + 1$$

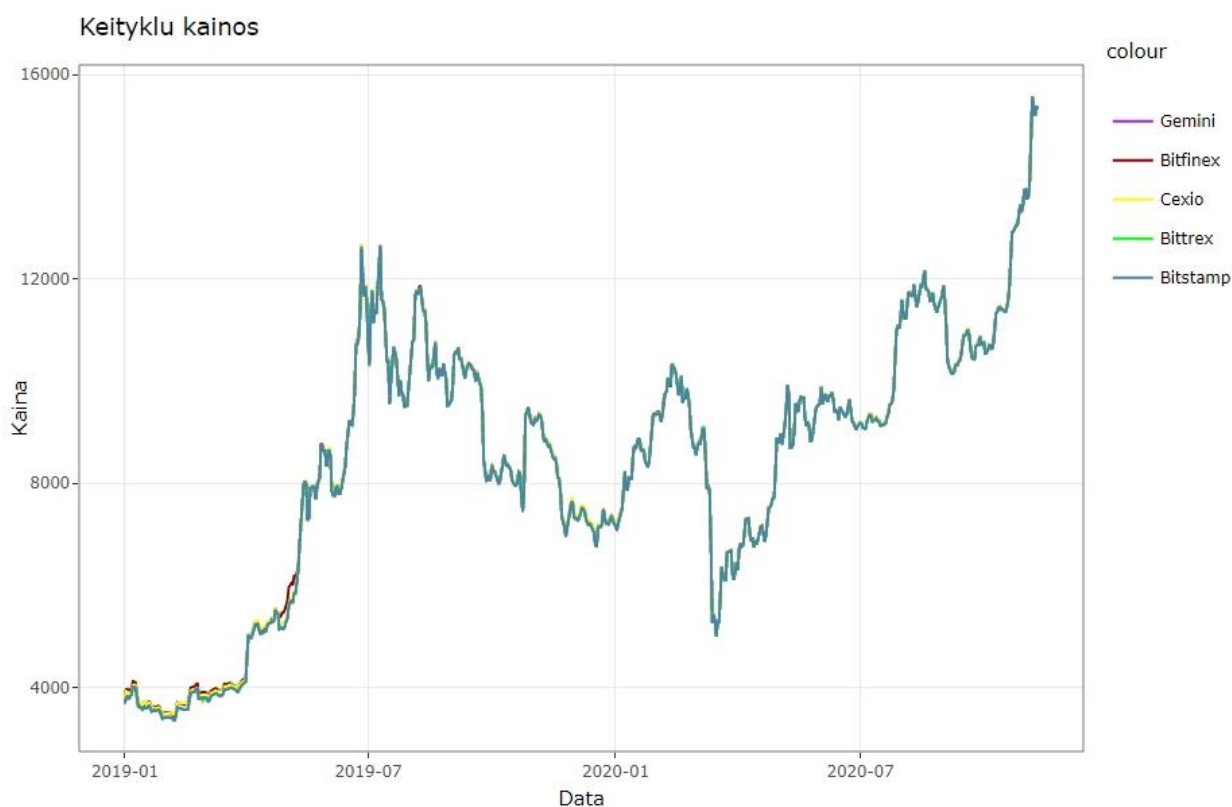
Ieškoma mažiausia tinklo funkcijos reikšmė, ji parodys kuri keityklų pora sudarė didžiausius arbitražus.

### 3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Šioje dalyje pateikiami arbitražo galimybių vertinimo kriptovaliutų rinkoje tyrimo rezultatai ir jų apibendrinimas. Naudojant Spirmeno ir slenkančią koreliaciją apžvelgtos ryšių tarp keityklų monotoniškumas, atlikta apskaičiuotų arbitražų tarp biržų rezultatų analizė, aptarti gauti centrališkumo rodiklių rezultatai, įvertintas arbitražo susidarymas prieš pandemiją ir jai vykstant, taip pat jo potencialas.

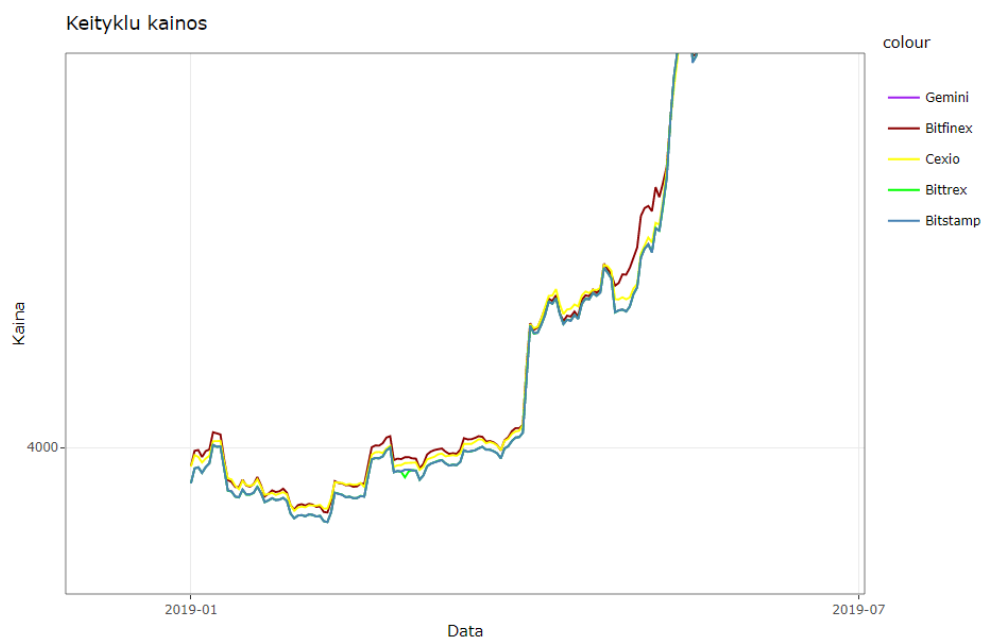
#### 3.1. Bitkoino kainos dinamika laike

Analizei atlikti buvo pasirinktas BTC/USD valiutų kursas. Pirmiausia buvo apžvelgtas kainų kitimas laike. Žemiau esančiame grafike matoma, kad žemiausia bitkoino kaina, apie 3 400 JAV dolerių, buvo 2019 metų vasarį, po to iki 2019 metų liepos matomas kilimas su nedideliais kritimais. Didesnis kainų nuosmukis matomas prieš 2020 metus, po to prasidėjus COVID-19 pandemijai matomas didžiausias kritimas kriptovaliutų rinkose, kursas krito iki ~5 000 JAV dolerių, po to rinka normalizavosi ir 2020 metų spalio mėnesį buvo pasiekta didžiausia nagrinėjamo laikotarpio kaina, ji siekė apie 15 000 JAV dolerių.



16 pav. Bitkoino kainų dinamika laike

Apžvelgiant kainų skirtumus tarp keityklų matoma, kad 2019 metų pradžioje išsiskyrė *Bitfinex* ir *Cexio* keityklos (žr. 17 pav.), jų siūlomos bitkoino kainos skyrėsi kiek daugiau nuo likusių keityklų. Toliau laiku kainos yra panašios, tik kiek didesnės matomos *Cexio* keitykloje, daugiau tarp kitų keityklų didesnių skirtumų nepastebėta.



17 pav. Bikoino kainų dinamika laike 2019 metų pradžioje

Taigi, apžvelgus kainų kitimą laike, galima matyti, kad kainos biržose buvo panašios, kiek skyrėsi 2019 metų pradžioje, iki 2019 m. liepos matomas kainų kilimas, po to jos mažėjo (žr. 16 pav.). COVID-19 pandemija taip pat paveikė kriptovaliutų rinkas, tačiau po 2 mėn. kainos grįžo į buvusias reikšmes ir stabiliai kilo su nedideliais nuosmukiais.

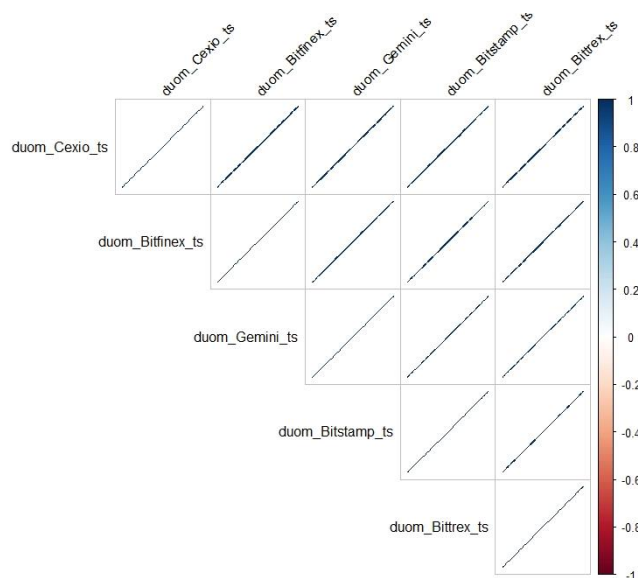
### 3.2. Koreliacijos analizė

Prieš atliekant arbitražo galimybių skaičiavimus tam, kad įsitikinti ar atsitiktiniai dydžiai yra priklausomi ir koks yra ryšio stiprumas tarp jų, atlikta koreliacinė analizė. Apskaičiuotas Spirmeno koreliacijos koeficientas, kur buvo tikrinama hipotezė:

$H_0$ : Spirmeno koreliacijos koeficientas lygus nuliui.

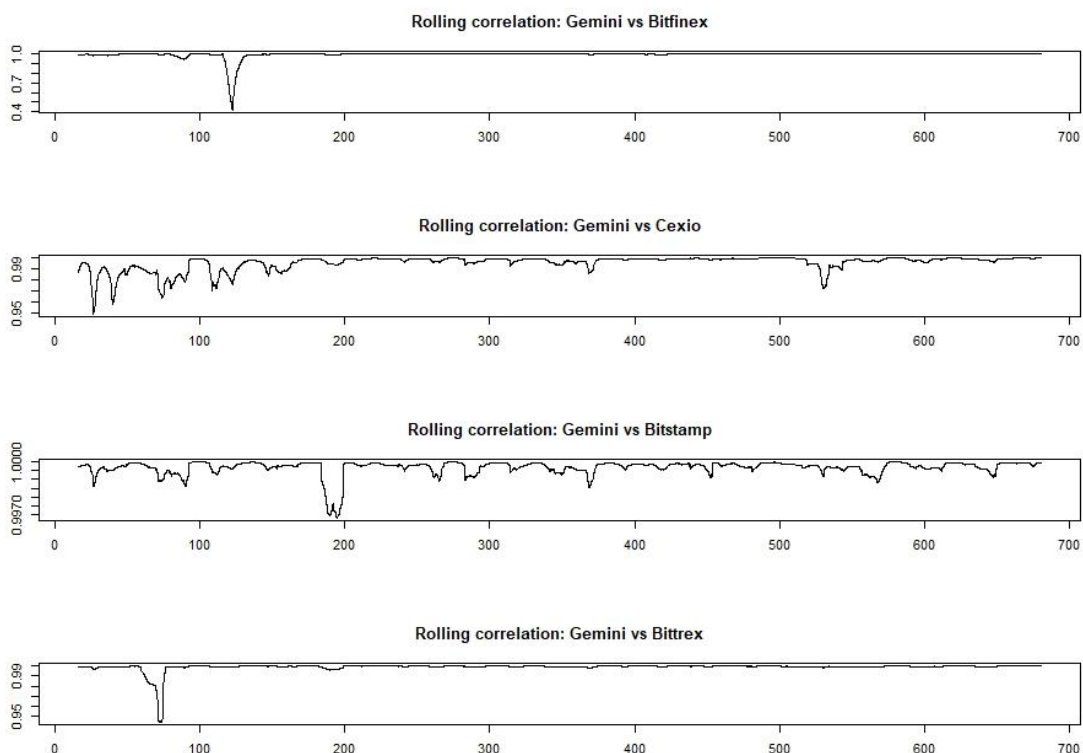
$H_a$ : Spirmeno koreliacijos koeficientas nėra lygus nuliui.

Pagal gautus rezultatus nulinė hipotezė yra atmetama, nes viso  $p$  reikšmės yra lygios nuliui ir mažesnės už 0,01. Tarp keityklų ryšys yra statistiškai reikšmingas, o Spirmeno koreliacijos koeficientas yra lygus 1, tai rodo, kad ryšys tarp kintamųjų yra labai stiprus.



18 pav. Keityklų kintamųjų koreliacinė matrica

Taip pat atlikta slenkanti koreliacija (žr. 19 pav.), kuri parodo koreliaciją tarp dviejų laiko eilučių. Pagal gautus rezultatus patoma koeficientai yra labai arti 1 ir žemesnių už 0,95 nėra tad ryšys tarp kintamųjų yra labai stiprus.



19 pav. Slenkanti koreliacija tarp kintamųjų

Taigi, atlikus Spirmeno ir slenkantią koreliacinę analizę galima teigti, kad kainos tarp keityklų yra stipriai priklausomos ir ryšys tarp jų yra labai stiprus.

### 3.3. Arbitražo analizė kriptovaliutų rinkoje

Įvertinus kainų kitimą bei ar dydžiai yra monotoniški, toliau buvo apskaičiuotas arbitražas tarp keityklų porų, pagal A. Shynkevich (2020) pasiūlytą metodą, kada yra žinomos valiutų kainos. Apskaičiavus arbitražą atlikta kiekvienos keityklų poros analizė (žr. 5 lentelę), apskaičiuotas vidurkis, standartinis nuokrypis, mažiausia bei didžiausia reikšmės ir procentinė teigiamo arbitražo reikšmė.

Pagal gautus rezultatus matoma, kad didžioji dalis keityklų turėjo neigiamus arbitražus, t.y. galime daryti prielaidą, kad arbitražas didžiąją laiko dalį nesusidarė. Tik dviejose keityklų porose – *Gemini/Bitfinex* ir *Bittrex/Bitfinex* arbitražo vidurkis buvo teigiamas, antroje poroje arbitražo vidurkis buvo 7,86 karto didesnis. Mažiausias arbitražo vidurkis matomas tarp keityklų porų *Gemini* ir *Bittrex*. Didžiausias standartinis nuokrypis pastebimas keityklose *Cexio/Gemini*, reikšmių sklaida apie vidurkį yra didžiausia.

Mažiausia arbitražo reikšmė susidaro tarp keityklų *Bittrex* ir *Bitstamp*, didžiausia matoma tarp keityklų *Cexio* ir *Bitstamp*, o panašios į didžiausią arbitražą reikšmės dar susidaro tarp 9 keityklų porų. Procentinė teigiamo arbitražo reikšmė tarp visų keityklų porų svyruoja nuo 35 iki 45 procentų.

5 lentelė. Arbitražo gražų statistika tarp keityklų porų

Keityklų poros	Vidurkis (%)	Standartinis nuokrypis (%)	Mažiausia reikšmė	Didžiausia reikšmė	Procentinė teigiamo arbitražo reikšmė
Gemini/Bitfinex	0,00169	0,60167	-12,66895	13,43312	43,89
Gemini/Cexio	-0,01584	0,53543	-9,43073	13,34954	42,84
Gemini/Bittrex	-0,03527	0,7331	-11,39194	18,51475	35,02
Gemini/Bitstamp	-0,02539	0,78772	-31,11171	18,48909	36,2
Bitfinex/Gemini	-0,01787	0,845	-29,92462	23,50912	43,82
Bitfinex/Cexio	-0,025445	0,69041	-29,07941	18,43239	41,52
Bitfinex/Bittrex	-0,02017	0,83033	-28,45391	23,52403	43,61
Bitfinex/Bitstamp	-0,01619	0,83987	-30,88331	23,91822	43,39
Cexio/Gemini	-0,02208	0,90047	-27,77317	23,51267	42,56
Cexio/Bitfinex	-0,02102	0,79224	-17,75251	23,38476	41,55
Cexio/Bittrex	-0,02191	0,88263	-26,30246	23,52757	42,7
Cexio/Bitstamp	-0,02112	0,89367	-28,73185	23,92177	42,85
Bittrex/Gemini	-0,01688	0,77391	-30,61292	23,19894	36,69
Bittrex/Bitfinex	0,0133	0,59804	-16,25911	14,22890	43,66
Bittrex/Cexio	-0,01617	0,54525	-14,43094	16,49033	42,98
Bittrex/Bitstamp	-0,02569	0,75941	-31,57161	16,8331	36,88
Bitstamp/Gemini	-0,01935	0,72668	-16,28028	23,76461	37,75
Bitstamp/Bitfinex	-0,00579	0,5936	-14,06455	13,23231	44,36
Bitstamp/Cexio	-0,01649	0,5329	-12,23637	15,49374	43,63
Bitstamp/Bittrex	-0,02945	0,74246	-16,14109	23,77952	36,01

Kadangi aktualus yra tik teigiamas arbitražas, t.y. toks, kuris parodo, kuriose keityklose yra palanku pirkti ir parduoti kriptovaliutą, išvedamas vidurkis ir standartinis nuokrypis kiekvienoje keitykloje panaikinus neigiamas ir nulines arbitražo reikšmes. Gauti rezultatai (žr. 6 lentelę) parodo, kad didžiausias arbitražo vidurkis matomas tarp *Cexio* ir *Bitstamp* keityklų porų, kuriose ir buvo gauta didžiausia arbitražo reikšmė. Mažiausias arbitražo vidurkis atvirkščiai tarp *Bitstamp* ir *Cexio* keityklų. Didžiausias standartinis nuokrypis matomas tarp keityklų porų, kurių vidurkis taip pat buvo didžiausias.

6 lentelė. Arbitražo gražų statistika tarp keityklų panaikinus neigiamas reikšmes

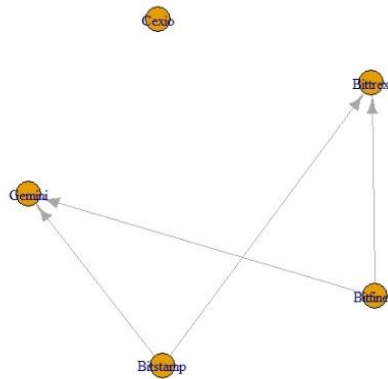
Keityklų poros	Vidurkis (%)	Standartinis nuokrypis (%)
Gemini/Bitfinex	0,11685	0,41909
Gemini/Cexio	0,10694	0,37363
Gemini/Bittrex	0,14764	0,50205
Gemini/Bitstamp	0,1701	0,51791
Bitfinex/Gemini	0,1829	0,53787
Bitfinex/Cexio	0,13838	0,46339
Bitfinex/Bittrex	0,18604	0,52051
Bitfinex/Bitstamp	0,19101	0,54271
Cexio/Gemini	0,21898	0,56709
Cexio/Bitfinex	0,19093	0,50794
Cexio/Bittrex	0,22081	0,55989
Cexio/Bitstamp	0,22323	0,56566
Bittrex/Gemini	0,15302	0,49789
Bittrex/Bitfinex	0,11797	0,42091
Bittrex/Cexio	0,10702	0,38073
Bittrex/Bitstamp	0,16789	0,48483
Bitstamp/Gemini	0,13031	0,48582
Bitstamp/Bitfinex	0,10994	0,41332
Bitstamp/Cexio	0,10517	0,37281
Bitstamp/Bittrex	0,13409	0,5139

Taigi, apibendrinus arbitražo analizės rezultatus matoma, kad arbitražas susidaro ne visada, o ir pati susidaranti arbitražo dalis procentais nėra labai didelė.

### 3.4. Grajų sudarymas ir gautų centrališkumo rodiklių analizė

Atlikus susidariusio arbitražo analizę, toliau sudaromi grafai, kurie leidžia įvertinti keityklų svarbą tinkle, remiantis keityklos pozicija. Žemiau pavaizduotas sudarytas grafas, kurio mazgai yra keityklos, o briaunų svoriai yra arbitražo reikšmės.



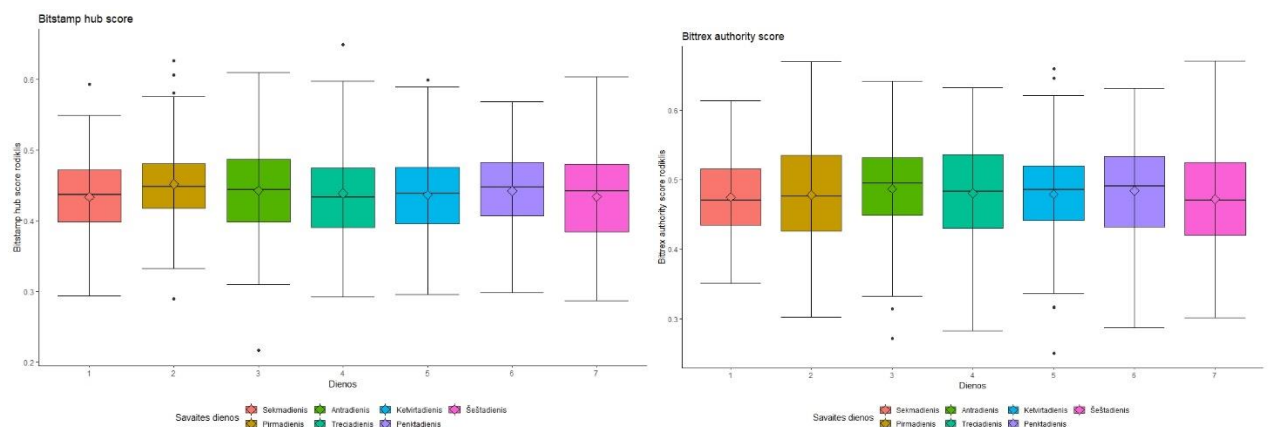


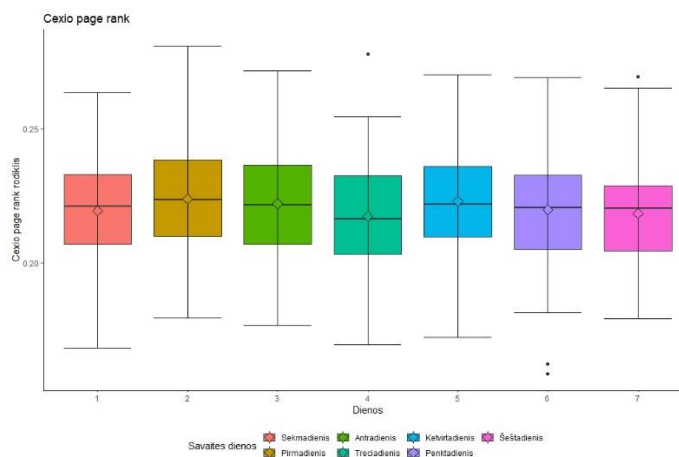
20 pav. Sudarytas grafas vienam laiko momentui

Apskaičiavus centrališkumo rodiklius pirmiausia buvo žiūrima ar yra susidariusi priklausomybė nuo savaitės dienų (žr. 21 pav.). *Bittrex*, *Gemini* ir *Bitfinex* keityklų didžiausias *Authority score* susidaro pirmadieniais, *Cexio* ir *Bitstamp* antradieniais, tomis dienomis pagal gautus rezultatus yra geriausia parduoti įsigytą valiutą keityklose.

*Hub score* rodiklio rezultatai parodė, kad pirkti valiutą *Gemini* keitykloje geriausia yra pirmadienį, *Bitfinex* šeštadienį, *Bitstamp* – sekmadienį, *Bittrex* – antradienį, o *Cexio* – trečiadienį.

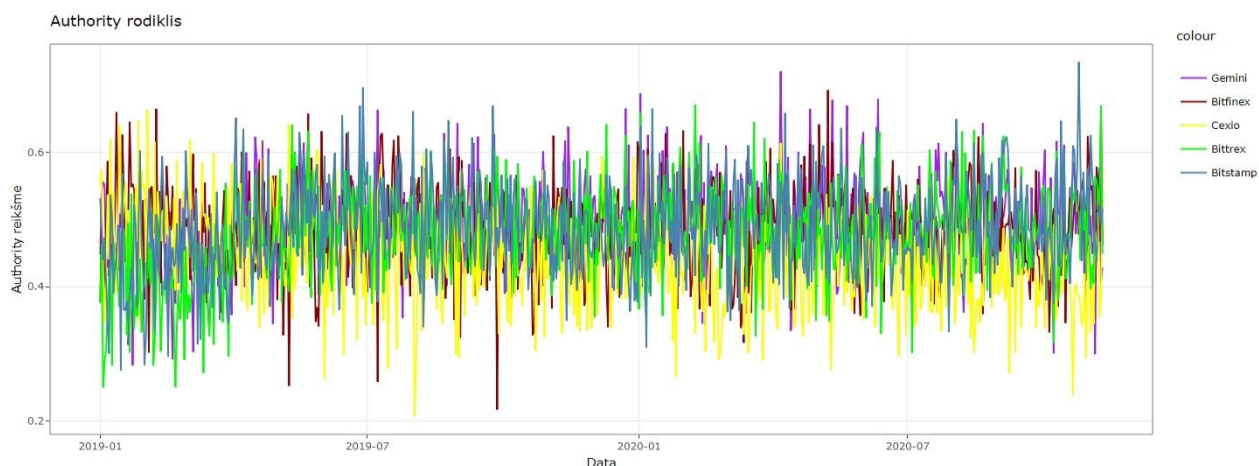
*Page rank* gauti rezultatai parodė, kad didžiausią pasiekiamumą visomis savaitės dienomis turi *Cexio* keitykla, kiekvieną savaitės dieną jos *Page rank* rodiklis buvo didesnis nei 0,2. Galima dar pastebėti, kad *Bitfinex* keityklą, dėl arbitražo susidarymo galimybės, svarbu stebėti sekmadienį, tačiau kitų keityklų rezultatai skiriasi nežymiai ir išlieka pastovūs visomis savaitės dienomis.





21 pav. Centrališkumo rodikliai savaitės dienomis

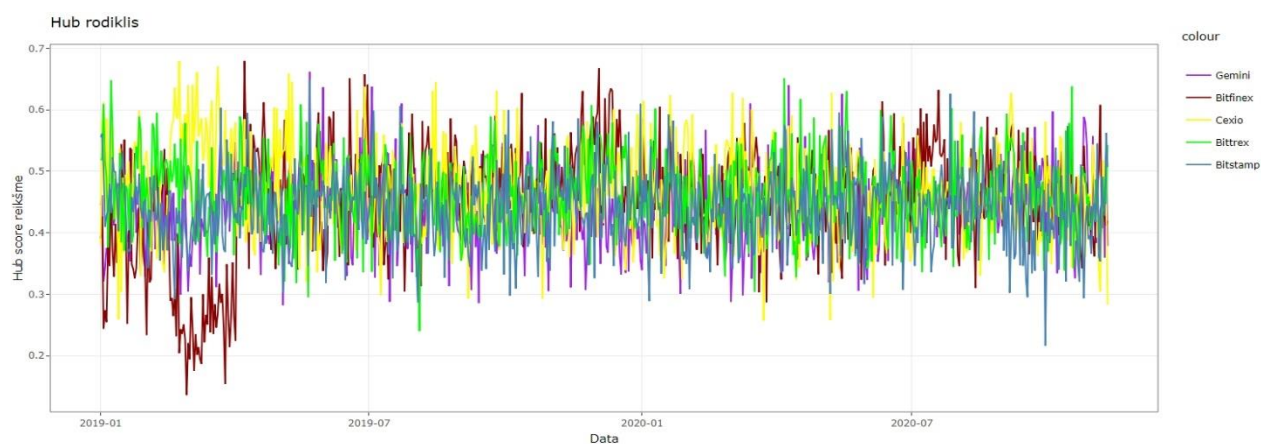
Kadangi keityklos neturi ryškios priklausomybės nuo savaitės dienų, centrališkumo rodikliai atvaizduoti kintantys laike (žr. 22 pav.). Pagal gautus rezultatus matoma, kad *Bittrex* keitykla iki 2019-03-29 dienos turėjo mažiausią *Authority* rodiklį, kuris buvo 2 kartus mažesnis nei vidurkis, tačiau po to jis pakilo ir iki 2020 metų spalio išliko pastovus, kartais matomi ir gana aukšti rodikliai. Atvirkščiai *Bittrex* keityklai, *Cexio* 2019 metų pradžioje rodė aukštus *Authority* rodiklius, tačiau nuo balandžio jie krito ir buvo žemesni maždaug 1,2 karto palyginus su kitomis keityklomis. Žemiausias *Authority* rodiklis (0,2) *Cexio* keitykloje buvo fiksuotas 2019-08-02. Gana pastovius *Authority* rodiklius rodė *Bitstamp* keitykla, joje nuo 2019 metų balandžio buvo palanku parduoti įsigytą valiutą, nes, kaip ir *Bittrex*, iki kovo galo *Authority* rodiklis buvo žemesnis nei įprastai. Taip pat ši keitykla 2020-10-25 pasiekė aukščiausią *Authority* rodiklį, kuris buvo lygus 0,7347, t.y. 1,5 karto daugiau už *Bittrex* *Authority* rodiklio vidurkį. Pastovumą išlaikė *Gemini* keitykla, labai didelių nukrypimų nepastebima bei ši keitykla turėjo aukščiausią *Authority score* rodiklio vidurkį (0,4928). Bendrai geriausi *Authority* rodikliai matomi 2020 metų balandį, tuo laikotarpiu buvo geriausia galimybė parduoti valiutą.



22 pav. *Authority* rodiklis kintantis laike

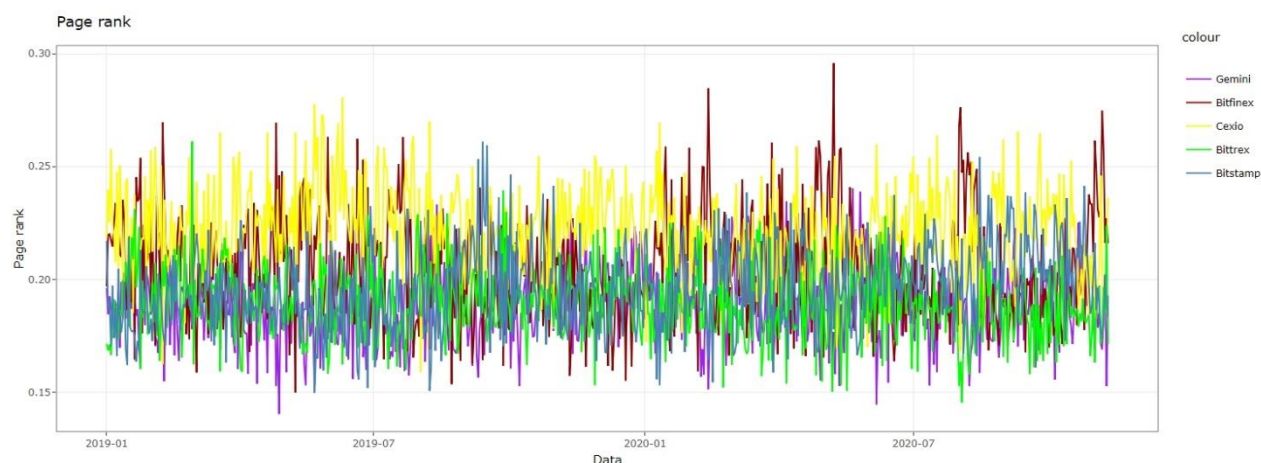
*Hub* rodiklio rezultatuose išsiskiria keitykla *Bitfinex*, kuri iki 2019 metų kovo galo turėjo labai mažą *Hub* rodiklį, mažiausia reikšmė nustatyta 2019-02-28 ir lygi 0,136, tai yra 3,33 karto mažiau už jos

vidurkį. *Cexio* keitykla tuo pačiu laikotarpiu rodė labai aukštą *Hub* rodiklį ir šios keityklos rezultatai išliko pakankamai aukšti iki 2020 metų spalio, taip pat šios keityklos *Hub* vidurkis yra didžiausias ir siekia 0,4699. Antra pagal aukštą *Hub* rodiklį yra keitykla *Bittrex*, kuri visą laikotarpį išlaikė panašius rodiklius.



23 pav. *Hub* rodiklis kintantis laike

*Page rank* rodiklio rezultatuose matoma, kad didžiausias reikšmes turi keitykla *Cexio*, tas pats buvo pastebėta ir pateikus rodiklio rezultatus savaitės dienomis. Mažiausią rodiklį 2019-04-28 turėjo *Gemini* keitykla, jis buvo lygus 0,14 ir tai yra 1,34 karto mažiau nei vidurkis. Didesnių nukrypimų matoma keitykloje *Bitfinex* 2020 metų vasario, gegužės, rugpjūčio ir lapkričio mėnesiais. Taip pat gegužės 8 dieną *Bitfinex* turėjo didžiausią *Page rank* rodiklį, kuris buvo 1,4 karto didesnis už vidurkį. Mažiausias *Page rank* rodiklio vidurkis matomas keitykloje *Gemini* (1,884), tai rodo, kad arbitražo susidarymo galimybė šioje keitykloje yra mažiau tikėtina.

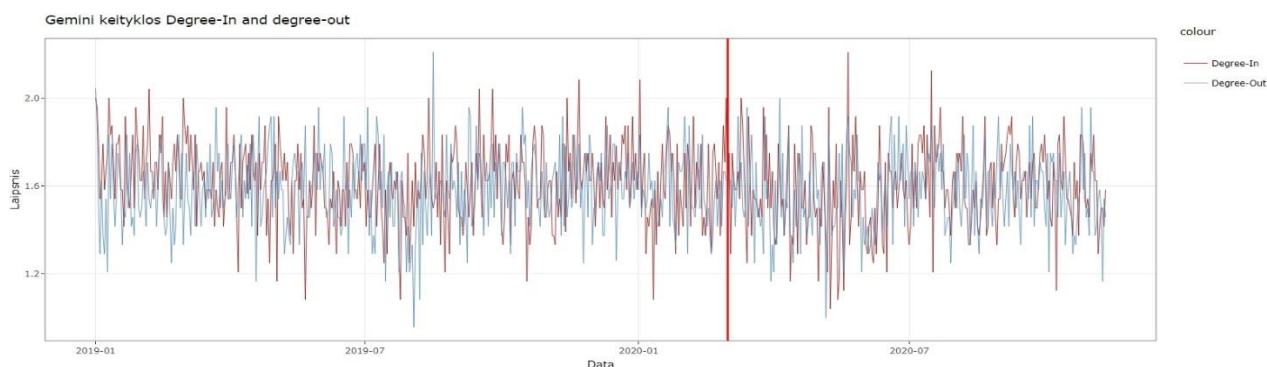


24 pav. *Page rank* rodiklis kintantis laike

Taigi, centrališkumo rodiklių analizė parodo, kad 2019 metų pradžioje, iki balandžio mėnesio, valiutų pardavimai nebuvo aktyvūs ir pelningi, toks pat nukrypimas atsispindi ir valiutos pirkime, ypač pirkti valiutą palankios galimybės nebuvo keitykloje *Bitfinex*. Palankiausias metas parduoti įsigytą valiutą buvo 2020 metų balandį, čia patraukliausia pardavimo atžvilgiu buvo *Gemini* keitykla. Iš pirkimo

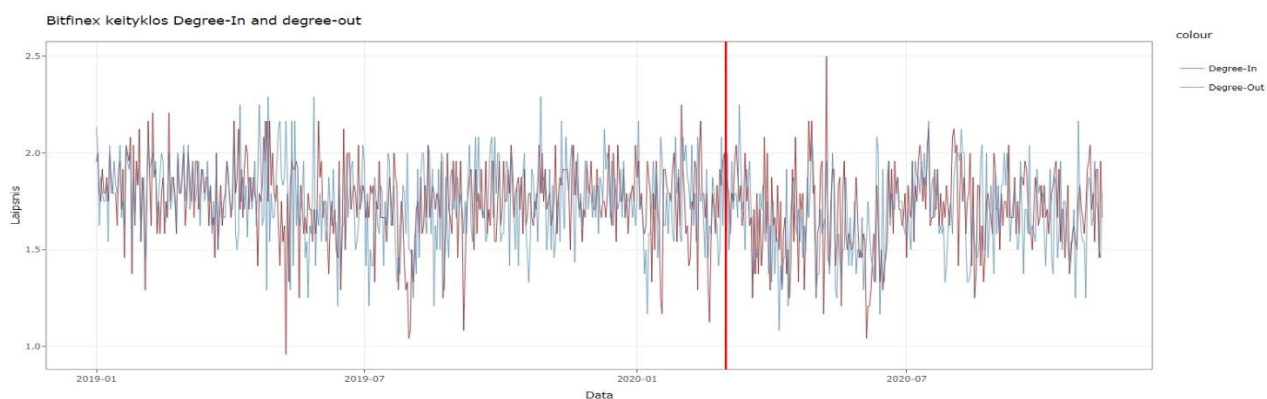
perspektyvos geriausia valiutas pirkti buvo 2019 metų lapkričio gale ir gruodžio pradžioje, pastovumą išlaikė keitykla *Bittrex*, o aukštą rodiklio rezultatą visu laikotarpiu parodė keitykla *Cexio*. Geriausia arbitražo susidarymo galimybė visą laikotarpį buvo *Cexio* keitykloje, o mažiausia keitykloje *Gemini*.

Toliau skaičiuojamos *in-degree* ir *out-degree* reikšmės, kurios, kaip ir aprašyta metodikoje, parodo kuriose keityklose yra palanku pirkti bitkoiną, o kuriose jį pelninga yra parduoti. Žemiau pavaizduoti grafikai parodo kaip šie rodikliai kito laike kiekvienoje keitykloje, pavaizduoti dieniniai duomenys, kurie buvo gauti suvidurkinus valandines reikšmes. Pastebima, kad visose biržose *in* ir *out* reikšmės kito nepastoviai visu laikotarpiu, tad išskirti keityklas, kurios yra lyderės sudėtinga. Galima pastebėti tik kelias išsiskiriančias dienas kiekvienoje keitykloje. *Gemini* keitykloje matoma, kad bitkoiną parduoti buvo pelningiausia 2020-05-21, o pirkti 2019-08-16.



25 pav. *Gemini* keityklos *in-degree* ir *out-degree*

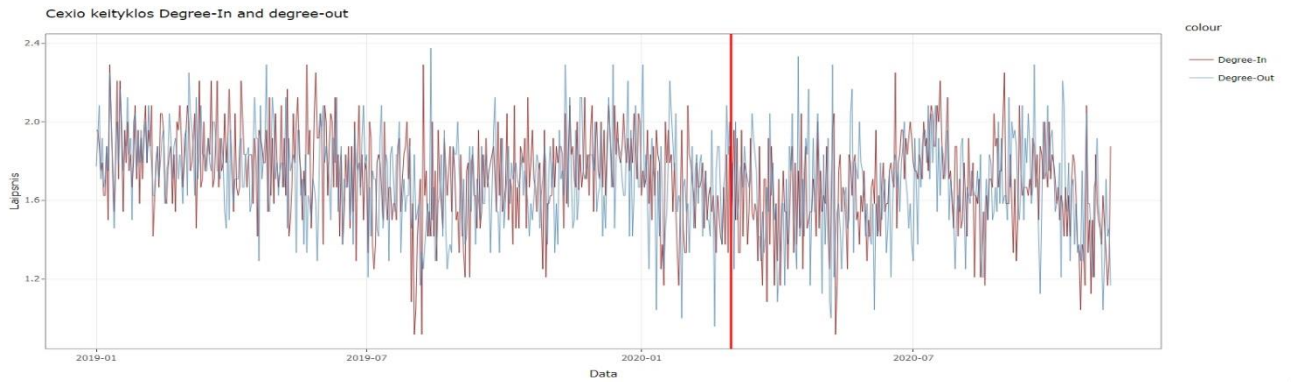
*Bitfinex* keitykloje pardavimas buvo palankiausias 2020-05-08 dieną, čia *in* rodiklio reikšmės vidurkis siekė 2,5. Didesnės *out* reikšmės pastebimos 2019-05-28 ir 2019-10-28 dienomis, taip pat matoma, kad 2019 metų gegužės 9 dieną bitkoino pelningai parduoti nebuvo galima.



26 pav. *Bitfinex* keityklos *in-degree* ir *out-degree*

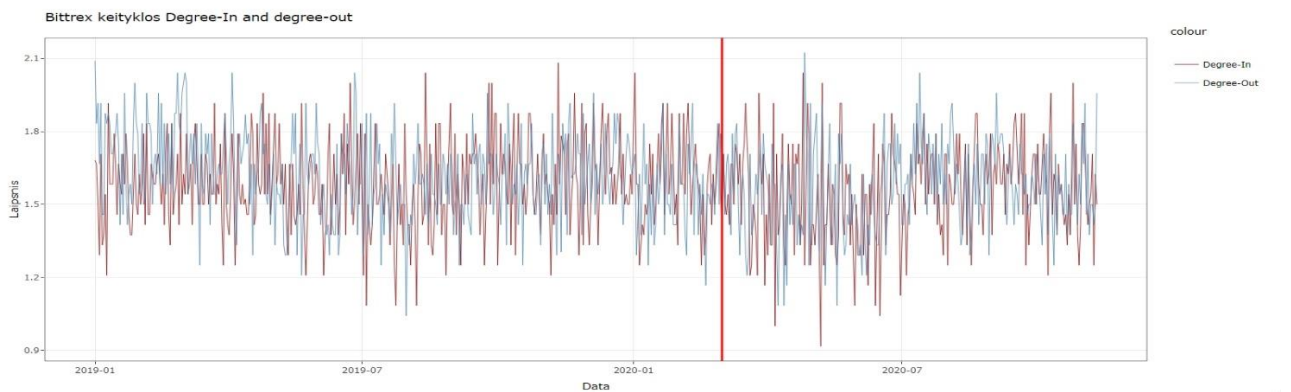
*Cexio* keitykloje galima matyti daugiau dienų kuomet buvo galima pelningai parduoti ar pirkti valiutą. Didžiausios *in* valiutų reikšmės matomos 2019 metų gegužės 22, rugpjūčio 8 ir 2020 metų birželio 19 ir rugpjūčio 31 dienomis. Dienų, kada palanku pirkti valiutą buvo daugiau – 2019 metų balandžio 25, rugpjūčio 13, lapkričio 11, gruodžio 13, 23, 2020 metų sausio 2,20, balandžio 15, gegužės 8, rugsėjo 20 ir spalio 9 dienomis. Visos paminėtos tiek *in*, tiek *out* reikšmės buvo didensės nei 2,2.





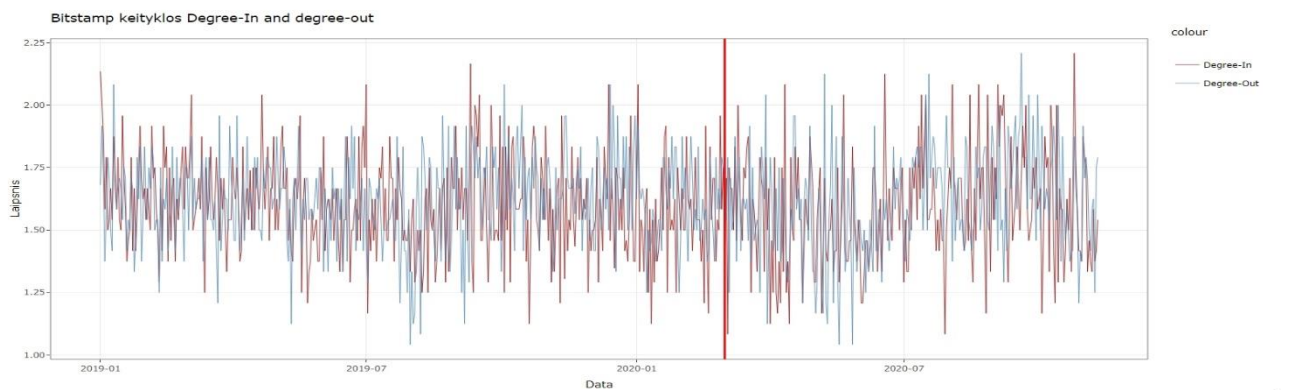
27 pav. Cexio keityklos *in-degree* ir *out-degree*

*Bittrex* keitykloje matoma, kad valiutas pirkti palanku buvo 2019 metų pirmame ketvirtyje, o parduoti pelninga 2019 metų rugpjūčio 13, lapkričio 11, 2020 metų sausio 2, gegužės 8 ir spalio 25 dienomis, tačiau nei viena reikšmė nebuvo pasiekusi didesnės nei 2,15 reikšmės kaip prieš tai nagrinėtoje *Cexio* keitykloje.



28 pav. Bittrex keityklos *in-degree* ir *out-degree*

*Bitstamp* keitykloje didesnis *in-degree* (virš 2) pastebimas 2019 metų vasario 6, rugsėjo 16, 25, lapkričio 22, 2020 metų sausio 2, gegužės 21 ir liepos 16 dienomis. Didžiausias *out-degree* rodiklis pastebimas tik vieną dieną – 2019 metų rugpjūčio 16 ir jis siekė 2,208, tik šią dieną rinka buvo patraukliausia valiutos pirkimui.



29 pav. Bitstamp keityklos *in-degree* ir *out-degree*

Taigi, apibendrinus *in* ir *out degree* rodiklius per visą laikotarpį matoma, kad didžiausias reikšmes turi *Bitfinex* ir *Cexio* keityklos, jose buvo palankiausia tiek pirkti, tiek parduoti bitkoiną. Taip pat matoma, kad visose keityklose 2019 metų rugpjūčio mėnesį matomas abiejų rodiklių sumažėjimas, o po COVID-19 pandemijos paskelbimo iš karto nuosmukio nebuvo, tačiau matoma, kad po gegužės mėnesio parodytų geresnių aplinkybių pirkti ar parduoti valiutas, birželio mėnesį visose keityklose pardavimas ir pirkimas turėjo sumažėti.

Kadangi *in* ir *out* reikšmės kito nepastoviai, buvo apskaičiuotas kiekvieno mėnesio vidurkio skirtumas tarp jų, tam, kad būtų galima išsiaiškinti keityklas, kuriose yra dažniausiai perkamas ir parduodamas bitkoinas. Žemiau lentelėje pateiktos gautų skirtumų reikšmės, kuriose gaunamas didžiausias ir mažiausias skirtumai, pilna lentelė pateikta prieduose. Skirtumai tarp valiutų buvo labai maži, didžiausias neigiamas skirtumas matomas keitykloje *Bittrex*, tai rodo, kad analizuojamu laikotarpiu didžiąją laiko dalį keitykloje palanku buvo bitkoiną pirkti. Kiek mažesnė reikšmė gauta keitykloje *Bitstamp*, tai rodo, kad šioje keitykloje taip pat buvo geriau bitkoiną pirkti, bet ne parduoti. *Gemini* keitykla 2019 metų sausio ir vasario mėnesiais turėjo didžiausius teigiamus skirtumus ir buvo ta birža, kurioje buvo pelningiausia parduoti bitkoiną, taip pat jos visų skirtumų suma buvo didžiausia, nors *Bitfinex* keitykla per visą laikotarpį turėjo mažiau neigiamų skirtumo reikšmių nei *Gemini*, tačiau jos skirtumų suma yra mažiausia, tad parduoti bitkoiną *Bitfinex* keitykloje taip pat buvo palanku. Tuo tarpu *Cexio* keitykloje bitkoiną geriausia buvo parduoti 2019 m. gegužės ir 2020 m. birželio mėnesiais.

7 lentelė. *In-degree* ir *out-degree* skirtumai

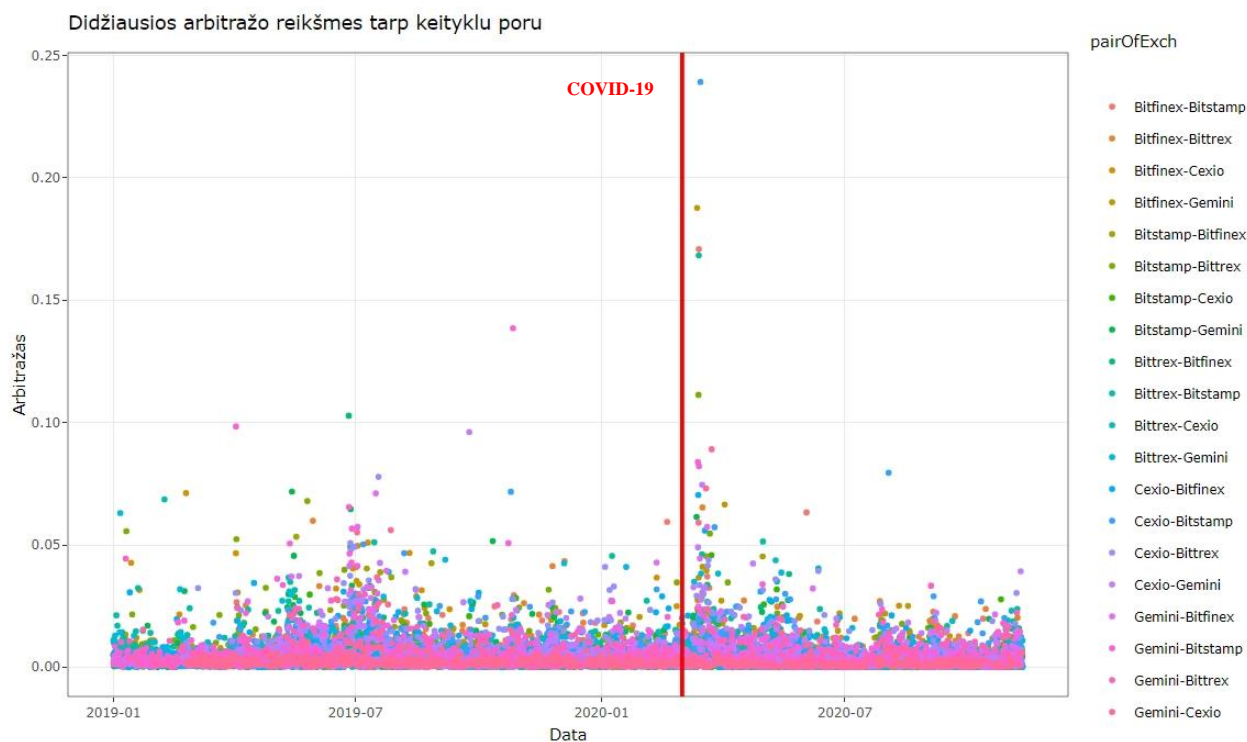
Data	Gemini			Bitfinex			Cexio			Bittrex			Bitstamp		
	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas
2019-01	1.7218	1.5673	0.1544	1.8399	1.8324	0.0076	1.8386	1.8704	-0.0318	1.5637	1.7261	-0.1624	1.6697	1.6376	0.0321
2019-07	1.5215	1.5376	-0.0161	1.6573	1.6465	0.0108	1.6653	1.6613	0.0040	1.4987	1.5605	-0.0618	1.5793	1.5161	0.0632
2019-09	1.6403	1.6056	0.0347	1.7167	1.8042	-0.0875	1.6653	1.6472	0.0181	1.6222	1.5875	0.0347	1.6486	1.6486	0.0000
2019-10	1.5941	1.6223	-0.0282	1.7957	1.7392	0.0565	1.6828	1.6747	0.0081	1.6075	1.5941	0.0134	1.6317	1.6815	-0.0497
2019-12	1.6718	1.5998	0.0719	1.7887	1.7915	-0.0027	1.8707	1.7633	0.1075	1.6151	1.6675	-0.0524	1.5798	1.7041	-0.1243
2020-01	1.5780	1.5874	-0.0094	1.7460	1.7070	0.0390	1.6425	1.6801	-0.0376	1.5995	1.5444	0.0551	1.5444	1.5914	-0.0470
2020-05	1.5175	1.5605	-0.0430	1.6478	1.5511	0.0968	1.5860	1.5941	-0.0081	1.4610	1.5296	-0.0685	1.4987	1.4758	0.0228
2020-06	1.5194	1.5736	-0.0542	1.5653	1.6458	-0.0806	1.7306	1.5736	0.1569	1.4861	1.5236	-0.0375	1.5486	1.5333	0.0153
2020-10	1.5981	1.5645	0.0336	1.6909	1.6250	0.0659	1.5390	1.6237	-0.0847	1.5712	1.5551	0.0161	1.5954	1.6263	-0.0309
Sumos	36.9632	36.2761	0.6871	39.9489	39.6528	0.2961	39.1728	38.8716	0.3012	36.1903	36.8616	-0.6713	36.5913	37.2043	-0.6130

Taigi, pagal gautus rezultatus galima matyti, kad bitkoiną parduoti buvo galima didesnėje dalyje keityklų, t.y. *Gemini*, *Bitfinex* ir *Cexio*. Bitkoino pirkimui labiau tinkamos keityklos buvo *Bittrex* ir *Bitstamp*.

### 3.5. Optimizavimo uždavinio rezultatai

Atlikus centrališkumo rodiklių analizę, kaip ir minėta metodikoje, buvo išsikeltas uždavinys, kurio tikslas yra išreitinguoti keityklas pagal arbitražo potencialą, susumuoti gautus rangus ir surasti tas keityklų poras, kurios sudarė didžiausius arbitražus per visą nagrinėjamą laikotarpį.

Pirmiausia buvo analizuojamos keityklų poros turėjusios didžiausius arbitražo potencialus, t.y. ieškoma didžiausia arbitražo reikšmė kiekvienoje matricoje, gaunama biržų pora ir laiko momentas, kada didžiausias arbitražo skirtumas yra užfiksuotas. Žemiau pavaizduotame grafike matoma, kad daugiausia maksimali arbitražo reikšmė vyrauja iki 2 %. Gautoje diagramoje matome, kad didžiausią arbitražą (23,9 %) 2020-03-15 sudarė keityklų pora *Cexio* ir *Bitstamp*. Įdomu pastebėti tai, kad didesni arbitražai susidarė po COVID-19 pandemijos paskelbimo. Taip pat, pagal 8 lentelėje gautus rezultatus, kuriuose pavaizduota kokią procentinę dalį sudarė maksimalias arbitražo reikšmes turėjusios poros, matoma, kad didžiausia dalis tenka porai *Cexio* ir *Bitfinex*, kas ir atsispindi grafike.



30 pav. Didžiausi arbitražai tarp keityklų porų

Pastebima, kad antrą keityklų porą sudaro tos pačios keityklos *Cexio* ir *Bitfinex*, tik šiuo atveju arbitražas susidaro kai bitkoinas yra parduodamas keitykloje *Cexio*. Taip pat 2, 3 ir 4 vietoje esančios poros parodo, kad bitkoinas *Cexio* keitykloje galėjo būti parduodamas pelningai perkant jį net iš 3 keityklų. Maža dalis maksimalių reikšmių susidarė kuomet bitkoinas yra perkamas keitykloje *Gemini*, jos pasikartojimų skaičius palyginus su pirma pora, yra 2,45 karto mažesnis.

8 lentelė. Didžiausią arbitražo potencialą turėjusios keityklų poros

Keityklų poros	Pasikartojimai, %	Vieta
Cexio/Bitfinex	8,52	1
Bitfinex/Cexio	7,75	2
Bitstamp/Cexio	6,46	3
Bittrex/Cexio	6,18	4
Cexio/Bittrex	5,85	5
Cexio/Gemini	5,65	6
Bittrex/Bitfinex	5,05	7
Cexio/Bitstamp	5,02	8
Gemini/Cexio	4,83	9
Bitstamp/Bitfinex	4,70	10
Bittrex/Bitstamp	4,45	11
Bittrex/Gemini	4,30	12
Bitstamp/Bittrex	4,25	13
Bitstamp/Gemini	4,22	14
Bitfinex/Bitstamp	4,19	15
Bitfinex/Gemini	3,97	16
Gemini/Bitfinex	3,85	17
Bitfinex/Bittrex	3,78	18
Gemini/Bittrex	3,49	19
Gemini/Bitstamp	3,48	20

Taip pat, keityklų poros buvo išreitinguotos nuo didžiausios iki mažiausios susidaranti arbitražo reikšmės, jų rangai susumuoti ir pavaizduoti žemiau esančioje lentelėje. Didžiausius arbitražus ir potencialą rodė keityklų pora *Bittrex* ir *Bitstamp*, nors ir prieš tai esančioje lentelėje ši pora buvo 11 vietoje pagal maksimalias arbitražo reikšmes, tačiau žemiau gauti rezultatai rodo, kad ji dažniausiai turėjo gana dideles arbitražo reikšmes ir potencialas jam susidaryti buvo didžiausias. Tas pats matoma ir su keityklų pora *Gemini* ir *Bitstamp*, nors ši pora buvo paskutinėje vietoje tačiau išlaikė aukštą arbitražo potencialą tarp kitų keityklų porų. Mažiausi arbitražai susidarydavo tarp keityklų porų *Bitstamp* ir *Bitfinex* bei *Gemini* ir *Bitfinex*, tai rodo, kad *Bitfinex* keitykloje gaunamas pelnas parduodant bitkoiną buvo pakankamai mažas.



9 lentelė. Išreitinguotos keityklų poros pagal arbitražo potencialą

Keityklų poros	Rangas pagal didžiausią arbitražą	Vieta
Bittrex/Bitstamp	35257	1
Gemini/Bitstamp	36264	2
Bittrex/Gemini	36410	3
Cexio/Bitfinex	37063	4
Gemini/Bittrex	37163	5
Bitstamp/Bittrex	38050	6
Cexio/Gemini	38276	7
Cexio/Bittrex	38876	8
Cexio/Bitstamp	39447	9
Bitstamp/Gemini	40842	10
Bitfinex/Cexio	43844	11
Bitfinex/Bitstamp	44015	12
Bitfinex/Gemini	44343	13
Bitfinex/Bittrex	44344	14
Bitstamp/Cexio	47309	15
Bittrex/Cexio	47451	16
Gemini/Cexio	48824	17
Bittrex/Bitfinex	49000	18
Bitstamp/Bitfinex	51387	19
Gemini/Bitfinex	51863	20

Taigi, pagal gautus rezultatus matoma, kad labiausiai rizikuoja ir sudaro didžiausius arbitražus keitykla *Cexio*, tačiau geriausius rangus pagal arbitražų dydžius turi keityklos *Bittrex* ir *Gemini*.

### 3.6. Lyginamoji rezultatų analizė

Lyginant gautus rezultatus su jau mokslininkų atliktais tyrimais reikia pastebėti, kad nebuvo išanalizuoti tyrimai, kurie tiria arbitražo galimybes kriptovaliutų rinkoje taikant grafų teoriją, tačiau buvo atliktų tyrimų, kurie analizuoja susidarantį arbitražą kriptovaliutų biržose bei apžvelgia situaciją rinkoje po COVID-19 pandemijos. Kaip ir buvo pastebėta A. Shynkevich'iaus (2020) straipsnyje arbitražo susidarymo galimybės tarp keityklų nuo 2018 metų sumažėjo, tas pastebima ir atlikus analizę nuo 2019 metų, arbitražo susidarymo galimybė yra palyginus labai maža. Taip pat vertinant COVID-19 padarinius, matoma, kad staigus kainų pokytis, kuris, anot J. Johnson'o (2020), judėjo kartu su akcijų rinka, lėmė didesnių arbitražo galimybių susidarymą, tačiau, ryškėjant bitkoino nepriklausomybei nuo ekonominiu sąlygų ir atsirandant naujoms investicijoms ir atsiskaitymo bitkoinu galimybėms, arbitražo susidarymas stabilizavosi ir išliko panašus kaip ir prieš pandemiją. Įvertintos Q. Ji, E. Bouri, L. Kristoufek ir B. Lucey (2021) bitkoino keityklos lyderės – *Bitstamp*,

*Cexio* ir *Gemini*, kurios labiausiai prisideda prie kainų nepastovumo, gautos ir potencialių keityklų analizėje, kurioje matoma, kad *Cexio* ir *Bitstamp* keityklos patenka į didžiausių arbitražo galimybių susidarymo poras.

## Išvados

1. Mokslinės literatūros analizė parodė, kad bitkoinas reikšmingai siejasi su kitomis valiutomis, jo apimtys yra labai susijusios su regionais, kuriuose pardavimai yra didžiausi. Nagrinėjant bitkoino reakciją į COVID-19, nustatyta, kad pradžioje pandemijos bitkoino rinka nebuvo saugus prieglobstis investuotojams, tačiau pradėjus ją vertinti kaip investiciją nepaisant nuosmukių pasaulyje, bitkoino kaina kilo. Arbitražo galimybių analizė parodė, kad didesnis arbitražas susidaro esant mainams tarp kriptovaliutos ir grynos valiutos. Grafų teorijos centrališkumo rodikliai buvo daugiau naudojami akcijų rinkos ir sisteminės rizikos vertinimui.
2. Duomenų rinkinį sudarė JAV ir JK rinkos keityklos: *Gemini*, *Bitstamp*, *Bitfinex*, *Bittrex* ir *Cexio*. Apžvelgta bitkoino kainų dinamika laike visose biržose parodė, kad 2019 metų pradžioje didesni skirtumai matomi keityklose *Cexio* ir *Bitfinex*, toliau kainos yra labai panašios ir skiriasi nedaug, tai patvirtino ir kainų skirtumus išryškino slenkanti koreliacinė analizė, koreliacijos reikšmės nėra lygios absoliučiam vienetui ir yra didesnės nei 0,95, tai parodo ir stiprų ryšį tarp kainų.
3. Atliktas arbitražo apskaičiavimas pagal A. Shynkevich (2020) pasiūlytą metodiką parodė, kad didžiausi arbitražo vidurkiai gauti tarp *Cexio* ir *Bitstamp* keityklų, tačiau susidaranti teigiamo arbitražo dalis svyruoja nuo 35 iki 45 procentų.
4. Centrališkumo rodiklių analizė parodė, kad keityklos neturi ryškios arbitražo susidarymo priklausomybės nuo savaitės dienų. Atlikus analizę laike, matoma, kad palankiausia keitykla bitkoino pirkimui, tam, kad realizuotume arbitražą, buvo *Cexio*, kurios *Hub* rodiklis visu laikotarpiu išliko pakankamai aukštas – 0,47, kitų keityklų atžvilgiu didesnis 4,3 %. Atitinkamai palankiausia keitykla realizuoti arbitražą, joje parduodant bitkoiną, buvo *Gemini*, kurios *Authority* rodiklis išliko pastovus ir 3,85 % didesnis palyginus su kitomis keityklomis. Tokia atlikta analizė bitkoino pirkėjams/pardavėjams parodo, kuriose keityklose perkant ar parduodant bitkoiną yra labiausiai tikėtina gauti pelno. Vertinant keityklų susietumą - skaičiuojant *in-degree* ir *out-degree* rodiklius, matoma, kad išsiskiria dvi keityklos – *Cexio* ir *Bitfinex*, jose daugiausia buvo tiek įsigyta, tiek parduodama bitkoino. Įvertinus skirtumus tarp *in-degree* ir *out-degree*, matoma, kad bitkoinas perkamas buvo daugiau keityklose *Bittrex* ir *Bitstamp*, o parduodamas – *Gemini*, *Bitfinex* ir *Cexio*.
5. Atlikus arbitražo potencialo analizę dažniausiai didžiausias arbitražas susidaro tarp *Cexio* ir *Bitfinex* keityklų – pasikartojimų skaičius sudaro 8,52 %, išreitingavus keityklų poras pagal arbitražo dydį, matoma, kad didžiausią potencialą arbitražui susidaryti parodė keityklų pora *Bittrex* ir *Bitstamp*, jos rangas yra geriausias – skiriasi nuo 1000 iki 16 000.
6. Vertinant COVID-19 situaciją didesnių arbitražo susidarymo galimybių nuosmukių nebuvo ir tiek pardavimui tiek pirkimui tarp keityklų pandemija didelės įtakos neturėjo. Tačiau susidarantis arbitražas po pandemijos paskelbimo buvo didesnis nei įprastai – tarp *Cexio* ir *Bitstamp* keityklų jis siekė 23,9 %, ir tai yra 133 kartus didesni arbitražas nei jo vidurkis tarp šių porų, nes bitkoino kainos kito labai greitai – nuo kovo 8 iki kovo 16 dienos kaina krito 40 %, vėliau rinka stabilizavosi.

## Literatūros saraksts

1. *Cryptocurrencies – statistics & facts*. 2021. Prieiga per: <https://www.statista.com/>
2. CHOHAN, U.W. A History of Bitcoin. *SSRN Electronic Journal* . 2017, ISSN 1556-5068 DOI:10.2139/ssrn.3047875
3. *Bitcoin*. 2021. Prieiga per: <https://www.cryptocurrencychart.com/coin/BTC>
4. GANDAL, N. et al. Competition in the Cryptocurrency Market. *CEifo Working Paper Series No. 4980*. 2014 <https://ssrn.com/abstract=2506577>
5. <https://www.cryptimi.com/guides/how-many-cryptocurrency-exchanges-are-there>
6. <https://coinmarketcap.com/all/views/all/>
7. LIU, J. - SERLETIS, A. Volatility in the Cryptocurrency Market. *Open Economies Review* . 2019, 30(4), 779–811. ISSN 1573708X DOI:10.1007/s11079-019-09547-5.
8. *Dead Coins*. 2021 [žiūrēta 2021-05-15]. Prieiga per: <https://99bitcoins.com/deadcoins/>
9. DWYER, G.P. The Economics of Private Digital Currency. *SSRN Electronic Journal* . 2014, DOI:10.2139/ssrn.2434628.
10. <https://www.cnn.com/2021/04/13/bitcoin-hits-new-all-time-high-above-62000-ahead-of-coinbase-debut.html>
11. SEGENDORF, B. What is Bitcoin?. *Sveriges Riskbank Economic Review*. 2014, pp. 71-87. [http://archive.riksbank.se/Documents/Rapporter/POV/2014/2014\\_2/rap\\_pov\\_1400918\\_eng.pdf#page=73](http://archive.riksbank.se/Documents/Rapporter/POV/2014/2014_2/rap_pov_1400918_eng.pdf#page=73)
12. *Bitcoin*. 2021. Prieiga per: <https://www.coindesk.com/price/bitcoin>
13. CARRICK, J. Bitcoin as a Complement to Emerging Market Currencies. *Emerging Markets Finance and Trade* . 2016, 52(10), 2321–2334. ISSN 15580938 DOI:10.1080/1540496X.2016.1193002.
14. *Introduction to the Fundamentals of Vector Autoregressive Models*. 2021. Prieiga per: <https://www.aptech.com/blog/introduction-to-the-fundamentals-of-vector-autoregressive-models/>
15. CHEN, Y. et al. Lead behaviour in bitcoin markets. *Risks* . 2020, 8(1), 4. ISSN 22279091 DOI:10.3390/risks8010004.
16. *Mt. Gox*. 2021. Prieiga per: <https://www.investopedia.com/terms/m/mt-gox.asp>
17. BRANDVOLD, M. et al. Price discovery on Bitcoin exchanges. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money* . 2015, 3618–35.
18. CHEN, S. et al. Tracking the Economic Impact of COVID-19 and Mitigation Policies in Europe and the United States. *IMF Working Paper*. 2020. ISSN 1018-5941
19. CHEN, C. et al. Fear Sentiment, Uncertainty, and Bitcoin Price Dynamics: The Case of COVID-19. *Emerging Markets Finance and Trade*. 56:10, 2298-2309. 2020. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2020.1787150>
20. GOODELL, J.W. - GOUTTE, S. Co-movement of COVID-19 and Bitcoin: Evidence from wavelet coherence analysis. *Finance Research Letters* . 2021, 38101625.
21. HUANG, Y. et al. Is Bitcoin really more than a diversifier? A pre- and post-COVID-19 analysis. *Finance Research Letters* . 2021, 102016.

22. JOHNSON, J. The Impact of COVID-19 on Bitcoin Trading Activity: A Preliminary Assessment. *SSRN Electronic Journal* . 2020, ISSN 1556-5068 DOI:10.2139/ssrn.3583162.
23. *Bitcoin: why the price has exploded – and where it goes from here*. 2021. Prieiga per: <https://theconversation.com/bitcoin-why-the-price-has-exploded-and-where-it-goes-from-here-152765>
24. SHYNKEVICH, A. Bitcoin arbitrage. *Finance Research Letters* . 2020, 40101698.
25. MAKAROV, I. et al. Trading and Arbitrage in Cryptocurrency Markets. *Journal of Financial Economics*, pp. 293-319, 2018.
26. BISTARELLI, S. et al. Is arbitrage possible in the bitcoin market? (Work-In-Progress Paper). *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* . [s.l.]: Springer Verlag, 2019. p. 243–251. ISSN 16113349 DOI:10.1007/978-3-030-13342-9\_21.
27. PIETERS, G. et al. Bitcoin arbitrage and unofficial exchange rates. 2015. <http://www.ginapieters.com/uploads/1/0/2/8/10288430/bitcoin.pdf>
28. GROSS J. L., YELLEN J. Graph Theory and Its Applications. 2006. ISBN 978-1482249484
29. KHEYRKHAH, A. et al. Using the Theory of Network in Finance. *International Journal of Finance and Managerial Accounting Vol. 1, No. 2, Summer*. 2016 [https://journals.srbiau.ac.ir/article\\_9527\\_82eb20cb68be90b6482c1f30a2749db0.pdf](https://journals.srbiau.ac.ir/article_9527_82eb20cb68be90b6482c1f30a2749db0.pdf)
30. DURCHEVA, M. - TSANKOV, P. Analysis of similarities between stock and cryptocurrency series by using graphs and spanning trees. *AIP Conference Proceedings* . [s.l.]: American Institute of Physics Inc., 2019. p. 90004. ISSN 15517616 DOI:10.1063/1.5133581.
31. HUANG, W.Q. et al. A financial network perspective of financial institutions' systemic risk contributions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 2016, 456183–196.
32. KUZUBAŞ, T.U. et al. Network centrality measures and systemic risk: An application to the Turkish financial crisis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 2014, 405203–215.
33. ESMAEILPOUR MOGHADAM, H. et al. Complex networks analysis in Iran stock market: The application of centrality. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* . 2019, 531121800.
34. JI, Q. et al. Realised volatility connectedness among Bitcoin exchange markets. *Finance Research Letters* . 2021, 38101391.
35. *Tidy Time Series Analysis, Part 3: The Rolling Correlation*. 2017. Prieiga per: <https://www.r-bloggers.com/2017/07/tidy-time-series-analysis-part-3-the-rolling-correlation/>
36. KABAŠINSKAS, A. - ŠUTIENĖ, K. Key Roles of Crypto-Exchanges in Generating Arbitrage Opportunities. *Entropy* . 2021, 23(4), 455. ISSN 10994300 DOI:10.3390/e23040455.

## Priedai

### 1 priedas. Skirtumai tarp *in* ir *out* reikšmių

Data	Gemini			Bitfinex			Cexio			Bittrex			Bitstamp		
	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas	IN	OUT	Skirtumas
2019-01	1.7218	1.5673	0.1544	1.8399	1.8324	0.0076	1.8386	1.8704	-0.0318	1.5637	1.7261	-0.1624	1.6697	1.6376	0.0321
2019-02	1.6860	1.5625	0.1235	1.8036	1.8304	-0.0268	1.8244	1.8140	0.0104	1.5982	1.7366	-0.1384	1.6354	1.6042	0.0313
2019-03	1.6519	1.5914	0.0605	1.7944	1.7930	0.0013	1.8777	1.8347	0.0430	1.5968	1.7043	-0.1075	1.6277	1.6250	0.0027
2019-04	1.6272	1.6371	-0.0099	1.8639	1.7938	0.0700	1.8011	1.8068	-0.0056	1.5952	1.6665	-0.0713	1.6524	1.6356	0.0168
2019-05	1.5901	1.5941	-0.0040	1.6922	1.7661	-0.0739	1.8414	1.6949	0.1465	1.5699	1.5833	-0.0134	1.5712	1.6263	-0.0551
2019-06	1.5833	1.5972	-0.0139	1.7319	1.7083	0.0236	1.7556	1.7750	-0.0194	1.5847	1.5681	0.0167	1.5917	1.5986	-0.0069
2019-07	1.5215	1.5376	-0.0161	1.6573	1.6465	0.0108	1.6653	1.6613	0.0040	1.4987	1.5605	-0.0618	1.5793	1.5161	0.0632
2019-08	1.5981	1.5323	0.0659	1.6747	1.6895	-0.0148	1.5968	1.5659	0.0309	1.5403	1.5699	-0.0296	1.5228	1.5753	-0.0524
2019-09	1.6403	1.6056	0.0347	1.7167	1.8042	-0.0875	1.6653	1.6472	0.0181	1.6222	1.5875	0.0347	1.6486	1.6486	0.0000
2019-10	1.5941	1.6223	-0.0282	1.7957	1.7392	0.0565	1.6828	1.6747	0.0081	1.6075	1.5941	0.0134	1.6317	1.6815	-0.0497
2019-11	1.6415	1.6090	0.0325	1.7940	1.7639	0.0301	1.7979	1.7627	0.0351	1.6213	1.6318	-0.0106	1.5649	1.6521	-0.0872
2019-12	1.6718	1.5998	0.0719	1.7887	1.7915	-0.0027	1.8707	1.7633	0.1075	1.6151	1.6675	-0.0524	1.5798	1.7041	-0.1243
2020-01	1.5780	1.5874	-0.0094	1.7460	1.7070	0.0390	1.6425	1.6801	-0.0376	1.5995	1.5444	0.0551	1.5444	1.5914	-0.0470
2020-02	1.6307	1.5560	0.0747	1.7213	1.7658	-0.0445	1.6250	1.6624	-0.0374	1.6106	1.5718	0.0388	1.5819	1.6135	-0.0316
2020-03	1.6102	1.5605	0.0497	1.7083	1.7043	0.0040	1.5793	1.6532	-0.0739	1.5591	1.5632	-0.0040	1.6089	1.5847	0.0242
2020-04	1.5361	1.5347	0.0014	1.6764	1.6042	0.0722	1.5833	1.6236	-0.0403	1.5347	1.5083	0.0264	1.5083	1.5681	-0.0597
2020-05	1.5175	1.5605	-0.0430	1.6478	1.5511	0.0968	1.5860	1.5941	-0.0081	1.4610	1.5296	-0.0685	1.4987	1.4758	0.0228
2020-06	1.5194	1.5736	-0.0542	1.5653	1.6458	-0.0806	1.7306	1.5736	0.1569	1.4861	1.5236	-0.0375	1.5486	1.5333	0.0153
2020-07	1.6559	1.5981	0.0578	1.7769	1.7446	0.0323	1.8427	1.7446	0.0981	1.5793	1.6478	-0.0685	1.5914	1.7110	-0.1196
2020-08	1.5591	1.5874	-0.0282	1.7339	1.7003	0.0336	1.6532	1.6331	0.0202	1.5806	1.6008	-0.0202	1.6384	1.6438	-0.0054
2020-09	1.6847	1.6056	0.0792	1.7333	1.7292	0.0042	1.7028	1.7667	-0.0639	1.6361	1.6208	0.0153	1.7042	1.7389	-0.0347
2020-10	1.5981	1.5645	0.0336	1.6909	1.6250	0.0659	1.5390	1.6237	-0.0847	1.5712	1.5551	0.0161	1.5954	1.6263	-0.0309
2020-11	1.5458	1.4917	0.0542	1.7958	1.7167	0.0792	1.4708	1.4458	0.0250	1.5583	1.6000	-0.0417	1.4958	1.6125	-0.1167
<b>Sumos</b>	<b>36.9632</b>	<b>36.2761</b>	<b>0.6871</b>	<b>39.9489</b>	<b>39.6528</b>	<b>0.2961</b>	<b>39.1728</b>	<b>38.8716</b>	<b>0.3012</b>	<b>36.1903</b>	<b>36.8616</b>	<b>-0.6713</b>	<b>36.5913</b>	<b>37.2043</b>	<b>-0.6130</b>