



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ
ČVUT V PRAZE**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Název: Arbitrážní příležitosti kryptoměn
Student: Čeněk Žid
Vedoucí: Mgr. Jan Starý, Ph.D.
Studijní program: Informatika
Studijní obor: Znalostní inženýrství
Katedra: Katedra aplikované matematiky
Platnost zadání: Do konce letního semestru 2020/21

Pokyny pro vypracování

- 1) Zjistěte, do jaké míry jsou dostupná historická data z kryptoměnových burz.
- 2) Implementujte sběr dat na úrovni order book jednotlivých měnových párů a ukládejte tato data v nějakém vhodném formátu.
- 3) Najděte a analyzujte v těchto datech arbitrážní příležitosti.
- 4) Spočítejte základní statistiky výskytu, obchodovatelnosti a výnosnosti arbitrážních trojúhelníků.
- 5) Implementaci proveďte v jazyce Python s využitím dostupných modulů.
- 6) Aplikaci řádně otestujte a zdokumentujte.

Seznam odborné literatury

Dodá vedoucí práce.

Ing. Karel Klouda, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. RNDr. Ing. Marcel Jiřina, Ph.D.
děkan

V Praze dne 5. února 2020



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNologiÍ
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

Arbitrážní příležitosti kryptoměn

Čeněk Žid

Katedra aplikované matematiky
Vedoucí práce: Mgr. Jan Starý, Ph.D.

2. června 2020

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Mgr. Janu Starému, Ph.D. za vedení, odbornou pomoc, konzultace a cenné rady v průběhu tvorby této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval svojí rodině a svým blízkým za podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené.

V Praze dne 2. června 2020

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta informačních technologií

© 2020 Čeněk Žid. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Žid, Čeněk. *Arbitrážní příležitosti kryptoměn*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2020.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou arbitrážních příležitostí. Rešeršní část práce se zaměřuje na problematiku Bitcoinu, jeho historii, technologie a základní principy. Dále práce popisuje rozdíly mezi několika kryptoměnovými burzami a rozebírá různé druhy arbitrážních příležitostí.

Praktická část práce pokračuje výběrem nejvhodnější burzy, problematikou dostupností a sběru dat a jejich následným zpracováním.

Analytická část se s pomocí tabulek a grafů, vytvořených z reálných dat, zabývá základními statistikami výskytu a výnosnosti trojúhelníkových arbitrážních příležitostí. Statistiky jsou následně vyhodnoceny a jsou vybrány nejvýnosnější trojúhelníky.

Klíčová slova kryptoměna, analýza dat, arbitrážní příležitost, kryptoměnová burza, Python, Matplotlib, C++

Abstract

This thesis deals with the analysis of arbitrage opportunities. The research part focuses on basic principles of Bitcoin, its technologies and history. It also describes the differences among several cryptocurrency exchanges and analyses various types of cryptocurrency arbitrage.

The practical part of the thesis follows up with a selection of a suitable cryptocurrency exchange. Exchange data availability, acquisition and processing are addressed in the next part.

The analytic part presents the statistics of occurrence and profitability of the triangle arbitrage opportunities. These are presented as tables and charts created from the collected data. The most profitable triangles are isolated and analysed in detail.

Keywords cryptocurrency, data analysis, arbitrage opportunity, cryptocurrency exchange, Python, Matplotlib, C++

Obsah

Úvod	1
1 Cíl práce	3
2 Současný stav řešení problému	5
2.1 Kryptoměny	5
2.1.1 Bitcoin - BTC	5
2.1.1.1 Blockchain	6
2.1.1.2 Těžení	6
2.1.1.3 Transakce	6
2.1.2 Altcoiny	7
2.1.2.1 Litecoin - LTC	7
2.1.2.2 Ethereum - ETH	7
2.1.2.3 Monero - XMR	8
2.1.2.4 Ripple - XRP	8
2.1.2.5 Ostatní zpracovávané altcoiny	9
2.2 Kryptoměnové burzy	9
2.2.1 Coinmate	9
2.2.2 Binance	11
2.2.3 MXC	12
2.2.4 BitForex	12
2.2.5 LBank	13
2.3 Arbitrážní příležitosti	13
2.3.1 Efektivita trhu	13
2.3.2 Arbitráž	14
2.3.3 Arbitráže na forexových trzích	14
2.3.4 Arbitráže v rámci kryptoměnových burz	14
2.3.5 Měnový pár v rámci kryptoměnových burz	15
2.3.6 Deterministické arbitrážní příležitosti	15

2.3.7	Trojúhelníkové arbitrážní příležitosti	15
2.3.8	Problémy s vydáváním na arbitrážních příležitostech .	16
3	Realizace	17
3.1	Získání dat	17
3.1.1	Data na kryptoměnových burzách	17
3.1.2	Vlastní sběr dat	18
3.1.3	Výběr burzy	18
3.1.4	Burza Binance	18
3.1.5	Sběr dat	19
3.1.5.1	Kontrola správnosti dat	19
3.1.5.2	Sledované měny a trojúhelníky	20
3.2	Zpracování dat	21
3.2.1	Filtrování surových dat	21
3.2.1.1	Struktura filtrovaných dat	21
3.2.2	Arbitrážní příležitosti	22
3.2.2.1	Detekce trojúhelníkové arbitrážní příležitosti .	23
3.2.2.2	Nejužší místo v arbitrážní příležitosti	25
3.2.2.3	Reálný příklad arbitrážní příležitosti	25
3.2.2.4	Reálná detekce arbitrážní příležitosti	26
3.2.2.5	Příklad výskytu a jeho detekce	27
3.2.3	Kontrola dat	28
3.2.3.1	Kontrola korektnosti záznamů	28
3.2.3.2	Kontrola pozitivních arbitrážních příležitostí .	30
3.2.3.3	Problém s duplicitami	30
3.3	Struktura modulů praktické části	30
3.3.1	Sběr dat	31
3.3.2	Čištění dat	31
3.3.3	Selekce trojúhelníků	31
3.3.4	Statistiky na trojúhelnících	31
4	Analýza dat	33
4.1	Selekce nejlepších trojúhelníků	33
4.1.1	Základní statistiky trojúhelníků	33
4.2	Korelace mezi výskytem arbitrážních příležitostí a vnějšími jevy	37
4.2.1	Závislost na dni v týdnu	37
4.2.2	Závislost na denní hodině	37
4.2.3	Závislost na počtu provedených transakcí	39
4.2.4	Závislost na počtu obecných neefektivit trhu	39
4.3	Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků	41
4.3.1	Selekce	41
4.3.2	Bližší statistiky	41
4.3.2.1	Trojúhelník USDT/EOS/BNB	41
4.3.2.2	Trojúhelník USDT/BTC/EOS	42

4.3.2.3	Trojúhelník USDT/BNB/XMR	45
4.3.2.4	Trojúhelník USDT/BTC/TRX	45
4.3.2.5	Trojúhelník USDT/BTC/XRP	47
4.3.2.6	Trojúhelník USDT/BTC/BCH	47
4.3.3	Zhodnocení nejlepších trojúhelníků	50
Závěr		53
Bibliografie		55
A Seznam použitých zkratk		59
B Obsah přiloženého CD		61

Seznam obrázků

2.1	Poplatky na burze Coinmate pro maker i taker [25]	10
2.2	Poplatky na burze Coinmate pro maker i taker [25]	11
3.1	Ukázka CSV souboru jednoho dne dat dvojice kryptoměn	19
3.2	Ukázka JSON formátu struktury dat	22
3.3	Distribuce indexů obsahující nejlepší hodnoty pro získání nejvyššího absolutního zisku v rámci arbitrážní příležitosti	24
3.4	Trojúhelníková arbitráž	26
4.1	Celkový průměr procentuální neefektivity jednotlivých trojúhelníků (se zahrnutím poplatků)	34
4.2	Rozložení arbitrážních příležitostí v závislosti na dni v týdnu . . .	38
4.3	Rozložení arbitrážních příležitostí v jednotlivých sledovaných dnech	38
4.4	Rozložení arbitrážních příležitostí v závislosti na hodině výskytu .	39
4.5	Vývoj rozložení výskytu arbitrážních příležitostí, neefektivit trhu a celkového počtu provedených transakcí po jednotlivých dnech . .	40
4.6	Vývoj rozložení výskytu arbitrážních příležitostí a neefektivit trhu po jednotlivých dnech	40
4.7	Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/EOS/BNB	43
4.8	Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/EOS .	44
4.9	Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BNB/XMR	46
4.10	Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/TRX	47
4.11	Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/XRP	48
4.12	Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/BCH	49
4.13	Srovnání vývoje denního výskytu arbitrážních příležitostí na nejlepších trojúhelnících	51

Seznam tabulek

2.1	Výběrové poplatky na burze Binance [27]	12
2.2	Výběrové poplatky na burze MXC [30]	13
2.3	Výběrové poplatky na burze BitForex [32]	14
3.1	Porovnání parametrů jednotlivých burz	18
3.2	Příklad k postupné kontrole na pozitivní arbitrážní příležitosti	27
3.3	Hodnoty adekvátní časové prodlevy pro jednotlivé měnové páry	29
4.1	Porovnání denních průměrů a průměrné denní % neefektivity	35
4.2	Potenciální výnosy na jednotlivých trojúhelnících	36
4.3	Kurzy využité k přepočtu na americké dolary (údaj z burzy Binance ze dne 13.4.2020)	37
4.4	Průměrné hodnoty arbitrážních příležitostí na nejlepších trojúhelnících	42
4.5	Základní statistiky trojúhelníku USDT/EOS/BNB	43
4.6	Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/EOS	44
4.7	Základní statistiky trojúhelníku USDT/BNB/XMR	45
4.8	Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/TRX	46
4.9	Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/XRP	48
4.10	Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/BCH	49

Úvod

V této práci se zabývám arbitrážními příležitostmi kryptoměn. Jedná se o téma v dnešní době velmi aktuální a moderní. Za posledních několik let vzniklo velké množství kryptoměn a žádná z nich není stabilní. Díky této volatilitě na burzách s kryptoměnami vzniká velké množství arbitrážních příležitostí, jejichž analýze se v této práci věnuji.

Význam této práce spočívá v analýze jednotlivých burz jako takových. Práce se dále zabývá otázkami, jak často se reálně objevují arbitrážní příležitosti, jak dlouho trvá, než tyto příležitosti zmizí, a jestli je možné nacházet arbitrážní příležitosti v rámci vybrané burzy.

Téma své práce jsem vybral především proto, že se rád zabývám analýzou dat a hledáním výstupů, které je z dat možné získat. Také proto, že dat týkajících se kryptoměn je na internetu k dispozici velké množství, jsou jednoduše dostupná a dají se na nich zjistit zajímavé výstupy. Výhodou arbitrážních příležitostí je to, že se jedná o transakce víceméně bez rizika, na rozdíl od klasického obchodování s kryptoměnami, kde je většinou riziko velké a o jistotě se mluvit nedá. Z toho důvodu mi připadá velice zajímavé tyto arbitráže zkoumat podrobněji.

V práci se zabývám dostupností dat v rámci jednotlivých kryptoměnových burz a možnostmi ukládání těchto dat. Dále se v práci zabývám analýzou dat a analýzou výskytů korelací, které v rámci vybrané burzy nastávají.

V první části práce se věnuji tomu, co to jsou kryptoměny a co znamenají arbitrážní příležitosti. V následující části se věnuji zkoumání dostupnosti dat na jednotlivých burzách a možnostem jejich získávání. Na to navazuji analýzou získaných dat z pohledu arbitrážních příležitostí. Zabývám se zde převážně otázkami, jak často arbitrážní příležitosti nastávají a jestli je reálně možné a vyplatí se arbitrážní příležitosti vytěžovat.

Tato bakalářská práce volně navazuje na diplomovou práci Adama Pečeva s tématem Cryptocurrencies Exchange Rates Reporting Tool, ve které autor vytvořil program, který zobrazuje data jednotlivých kryptoměn na různých trzích. Já se na rozdíl od něho více zaměřuji na analýzu dat.

Cíl práce

Hlavním cílem této práce je najít a zanalyzovat arbitrážní příležitosti na historických datech z kryptoměnových burz a spočítat statistiky výskytu, obchodovatelnosti a výnosnosti.

V teoretické části se zaměřím na to, kde je možné historická data týkající se kryptoměn najít a získat. Popíšu zde, co jsou to kryptoměny a arbitrážní příležitosti. Dále se budu zabývat rozdíly mezi kryptoměnovými burzami a budu se věnovat výběru té nejvhodnější.

V praktické části naimplementuji sběr dat na úrovni order book jednotlivých měnových párů z vybrané kryptoměnové burzy. Dále na těchto datech provedu analýzu pomocí matematických a informatických metod.

V závěru praktické části zhodnotím výsledky z analýzy dat. Z vyhodnocených výsledků spočítám základní statistiky výskytu, obchodovatelnosti a výnosnosti trojúhelníkových arbitrážních příležitostí.

Současný stav řešení problému

V této kapitole se zabývám teorií týkající se kryptoměn, popisují základní funkcionalitu transakcí a technologie blockchainu. Mapuji jednotlivé kryptoměnové burzy. Zaměřuji se na arbitráže, o co se jedná, jaké jsou její druhy a jak se projevují na poli kryptoměnových burz.

2.1 Kryptoměny

V této podkapitole se obecně zabývám kryptoměnami, jejich historií, která je spjatá převážně s první a nejhodnotnější kryptoměnou, kterou je Bitcoin. Zabývám se zde také alternativními kryptoměnami a technologiemi, na kterých jsou kryptoměny založeny. [1]

2.1.1 Bitcoin - BTC

Bitcoin je první kryptoměna, která byla zavedena v roce 2009 anonymní skupinou lidí pod pseudonymem Satoshi Nakamoto. Hlavní myšlenkou Bitcoinu je snaha o odstranění všech regulatorních vlastností měn a snaha o zvýšení transparentnosti a bezpečnosti plateb a transakcí v rámci bitcoinové sítě. [2]

Hlavní charakteristikou Bitcoinu je, že nemá žádnou centrální autoritu (například pro českou korunu je centrální autoritou Česká národní banka). Z toho plyne, že s ním nikdo nemůže manipulovat tak, jako s běžnými měnami.

Jednou z předních výhod je to, že transakce trvají řádově desítky minut, což v porovnání s bankami je v průměru rychlejší. Bitcoin také není možné zfalšovat, neboť je vše naprosto transparentně uloženo v blockchainu.

Na druhou stranu má Bitcoin i řadu nevýhod oproti běžným měnám, které také vyplývají z toho, že nemá žádnou centrální autoritu. Jednou z hlavních nevýhod je to, že je velice nestabilní oproti běžným měnám a v žádnou chvíli nelze s velkou pravděpodobností předpovídat, jak se bude jeho hodnota vyvíjet. [2]

2.1.1.1 Blockchain

Bitcoin je založen na technologii blockchainu. Blockchain je možné si představit jako veřejně sdílenou účetní knihu, ve které jsou zachyceny veškeré transakce, které kdy proběhly. Konkrétně se jedná o distribuovanou decentralizovanou databázi, která uchovává chronologický řetězec záznamů. Principem je, že tato data jsou v blockchainu uchována napořád a jsou veřejně dostupná pro všechny, tudíž není možné je jakkoliv změnit nebo zfalšovat. [3]

Základní myšlenkou blockchainu je absence jakékoliv centrální autority (například banky). Z toho důvodu není možné s ním nijak centrálně manipulovat ani jakkoliv ovlivňovat jeho historii. Blockchain se skládá ze dvou druhů záznamů, z transakcí a z bloků. Transakce jsou tvořeny uživateli, kteří chtějí například převádět kryptoměnu. Bloky tyto transakce potvrzují, shromažďují a řadí do chronologické posloupnosti. [4]

2.1.1.2 Těžení

Těžení je velmi důležitým procesem v rámci blockchainu. Nové bloky jsou přidávány periodicky (většinou každých několik minut). Těžaři v rámci těžení přidávají jednotlivé transakce do následujícího bloku. Veškeré transakce, které jsou do bloku přidány, jsou tímto procesem potvrzeny.

Těžení je jakási soutěž mezi všemi těžaři, ve které se každý snaží uspět s cílem získání odměny za vytěžení daného bloku v součtu s poplatky z přidáných transakcí do blockchainu.

Těžení zajišťuje také bezpečnost blockchainu, neboť těžení je matematicky velmi náročný proces a jakýkoliv pokus o zfalšování původních dat se stává s každým blokem o poznání náročnější. [5]

2.1.1.3 Transakce

Transakce je převod peněz z jedné adresy na jinou. Tyto transakce jsou volně předávány od uzlu k uzlu. Těžaři se současně snaží vytvořit blok, který se zajistí o to, aby byly transakce potvrzeny a považovány za validní.

Adresa je unikátní řetězec znaků jednostranně odvozen z veřejného klíče konkrétního uživatele. Není tedy možné zjistit, jaká adresa odpovídá, kterému uživateli. Adresa je poté využita v rámci transakcí v roli odesílatele nebo příjemce. [5]

Za validní transakci je považována taková transakce, která splňuje následující podmínky: je v ní obsažen správný elektronický podpis uživatele a uběhla adekvátně dlouhá doba od poslední transakce s tímto kusem měny. Adekvátně dlouhá doba je určena délkou periody přidávání jednotlivých bloků. [4]

Dalším téměř nutným požadavkem je zahrnutí nějakého poplatku pro těžaře za to, aby transakci zahrnul do dalšího bloku. Těžař si ponechává po-

platky všech transakcí, které do vytěženého bloku zahrnul, a proto nemá motivaci zahrnovat transakci bez poplatku. [4]

2.1.2 Altcoiny

Pojmem altcoin se označují všechny ostatní kryptoměny podobné Bitcoinu. Název je odvozen z anglického pojmu alternative to Bitcoin. Některé altcoiny jsou svojí technologií a principem hodně podobné Bitcoinu, jsou ale i takové, které se poměrně výrazně liší. [6]

V následujících podkapitolách se zaměřím na nejvýznamnější zástupce altcoinů a vypíši zde všechny altcoiny, které se vyskytují v praktické části mé práce.

2.1.2.1 Litecoin - LTC

Litecoin je jedním z nejstarších altcoinů. Tato open source měna vznikla v roce 2011 a je svou charakteristikou velmi podobná svému předchůdci. [7] Dokonce i celý kód je pouze úpravou Bitcoinu. [8]

Hlavní rozdíl mezi Litecoinem a Bitcoinem je, že Litecoin byl od počátku navržen tak, aby lépe zvládal větší počty transakcí a aby transakce probíhaly ještě rychleji. Díky této vlastnosti se stal výhodnější pro menší transakce. Všechny tyto charakteristiky jsou založeny na tom, že jsou bloky přidávány čtyřikrát rychleji, než je tomu u Bitcoinu. [7] Cena za jeden litecoin dosahuje hodnoty \$ 40,63 (údaj ze 4.4. 2020 na burze Binance). [9]

2.1.2.2 Ethereum - ETH

Ethereum je stejně jako Litecoin open source kryptoměna založená na technologii blockchainu. Vznik Etherea se datuje k 30. 7. 2015.

Hlavním rozdílem oproti Bitcoinu je to, že se nejedná o měnu, ale o platformu se svou vlastní měnou Ethereum. Platforma Ethereum tvoří alternativu ke všem klasickým smlouvám a dohodám a snaží se o zdokonalení chytrých kontraktů. [10]

Chytrý kontrakt je zjednodušeně program, který se stará o provedení smlouvy. Tento program tak nahrazuje třetí stranu (například právníky, či notáře) a zajišťuje transparentní převod peněz, majetku nebo čehokoli jiného. [11]

Na platformě Ethereum je možné vytvářet tyto vlastní programy. [11] Rozdíl Etherea oproti Bitcoinu je ten, že nikdy nedojde k vytěžení všech mincí, nýbrž budou mince stále emitovány. [8] Cena za jedno ethereum dosahuje hodnoty \$ 142,82 (údaj ze 4.4. 2020 na burze Binance). [9]

2.1.2.3 Monero - XMR

Monero po vzoru svého nejstaršího předchůdce vzniklo jako open source projekt. Samotný kód není vůbec založen na Bitcoinu (na rozdíl od Litecoinu).

Monero se pyšní tím, že zaručuje naprostou anonymitu. Historii a stav konta v případě Monera si může prohlížet pouze majitel účtu. V případě Bitcoinu všichni vidí, jaké transakce proběhly a pokud se tedy podaří identifikovat vlastníka nějaké adresy, je jednoduché dohledat veškerou historii transakcí, které byly z dané adresy provedeny.

Stejně jako ostatní kryptoměny, má Monero také dvojici privátního a veřejného klíče. Má však ještě druhou dvojici privátního a veřejného klíče a to takzvaného klíče k prohlížení (view key). View key je možné poskytnout třetí osobě, aby se přes něj byla schopna dozvědět veškerou historii transakcí, které na adrese proběhly. Je tedy možné vytvořit i transparentní účet.

Poslední důležitý rozdíl oproti Bitcoinu je to, že celkový počet Monera není omezen. Emitování mincí nepoběží stále stejnou rychlostí, ale postupně se bude snižovat, dokud nedosáhne spodní nenulové hranice. [8] Cena za jednu minci monera dosahuje hodnoty \$ 54,59 (údaj ze 4.4. 2020 na burze Binance). [9]

2.1.2.4 Ripple - XRP

Ripple není pouze označení pro kryptoměnu, ale také pro celosvětovou platební síť. Síť Ripple vznikla s hlavním účelem osvobození internetových plateb od poplatků za směnu, zpracování transakcí a časových prodlev. Ripple nedělá rozdíly mezi tradičními měnami a kryptoměnami a tím zlevňuje veškeré výměny mezi nimi.

Ripple je stejně jako výše zmiňované kryptoměny založen na principu blockchainu. Výrazně se oproti ostatním liší tím, že všechny jeho mince byly emitovány při vzniku sítě. Jejich počet se tedy nezvyšuje procesem těžení, jako je tomu u ostatních kryptoměn.

Kvůli tomu, že všechny mince byly emitovány při vzniku, vlastní zakládající společnost Ripple Labs více než polovinu veškerých tokenů. Tím velmi odporuje úplně původní myšlence Bitcoinu a tedy zásahu jakékoliv třetí strany. [12]

Transakce se na rozdíl od ostatních kryptoměn uzavírají na základě konsensu. Síť Ripple však není kontrolována Ripple Labs, ale jedná se o peer-to-peer systém, ve kterém se uživatelé, jakožto uzly, připojují do sítě. Když probíhá transakce mezi některými uzly, ostatní uzly fungují jako validátoři provádějící proces konsensu. Validátoři se pomocí RPCA (Ripple Protocol Consensus Algorithm) algoritmu domluví na aktuálním stavu účetní knihy a přidají validní transakce do sady kandidátů. Následně se o těchto kandidátech hlasuje a ti kandidáti, kteří překročí minimální 80% hranici, jsou přidáni do účetní knihy. [13]

Díky tomu, že se transakce uzavírají na základě konsensu, probíhají transakce řádově rychleji, v řádech několika vteřin. Poplatky jsou taktéž minimální, většinou méně než 0.001 USD. [14, 15]

2.1.2.5 Ostatní zpracovávané altcoiny

V předchozí části jsem zmínil nějaké dle mého názoru významné a zajímavé altcoiny. Ve své práci však potřebuji více kryptoměn, nad kterými budu pracovat, proto jsem vybral ještě následující.

Bitcoin Cash (BCH) je kryptoměna, která vznikla odvětvením od Bitcoinu z důvodu obav přehlcení sítě. Je tedy se svým předchůdcem téměř totožná z hlediska základních vlastností. [16]

EOS (EOS) je kryptoměna, která se podobně jako Ethereum zaměřuje na využití chytrých kontraktů, kde každý uživatel držící EOS token může využívat příslušnou část výpočetní síly a uložistě. [17]

Binance Coin (BNB) je interní kryptoměna platformy a burzy Binance, která vychází ze standardu platformy Ethereum. Binance Coin je dostupný téměř výhradně na své domovské platformě, kde však má svůj účel. [18]

TRON (TRX) je kryptoměna vytvořena za účelem decentralizace sdílení informací na internetu převážně multimediálního obsahu (jako jsou například videa, hudba, hry). TRON je schopný zpracovat až 2000 transakcí za sekundu a tím je až osmdesátkrát rychlejší než jeho konkurent Ethereum. [19]

USD Tether (USDT) je zástupce stable coinu (stabilní měny). Jeho cena je vázaná na běžnou měnu, v tomto případě na americký dolar. USD Tether je nejznámějším zástupcem stabilní měny, který je využíván velkým množstvím burz (například Binance, Huobi, Okex) a jeho celková kapitalizace je více než 2 miliardy amerických dolarů. [20]

2.2 Kryptoměnové burzy

V této podkapitole se zaměřuji na několik kryptoměnových burz. Poukazuji na jejich klady a zápory a věnuji se výběru těch nejlepších mezi nimi.

2.2.1 Coinmate

Coinmate je kryptoměnová burza sídlící ve Velké Británii, která vznikla na základě technologií české společnosti Profinit v roce 2014. Burza se zaměřuje na tyto tři základní aspekty: rychlost, spolehlivost a bezpečnost. Coinmate se řadí mezi menší burzy. Podle ohlašovaného obchodovaného objemu za posledních 30 dní ve velikosti (21 658 191 amerických dolarů [21]) se burza neřadí ani mezi 100 největších. [22, 23]

Burza nenabízí velké množství obchodovatelných párů, celkově pouze 20. Dříve, do 25.3. 2020, bylo možné na Coinmate obchodovat s Korunou českou a Eurem. Obchodování s Eurem by mělo být opět možné nejspíš někdy ke konci

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ PROBLÉMU

května nebo v červnu. Coinmate se také snaží nastavit podmínky tak, aby bylo možné i obchodování s Korunou českou. [23]

Coinmate se dále pyšní tím, že má poměrně nízké poplatky. Pro uživatele v roli „maker“, ti kteří aktivně vytvářejí nabídku a poptávku, činí poplatek 0,12 % až 0 % (viz obrázky 2.1 a 2.2). Pro uživatele v roli „taker“, ti kteří nevytvářejí nové nabídky a poptávky, pouze obchodují na aktuálních, se poplatek pohybuje v rozmezí 0,25 % až 0,05 % (viz obrázky 2.1 a 2.2). Tímto systémem poplatků, kdy nižší poplatky jsou pro tvůrce trhu (makers), se snaží burza podpořit likviditu na trhu. [24] [25]

Z obrázků 2.1 a 2.2 je také možné vidět, že poplatky jsou sníženy pro obchodníky, kteří obchodují na burze s vyššími objemy. U uživatele v roli maker tím pádem může dojít ke snížení až na hranici nulových poplatků. [25]

Standard

BTC/EUR, BTC/CZK, LTC/EUR, LTC/CZK, LTC/BTC, BTC/\$DAI, \$DAI/EUR, ETH/\$DAI

30 DAY TRADING VOLUME	TAKER	MAKER
< 10,000 EUR	0.25%	0.12%
< 100,000 EUR	0.23%	0.11%
< 250,000 EUR	0.21%	0.1%
< 500,000 EUR	0.2%	0.08%
< 1,000,000 EUR	0.15%	0.05%
< 3,000,000 EUR	0.13%	0.03%
< 15,000,000 EUR	0.1%	0.02%
>= 15,000,000 EUR	0.05%	0%

Obrázek 2.1: Poplatky na burze Coinmate pro maker i taker [25]

Promotional

ETH/EUR, ETH/CZK, ETH/BTC, XRP/EUR, XRP/CZK, XRP/BTC, DASH/EUR,
DASH/CZK, DASH/BTC, BCH/EUR, BCH/CZK, BCH/BTC

30 DAY TRADING VOLUME	TAKER	MAKER
< 10,000 EUR	0.15%	0.05%
< 100,000 EUR	0.14%	0.04%
< 250,000 EUR	0.13%	0.03%
< 500,000 EUR	0.12%	0.02%
< 1,000,000 EUR	0.11%	0%
< 3,000,000 EUR	0.1%	0%
< 15,000,000 EUR	0.08%	0%
>= 15,000,000 EUR	0.05%	0%

Obrázek 2.2: Poplatky na burze Coinmate pro maker i taker [25]

2.2.2 Binance

Burza Binance byla založena v Číně v roce 2017, avšak později své sídlo přesunula na Maltu. Binance je podle dat z CoinMarketCap největší burzou z hlediska zobchodovaného objemu za posledních 30 dní (158 302 486 366 \$). [22] Burza podporuje obchodování s 1320 odlišnými měnami.

Binance je také specifická tím, že všechny obchodovatelné dvojice se sestávají pouze z kryptoměn, a ne z běžných měn. Například americké dolary jsou nahrazeny stable coin, jako je například USDT nebo TUSD.

Burza Binance si v průměru účtuje 0,1 % za provedené obchody s měnami. Tento poplatek je stejný jak pro maker tak pro taker. Pokud se uživatel rozhodne zaplatit tyto poplatky domovskou měnou Binance Coin (BNB), pak jsou tyto poplatky redukovány o čtvrtinu. Z toho plyne, že poplatky na burze Binance patří k jedněm z nejnižších. Vkladové poplatky jsou nulové pro veškeré měny. Na druhou stranu výběrové poplatky se liší pro každou měnu (viz obrázek 2.1). [26]

Tabulka 2.1: Výběrové poplatky na burze Binance [27]

Měna/token	Název	Minimální výběr	Výběrový poplatek
BTC	Bitcoin	0,001	0,0004
LTC	Litecoin	0,002	0,001
ETH	Ethereum	0,02	0,003
XMR	Monero	0,0002	0,0001
XRP	Ripple	0,5	0,25
BCH	Bitcoin Cash	0,002	0,001
EOS	EOS	0,2	0,1
BNB	BNB	0,12	0
TRX	TRON	2,16	1,08
USDT	TetherUS	1,44	0,72

2.2.3 MXC

Burza MXC je jednou z novějších burz. Vznikla v dubnu roku 2018 a je registrována v Singapuru. Podle statistik serveru CoinMarketCap je MXC druhou největší z pohledu obchodovaného objemu za posledních 30 dní s objemem 101 249 688 459 amerických dolarů. [22] MXC podobně jako burza Binance podporuje velké množství altcoinů. Celkově je zde možné obchodovat s 264 měnami. [28]

Co se týče poplatků patří burza MXC se svými poplatky o velikosti 0,2 % mezi vyšší (ze zkoumaných burz). Poplatek pro maker i taker je totožný. Tím, že tato burza patří mezi špičku z hlediska obchodovaného objemu, je zaručena i dostatečná likvidita. [29]

Burza MXC stejně jako Binance nezaplatňuje vklady a zpoplatňuje výběry. Výběrové poplatky se mohou periodicky měnit na základě situace jednotlivých bloků. [30] Na základě tabulek 2.2 a 2.1 je možné vidět, že výběrové poplatky jsou velmi podobné jako na burze Binance. Jediný znatelný rozdíl je u USD Tether (USDT). [29]

2.2.4 BitForex

Burza BitForex je kryptoměnová burza, která vznikla v červnu roku 2018. V dnešní době se podle serveru CoinMarketCap řadí na dvanácté místo z hlediska obchodovaného objemu za posledních 30 dní s objemem 66 241 217 666 amerických dolarů. [22] BitForex svým více než 3 milionům uživatelům umožňuje obchodování na 92 měnových párech. [31]

BitForex má stejné poplatky pro maker i taker o velikosti 0,1 %. BitForex se snaží cílit na větší obchodníky, a proto pro ty, kteří vlastní alespoň 50 bitcoinů v rámci burzy a k tomu mají obchodovaný objem za posledních 30 dní alespoň 1000 bitcoinů (řádově jednotky milionů dolarů), poskytuje burza nulové poplatky. BitForex nezaplatňuje vklady, ale stejně jako Binance nebo

MXC zpoplatňuje veškeré výběry, a to víceméně podobnými poplatky (viz tabulka 2.3). [31]

2.2.5 LBank

LBank je kryptoměnová burza sídlící v Hong Kongu. Jedná se o jednu z největších burz, která se podle statistik z CoinMarketCap řadí v obchodovaném objemu za posledních 30 dní na deváté místo s objemem 71 679 777 662 amerických dolarů. [22] [33]

Co se týče poplatků, využívá LBank takzvaně plochý model poplatků, poplatky pro maker i taker jsou totožné ve výši 0,1 %. Jedná se o nadprůměrně nízké poplatky ze zkoumaných burz. LBank je oproti svým konkurentům velmi zajímavá také tím, že nezpoplatňuje ani vklady ani výběry jakýchkoliv měn. [33]

2.3 Arbitrážní příležitosti

2.3.1 Efektivita trhu

Efektivní je takový trh, kde jsou všechny dostupné informace zohledněny v ceně aktiv (měn, akcií, dluhopisů, komodit). [34]

Silně efektivní trh je takový, kde kurz obsahuje všechna známá kurzotvorná data, jak veřejná, tak i veřejně nedostupná. Trhy poté reagují tak rychle, že pro nikoho, ani pro vlastníky neveřejných dat, není možné realizovat nadprůměrné zisky. [35]

Reálné trhy nikdy dokonale efektivní nejsou. Na těchto neefektivních trzích je pak možné sledovat arbitrážní příležitosti, které vznikají právě z neefektivity trhu. [6, 36]

Tabulka 2.2: Výběrové poplatky na burze MXC [30]

Měna/token	Název	Minimální výběr	Výběrový poplatek
BTC	Bitcoin	0,001	0,0005
LTC	Litecoin	0,01	0,001
ETH	Ethereum	0,04	0,005
XMR	Monero	0,1	0,01
XRP	Ripple	50	0,1
BCH	Bitcoin Cash	0,02	0,001
EOS	EOS	2	0,1
BNB	BNB	0,3	0,001
TRX	TRON	600	1
USDT	TetherUS	25	4,8

Tabulka 2.3: Výběrové poplatky na burze BitForex [32]

Měna/token	Název	Minimální výběr	Výběrový poplatek
BTC	Bitcoin	0,001	0,0005
LTC	Litecoin	0,1	0,001
ETH	Ethereum	0,01	0,02
XMR	Monero	0,01	0,00005
XRP	Ripple	20	0,15
BCH	Bitcoin Cash	0,012	0,0001
EOS	EOS	10	0,1
BNB	BNB	0,1	0,001
TRX	TRON	250	20
USDT	TetherUS	10	2

2.3.2 Arbitráž

Arbitráž je obchodní strategie, která má za cíl vydělat na neefektivitě trhu. Je založena na principu nakoupit levně a prodat téměř instantně dražší. Principem arbitráže je vytvořit zisk na malých rozdílech v ceně aktiv téměř bez jakéhokoliv rizika. Nejčastěji se jedná o nákup na jednom místě a téměř instantní prodej na místě jiném za vyšší cenu. [37]

2.3.3 Arbitráže na forexových trzích

Ještě předtím než vůbec vznikly kryptoměny, bylo možné se s arbitrážními příležitostmi setkat v rámci forexových trhů. Arbitráže se úplně původně začaly objevovat v situacích, kdy bylo možné v rámci jednoho měnového páru na jedné burze nakoupit levně a na druhé prodat dražší.

Díky informačním technologiím a vysoké rychlosti výpočtů bylo možné se následně věnovat i složitějším trojúhelníkovým arbitrážím a vydělávat na nich. [38]

2.3.4 Arbitráže v rámci kryptoměnových burz

Arbitrážní příležitosti na kryptoměnových burzách jsou pouhou obdobou arbitráží vyskytujících se na forexových trzích. Jedná se prakticky o úplně to samé. Jediným rozdílem je fakt, že se místo reálných měn obchoduje s kryptoměnami.

Arbitrážní příležitost na kryptoměnových burzách (podobně jako na forexových trzích) vznikne většinou na základě rozdílu cen na dvou odlišných burzách. Důvod, proč arbitráže vznikají právě na kryptoměnových burzách, je ten, že na burzách, kde dochází k velkému obchodnímu objemu, vzniká i velká likvidita určité měny, která poté reaguje rychleji na změny cen. Na druhou stranu na burzách, kde je menší nabídka dané měny, je likvidita nižší a cena

dané měny bude daleko pomaleji reagovat na změny. Tím, že je možné nakoupit na jedné burze levněji a na druhé prodat dražší, vzniká neefektivita a s ní také potenciální zisk.

Tento efekt velice úzce souvisí s tím, že se kryptoměny staly v posledních letech velmi populárními a ceny na velkých burzách velmi rychle kolísají, zatímco menší burzy tomuto tempu nemusí vždy stačit. [39]

2.3.5 Měnový pár v rámci kryptoměnových burz

Měnový pár je vztah mezi dvěma měnami určující hodnotu jedné vůči druhé. Například USD/CZK je vztah dolaru vůči koruně. První uváděná měna je vždy označována jako základní měna, zatímco druhá měna se označuje jako kótovaná měna. [40]

Poměr je uváděn ve vztahu k základní měně. Pokud je nákupní cena USD/CZK 22,5, znamená to, že je možné nakoupit 1 dolar za 22,5 Kč českých. Běžně je uváděn i opačný kurz tedy CZK/USD. [40]

V rámci kryptoměnových burz je běžné uvádět pouze jeden kurz, například LTC/BTC, ne však obrácený BTC/LTC. Z toho důvodu jsou na kryptoměnových burzách u jednotlivých kurzů vždy uváděny dvě hodnoty bid (poptávka) a ask (nabídka).

V rámci kryptoměnových burz se značení mezi měnovými páry často liší, avšak většinou se používá jedna z těchto tří možností (AAA/BBB, AAA-BBB, AAABBB), kde AAA a BBB zastupují zkratku nějaké měny (kryptoměny).

2.3.6 Deterministické arbitrážní příležitosti

Deterministické arbitráže jsou základním typem arbitrážních příležitostí, které mohou vznikat na kryptoměnových burzách. Jedná se o nákup a prodej stejných měnových párů na různých burzách v co nejkratším časovém intervalu za účelem výdělku. [41] [42]

Například nakoupím v jednom čase měnu A na burze X za \$ 38,31 a co nejrychleji prodám na burze Y za \$ 38,70 a tím vydělám \$ 0,39. Toto je nejjednodušší příklad, ve kterém nejsou brány v potaz poplatky.

2.3.7 Trojúhelníkové arbitrážní příležitosti

Trojúhelníková arbitráž na kryptoměnových burzách je takový obchod, kdy je proveden nákup nebo prodej mezi třemi měnami za cílem zisku. Tyto arbitrážní příležitosti se mohou objevovat buď v rámci jedné burzy, nebo mezi několika odlišnými (v následující části se budu věnovat arbitrážní příležitosti na jedné burze). [43]

Cílem je směnit nějakou obchodovatelnou měnu A na měnu B, tu následně na měnu C a nakonec opět zpátky na původní měnu A. Pokud máme měny A na konci více než na začátku, jedná se o arbitrážní příležitost (pro reálný příklad viz obrázek 3.4).

V rámci arbitrážních příležitostí je také nutné brát v potaz nákupní poplatky, které si burzy za každý nákup účtují. Tyto poplatky mohou být pro všechny dvojice stejné nebo se mohou pro každou obchodovatelnou dvojici lišit.

2.3.8 Problémy s vyděláváním na arbitrážních příležitostech

O arbitrážních příležitostech se většinou mluví jako o obchodech bez rizika. Existují však jisté bariéry a rizika, která je nutné brát v potaz.

Jednou z prvních překážek mohou být takzvané KYC regulace (know your customer - poznaj svého zákazníka). Tyto regulace mohou například omezovat to, že pro obchodování na burze je nutné mít bankovní účet v zemi, kde je burza situována.

Vzhledem k tomu, že procentuální zisk arbitrážních příležitostí je většinou velmi nízký, je nutné provést obchod ve velké sumě. Z toho plyne, že je nutné mít poměrně velký obnos kryptoměn uložen na jednotlivých burzách tak, aby bylo možné provést obchod co nejrychleji po detekci arbitrážní příležitosti.

Poplatky mezi obchody na burzách mohou výrazně snížit potenciální zisk a i po detekci neefektivity trhu nemusí nutně dojít k okamžitému výdělku.

Dalším problémem je, že se vůbec nemusí podařit provést transakci dostatečně rychle na to, aby ji neprovedl někdo jiný. Tím pádem se vždy nemusí podařit vytěžit arbitrážní příležitost nebo může proběhnout pouze část transakcí, které mohou skončit v záporných číslech.

Na některých burzách se objevují i problémy s pomalým uskutečněním transakcí, které také mohou způsobit určitou ztrátu. Hlavně za předpokladu, že je někdo závislý na rychlém pohybu mezi kryptoměnami. [39]

Realizace

V této kapitole se zabývám praktickou částí své bakalářské práce. Ze začátku se zaměřuji na problémy se získáváním relevantních dat, na to navazuji analýzou těchto získaných dat. Analýza se sestává ze zpracování dat a vyhledávání arbitrážních příležitostí.

3.1 Získání dat

Pro svou práci jsem potřeboval získat data, která se týkají aktuálních nabídek a poptávek pro jednotlivé měnové páry, na kterých jsem chtěl provádět analýzu. Tomuto typu dat se běžně říká order book (kniha objednávek). Tato data se na větších burzách mohou měnit až několikrát za sekundu a tím mohou nabývat poměrně velkých objemů.

3.1.1 Data na kryptoměnových burzách

Nejdříve jsem se snažil získat historická data na oficiálních stránkách jednotlivých burz, konkrétně Binance, CoinMate, MXC, LBank. Zde jsem se byl schopen po registraci připojit na jednotlivá API. Data zde byla veřejně k dispozici, avšak neodpovídala formátu, který jsem pro svou práci požadoval.

Na všech kryptoměnových burzách byla k dispozici data pouze o aktuálních nabídkách a poptávkách. Co se týče historických dat, bylo možné získat data o všech provedených obchodech, kde bylo vždy uvedeno minimálně množství, cena a čas provedení obchodu. Dále bylo možné získat data k vytvoření svíčkových grafů. Všechna tato historická data byla pro mě však irelevantní, protože jsem potřeboval historická data ve formátu order book. [44, 45, 46, 47, 48]

3. REALIZACE

Tabulka 3.1: Porovnání parametrů jednotlivých burz

Burza	Obchodovaný objem	Taker fee	Maker fee
Coimante	21 658 191 \$	0,25 % až 0,05 %	0,12 % až 0 %
Binance	158 302 486 366 \$	0,1 % (0,075 %)	0,1 % (0,075 %)
MXC	101 249 688 459 \$	0,2 %	0,2 %
BitForex	66 241 217 666 \$	0,1 %	0,1 %
LBank	71 679 777 662 \$	0,1 %	0,1 %

3.1.2 Vlastní sběr dat

Žádná z burz neposkytovala historická data ve formátu order book, která jsem pro svou práci potřeboval. Byl jsem proto nucen si data začít sbírat z burz sám. Díky tomuto rozhodnutí zmizel problém s dostupností dat, protože všechny zmiňované burzy poskytovaly aktuální data ve formátu order book pro všechny své měnové páry.

3.1.3 Výběr burzy

Při výběru burzy bylo nutné zohlednit několik faktorů, které mohou mít vliv na výskyt arbitrážních příležitostí:

- velikost poplatků jednotlivých transakcí,
- zobchodovaný objem,
- počet měn, se kterými je možné obchodovat.

Faktor, který bylo možné zanedbat, byl počet různých měn, neboť většina burz poskytuje daleko větší počet měn, než kolik jsem byl reálně schopný ukládat. Nejdůležitějšími faktory při výběru burzy se staly rozdíly mezi obchodovaným objemem a výší poplatků.

3.1.4 Burza Binance

Po porovnání vybraných parametrů (viz tabulka 3.1 nebo pro podrobnější informace kapitola Kryptoměnové burzy) jsem jako burzu, ze které jsem sbíral data, vybral server Binance. Tato burza má nejvyšší obchodovaný objem za posledních 30 dní ze všech kryptoměnových burz [22] a také má ze všech zkoumaných burz nejpřívětivější systém poplatků ve výši 0,1 % (respektive 0,075 % při placení poplatků v domovské měně Binance Coin).

K volbě této burzy přispělo přívětivé API, ke kterému jsem se připojil přes websocket. [44] Tímto způsobem mi při každé změně chodila data ve formě order book ohledně aktuální nabídky a poptávky sledovaného měnového páru. Tento formát dat tedy splňoval původní požadavek. [44]

	id	demand	supply	timestamp
0	22996042	[[['16.90700000', '1.28400000'], ['16.90600000'...	[[['16.95600000', '1.28400000'], ['16.95700000'...	1.582729e+09
1	22996043	[[['16.90700000', '1.28400000'], ['16.90600000'...	[[['16.95600000', '1.28400000'], ['16.95700000'...	1.582729e+09
2	22996044	[[['16.90700000', '1.28400000'], ['16.90600000'...	[[['16.95700000', '0.11800000'], ['16.97100000'...	1.582729e+09
3	22996046	[[['16.90700000', '1.28400000'], ['16.90600000'...	[[['16.95600000', '1.28400000'], ['16.95700000'...	1.582729e+09
4	22996054	[[['16.90700000', '1.28400000'], ['16.90600000'...	[[['16.95600000', '1.28400000'], ['16.95700000'...	1.582729e+09
...
28661	23163569	[[['16.91500000', '0.35800000'], ['16.91400000'...	[[['16.95800000', '0.79400000'], ['16.96500000'...	1.582762e+09
28662	23163573	[[['16.91500000', '0.35800000'], ['16.91400000'...	[[['16.95800000', '0.79400000'], ['16.96500000'...	1.582762e+09
28663	23163583	[[['16.91500000', '0.35800000'], ['16.91400000'...	[[['16.95800000', '0.79400000'], ['16.96400000'...	1.582762e+09
28664	23163609	[[['16.90600000', '0.16600000'], ['16.90300000'...	[[['16.95700000', '0.09100000'], ['16.95800000'...	1.582762e+09
28665	23163619	[[['16.90600000', '0.16600000'], ['16.90300000'...	[[['16.95500000', '1.57800000'], ['16.95600000'...	1.582762e+09

Obrázek 3.1: Ukázka CSV souboru jednoho dne dat dvojice kryptoměn

3.1.5 Sběr dat

Data získaná ze serveru Binance jsem si ukládal do souborů ve formátu CSV. Obsahovala pořadí jako identifikační číslo, cenu a množství nabídky a poptávky v order book. K těmto datům jsem ještě vždy přidal časový záznam ve formátu unix timestamp (viz obrázek 3.1). Identifikační číslo jsem si ukládal z důvodu kontroly chronologie dat. Výpis nabídek a poptávek jsem zanechal jako dvourozměrné pole, kde v prvním sloupci byla uvedena prodejní (resp. nákupní) cena a v druhém sloupci bylo uvedeno množství.

Order book může mít hloubku až několik stovek objednávek a poptávek, proto jsem si neukládal jeho celou velikost. Ukládal jsem pouze pět nejvýhodnějších záznamů. To jsem mohl udělat z toho důvodu, že arbitrážní příležitost nastane vždy na nejvýhodnějších nabídkách, protože když nastane i na méně výhodné nabídce, tak nutně musí nastat i na té nejvýhodnější.

Hloubku sběru dat z order booku je možné vybrat libovolně. Vyšší hloubka nezvýší počet výskytů arbitrážních příležitostí, na druhou stranu může zlepšit absolutní zisk. Hodnoty ve větší hloubce jsou však výrazně méně často využívány (viz koláčový graf 3.3).

Data jsem potřeboval ukládat neustále a ne pouze v konkrétní časové intervaly, proto jsem sběr dat spustil na cloudové službě AWS - Amazon Web Services. Údaje jsem kumuloval do souborů po jednom dni (v časovém pásmu UTC), protože jsem je musel kvůli omezenému uložení přesouvat i na lokální disk.

3.1.5.1 Kontrola správnosti dat

Data přicházela z cizího serveru přes websocket a nebylo stoprocentně zaručené, že budou vždy ve správném tvaru, už jen například v důvodu latence

mezi burzou Binance a mým serverem. Musel jsem proto zavést některá opatření, aby mi jisté chyby nezkreslily statistiky.

Tento efekt se objevil, když mi na několik sledovaných měnových párů začala chodit data po několik dní (od 18. 2. 2020 až do 3. 3. 2020) opakovaně s několikasekundovou (až minutovou) časovou prodlevou. Kvůli tomu jsem si napsal program, který mi celé soubory dat zkontroluje, seřadí podle identifikátoru knihy objednávek (order book) a časového razítka (timestamp) a následně odstraní duplicity (pro více informací viz kapitola 3.3.2).

Tímto algoritmem jsem zkontroloval všechny soubory a téměř žádné, až na pár výjimky (kde byla data duplikovaná), nebyly programem modifikovány, neboť data přicházela v korektním formátu.

3.1.5.2 Sledované měny a trojúhelníky

Na serveru Binance je možné obchodovat s 1320 různými měnami (údaj k 29. 3. 2020), proto jsem mohl k obchodování vybrat téměř jakékoliv měny. Pro svoji práci jsem si vybral těchto 10 kryptoměn: USDT, BTC, LTC, ETH, XRP, BCH, EOS, BNB, TRX, XMR, protože nebylo reálně možné sledovat všechny měnové páry, které burza Binance poskytovala. Celkově jsem tedy sbíral data týkající se 30 měnových párů (obchody mezi některými dvojicemi na severu Binance nebylo možné provádět).

Celkově je dostupných těchto 30 měnových párů: BCHBNB, BCHBTC, BCHUSDT, BNBBTC, BNBETH, BNBUSDT, BTCUSDT, EOSBNB, EOSBTC, EOSETH, EOSUSDT, ETHBTC, ETHUSDT, LTCBNB, LTCBTC, LTCETH, LTCUSDT, TRXBNB, TRXBTC, TRXETH, TRXUSDT, TRXXRP, XMRBNB, XMRBTC, XMRETH, XMRUSDT, XRPBNB, XRPBTC, XRPETH, XRPUSDT. Tato data nabývala dohromady velikosti v průměru téměř 1 GB za den.

Následně zkoumám všech 41 trojúhelníků, které je možné složit, z těchto měnových párů: BTC/BCH/BNB, BTC/ETH/EOS, BTC/LTC/ETH, ETH/EOS/BNB, USDT/BNB/TRX, USDT/BTC/ETH, USDT/EOS/BNB, USDT/ETH/XRP, XRP/BNB/TRX, BTC/BNB/TRX, BTC/ETH/TRX, BTC/XRP/BNB, ETH/XRP/BNB, USDT/BNB/XMR, USDT/BTC/LTC, USDT/ETH/BNB, USDT/LTC/BNB, BTC/BNB/XMR, BTC/ETH/XMR, BTC/XRP/TRX, ETH/XRP/TRX, USDT/BTC/BCH, USDT/BTC/TRX, USDT/ETH/EOS, USDT/LTC/ETH, BTC/EOS/BNB, BTC/ETH/XRP, ETH/BNB/TRX, LTC/ETH/BNB, USDT/BTC/BNB, USDT/BTC/XMR, USDT/ETH/TRX, USDT/XRP/BNB, BTC/ETH/BNB, BTC/LTC/BNB, ETH/BNB/XMR, USDT/BCH/BNB, USDT/BTC/EOS, USDT/BTC/XRP, USDT/ETH/XMR, USDT/XRP/TRX.

3.2 Zpracování dat

3.2.1 Filtrování surových dat

V prvním kroku bylo mým cílem pouze vyfiltrovat všechny potenciální arbitrážní příležitosti, které se na jednotlivých trojúhelnících objevovaly.

Nejdříve jsem tento filtrovací skript napsal v jazyce Python. V něm však probíhalo filtrování příliš pomalu, řádově několik minut pro provedení jednoho trojúhelníku za jeden den. To bylo nepoužitelné pro větší objemy dat. Rozhodl jsem se proto využít jazyk C++. V něm se mi podařilo filtrování zrychlit téměř šedesátkrát, tudíž jsem se dostal z řádu hodin denně na minuty.

3.2.1.1 Struktura filtrovaných dat

Vyfiltrovaná data jsem ukládal v JSON formátu. Tento formát jsem vybral, neboť umožňuje přehledněji strukturovat data (viz ukázka formátu 3.2).

Na nejnižší úrovni JSON formátu jsem si ukládal tyto informace:

- `arbitrages_count` – celé číslo popisující počet nalezených arbitrážních příležitostí v daném dni,
- `without_fees_count` – celé číslo popisující počet nalezených neefektivit trhu, (kolikrát by se vyskytla arbitrážní příležitost, kdyby na burze neexistovaly poplatky),
- `all_count` – celé číslo, které udává kolik celkově proběhlo kontrol na výskyt arbitrážní příležitosti (neboli počet záznamů order book na třech příslušných měnových párech).
- `arbitrages_stats` – pole, ve kterém jsou uvedeny bližší informace, ke každé arbitrážní příležitosti.

Bližší informace k jednotlivým arbitrážním příležitostem obsahovala tato data:

- `score` – desetinné číslo popisující teoretický procentuální zisk (po zahrnutí poplatků),
- `supply_gain_index` (`demand_gain_index`) – pole tří indexů popisující nejlepší kombinaci z order book k získání nejvyššího absolutního zisku na straně trojúhelníku začínajícího nabídkou, resp. poptávkou,
- `supply_gain` (`demand_gain`) – hodnota absolutního zisku hlavní měny v prvním měnovém páru v odrážce `pairs` na straně trojúhelníku začínajícího nabídkou, resp. poptávkou (pokud nedojde k žádnému zisku je hodnota ponechána na 0),
- `time_delta` – zaznamenává detekovanou dobu výskytu arbitrážní příležitosti,

- `pairs` – jedná se o pole o velikosti 3, na jehož každé položce je uloženo příslušné identifikační číslo, časový záznam, typ měnové dvojice a informace o nabídkách a poptávkách ze čtených CSV souborů (viz ukázka CSV souboru 3.1).

```
▼ object {4}
  ▼ arbitrage_stats [9]
    ► 0 {7}
    ► 1 {7}
    ▼ 2 {7}
      score : 1.032176317
      ▼ supply_gain_index [3]
        0 : 0
        1 : 3
        2 : 0
      ► demand_gain_index [3]
        supply_gain : 3.072659047
        demand_gain : 0
        time_delta : 0.0368762
      ► pairs [3]
    ► 3 {7}
    ► 4 {7}
    ► 5 {7}
    ► 6 {7}
    ► 7 {7}
    ► 8 {7}
  arbitrages_count : 9
  without_fees_count : 25569
  all_count : 246124
```

Obrázek 3.2: Ukázka JSON formátu struktury dat

3.2.2 Arbitrážní příležitosti

Ve své práci se věnuji pouze trojúhelníkovým arbitrážním příležitostem, tedy vždy příležitostem pro 3 odlišné měny. Pro libovolnou obchodovatelnou dvojici kryptoměn (AAA a BBB) mám vždy údaj pouze z jedné strany (poptávka i nabídka je pouze z pohledu jedné z kryptoměn), proto může dochá-

zet v trojúhelníku k osmi možnostem uskupení měnových párů. Těchto osm možností je však možné přeskupením dostat do dvou odlišných kombinací.

Tyto dvě kombinace je nutné příslušně vynásobit (resp. vydělit) v závislosti na pořadí měn v měnovém páru. V trojúhelníku nezáleží na pořadí, v jakém jsou jednotlivé hodnoty mezi sebou vynásobeny (vyděleny), je tedy jedno na jaké měně se v trojúhelníkové arbitrážní příležitosti začne. Je nutné však vždy v jednom trojúhelníku zkontrolovat obě strany nákupu a prodeje.

Dalším krokem v rámci detekce ideální příležitosti je propočítání několika dalších nejlepších nabídek (poptávek), v mém případě do hloubky pět, a zkontrolovat, zdali není výhodnější provést obchod s menším procentuálním ziskem, avšak s vyšším absolutním ziskem. Snažím se tedy najít takovou možnost, při které dojde k zobchodování většího množství a tím vznikne vyšší zisk (viz obrázek 3.4).

Ve většině případů je k získání největšího absolutního zisku nejvýhodnější využít prvních hodnot v rámci order book. Celkově je v mé práci využita první hodnota z order book ve více než 80 % případů. Statistika byla prováděna na reálných arbitrážních příležitostech získaných v mé praktické části. Celkově bylo vzato v potaz více než 70 tisíc indexů. Využití dalších indexů v pořadí je využito o poznání méně řádově v jednotkách procent, které se snižují s každým dalším indexem (viz koláčový graf 3.3).

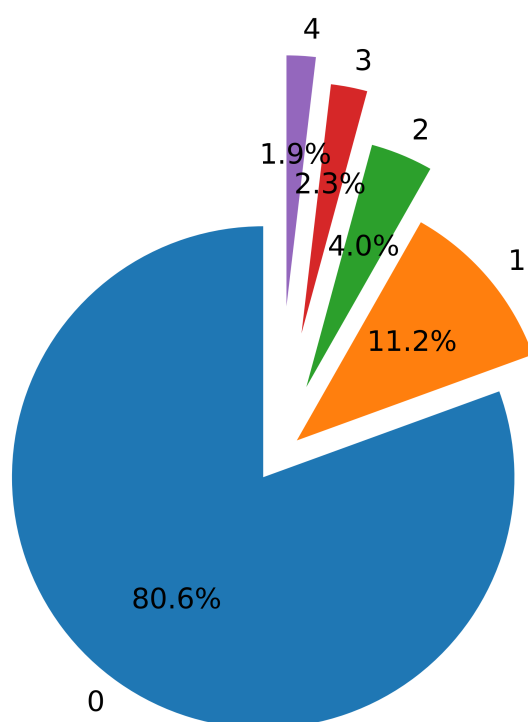
K získání nejvyššího absolutního zisku by bylo nutné neobchodovat trojúhelník pouze v hloubce s nejvyšším absolutním ziskem, ale zobchodovat všechny kladné trojúhelníky do sbírané hloubky v pořadí od nejlepšího procentuálního zisku. Takovýto obchod by sice přinesl nejvyšší zisk, ale pro jeho provedení by bylo nutné provést velké množství transakcí, které není většinou reálně možné stihnout (pro bližší hodnoty doby trvání viz kapitola 4). Ve své práci tedy беру v potaz pouze arbitrážní příležitosti, kde stačí provést na každém měnovém páru jednu transakci.

3.2.2.1 Detekce trojúhelníkové arbitrážní příležitosti

Nechť máme tři odlišné měny C_1, C_2, C_3 a nechť existují směnné kurzy mezi každou dvojicí měn. Následně definujeme $x_i(t)$ jako výši prodejní ceny (bid) v čase t mezi C_i a C_{i+1} za předpokladu, že C_{i+1} odpovídá hlavní měně a C_i odpovídá kótované měně v uvedeném kurzu. V opačném případě, kdy C_i je hlavní měna a C_{i+1} je měna kótovaná, nastavíme hodnotu $x_i(t)$ jako převrácenou hodnotu nákupní ceny (ask) v čase t .

Dále definujeme f_i jako poplatek mezi měnami C_i a C_{i+1} , kde pro zjednodušení notace $C_1 = C_4$. Procentuální efektivita trojúhelníku v čase t je definována následovně (viz rovnice 3.1).

$$D_{C_1, C_2, C_3}(t) = \prod_i^3 \left(x_i(t) * (1 - f_i) \right) \quad (3.1)$$



Obrázek 3.3: Distribuce indexů obsahující nejlepší hodnoty pro získání nejvyššího absolutního zisku v rámci arbitrážní příležitosti

V závislosti na vztahu mezi 1 a $D_{C_1, C_2, C_3}(t)$ je možné vyhodnotit, zdali se jedná o arbitrážní příležitost. Možnosti jsou následující:

- za předpokladu, že $D_{C_1, C_2, C_3}(t) < 1$, není detekována arbitrážní příležitost a při provedení obchodu by došlo ke ztrátě,
- pokud $D_{C_1, C_2, C_3}(t) > 1$, poté dochází k detekci arbitrážní příležitosti a je možné vydělat $(D_{C_1, C_2, C_3}(t) - 1) * m$, kde m reprezentuje zobchodované množství,
- pokud $D_{C_1, C_2, C_3}(t) = 1$, pak není nutné trojúhelník obchodovat, protože by nedošlo k žádnému výdělku.

3.2.2.2 Nejužší místo v arbitrážní příležitosti

Při vytěžování arbitrážní příležitosti je nutné určit množství, které bude zobchodováno. Toto místo je určeno jako nejužší část trojúhelníku. V práci ho určíme tím způsobem, že podle aktuálních kurzů převedu množství uvedená v měnových párech na jednu měnu. Kurzy pro převod jsou využívány ve směru zkoumaného trojúhelníku. Z vypočtených hodnot vyberu nejmenší hodnotu a určím ji jako nejužší místo. V tomto místě začínám arbitrážní příležitostí.

Hodnota nejužšího místa nemusí být nutně finální. Jelikož uvažuji pouze kladné trojúhelníky, dochází v průběhu obchodování ke zvyšování objemu tak, aby na konci došlo k výdělku. Je tedy nutné zkontrolovat, jestli i omezení na ostatních měnových párech odpovídají předem vybranému nejužšímu místu. Pokud omezení neodpovídají, pak je propagována chyba na začátek a nejužší místo je řádně sníženo. Neprovedením úpravy nejužšího místa by nedošlo ke ztrátě, pouze by nebyl převeden veškerý zisk na jednu měnu.

3.2.2.3 Reálný příklad arbitrážní příležitosti

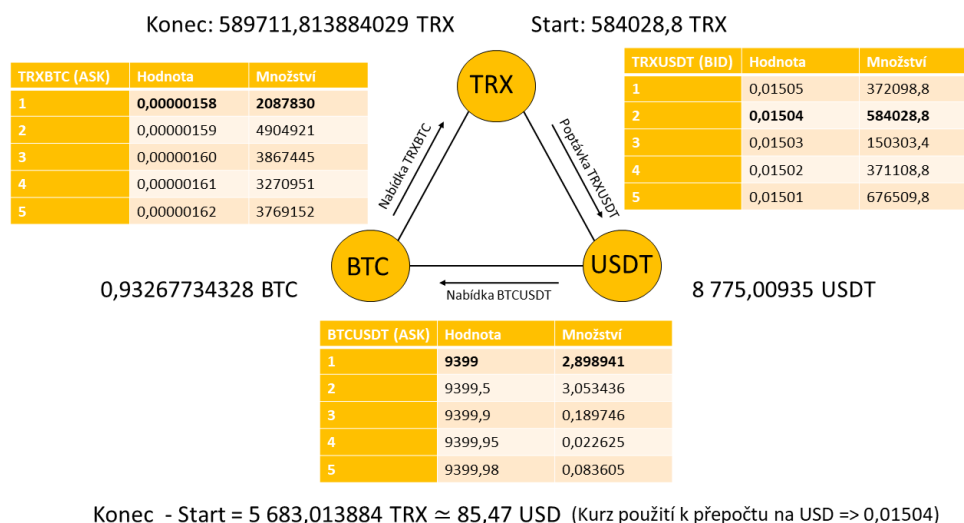
Na obrázku 3.4 je zachycena reálná arbitrážní příležitost na trojúhelníku USDT/BTC/TRX, která nastala 15. května 2020 ve 2:32:08.630 koordinovaného světového času UTC. Tento čas je použitý jako hodnota t pro výpočet následujícího příkladu. V příkladě není využito prvních hodnot na všech měnových párech, na měnovém páru TRXUSDT je využito druhé hodnoty z důvodu zvýšení absolutního zisku. V příkladě je počítáno s poplatky 0,1 % pro každý měnový pár. Po dosazení do rovnice 3.1 vyjde:

$$D_{USDT, BTC, TRX}(t) = 0,01504/9399/0,00000158 * (1 - 0,001)^3 = 1,0097307$$

Nejužší částí tohoto trojúhelníku je množství poptávky na straně TRXUSDT (ostatní množství této hodnotě také vyhovují), proto je tato hodnota zvolena jako maximální obchodovatelný objem arbitrážní příležitosti a vynásobena upraveným procentuálním ziskem.

$$(D_{USDT, BTC, TRX}(t) - 1) * m = (1,0097307 - 1) * 584028,8 = 5683,014 \text{ TRX}$$

3. REALIZACE



Obrázek 3.4: Trojúhelníková arbitráž

Na příkladě je vidět, že na této konkrétní arbitrážní příležitosti bylo možné vydělat 5 683,014 TRX, což odpovídá asi 84,47 USD. Pro převod byl využit stejný kurz z obrázku 3.4 na měnovém páru TRXUSDT, který byl využit pro výpočet v trojúhelníku. Tato hodnota vypadá velmi zajímavě, je však nutné podotknout, že k vytěžení takovéto arbitrážní příležitosti je nutné zobchodovat objem o velikosti 584 028,8 TRX odpovídajících asi 8 783,79 americkým dolarům.

Reálně dochází ke kontrole i v druhém směru trojúhelníku, ten vyšel však záporný, a proto není v příkladě ani na obrázku uveden.

3.2.2.4 Reálná detekce arbitrážní příležitosti

Ve své praktické části detekuji arbitrážní příležitosti stejným způsobem, jaký je popsán v předchozí sekci. Data však zkoumám později a analýzu provádím na historických datech, proto je nutné určit, co považuji za novou arbitrážní příležitost.

Problém může nastat, pokud se objeví arbitrážní příležitost, která není vytěžena nebo je pouze částečně vytěžena do příchodu dalšího záznamu (order book). S takovýmto efektem nakládám tak, že pokud se vyskytne několik stejných arbitrážní příležitostí po sobě, považuji je za jednu a pouze zvětšuji dobu trvání výskytu dané arbitrážní příležitosti.

Je nutné ještě zadefinovat, co považuji za stejnou arbitrážní příležitost. Za stejnou arbitrážní příležitost považuji takovou, která má stejná právě 2 časová razítka (timestamp) a stejný procentuální zisk.

Tabulka 3.2: Příklad k postupné kontrole na pozitivní arbitrážní příležitosti

Měnový pár	1. hodnota	2. hodnota	3. hodnota
A	0,01	0,03	0,06
B	0,00	0,02	0,07
C	0,00	0,04	0,05

Absolutní zisky neporovnávám z důvodu, že může dojít pouze ke změně v obchodovatelném objemu arbitrážní příležitosti. Tudíž kdybych tyto menší arbitrážní příležitosti detekoval jako nové, došlo by k duplikování stejných hodnot na jiných arbitrážních příležitostech. Další obrácenou možností je, že by někdo vytvořil úplně stejnou nabídku, a tím zvýšil potenciální zisk. Tento případ je však moc složitý na detekci a celkově poměrně nepravděpodobný, a proto se mu ve své práci nevěnuji.

3.2.2.5 Příklad výskytu a jeho detekce

Jelikož je detekce arbitrážních příležitostí prováděna na historických datech a k jednotlivým order book záznamům je přidáváno časové razítko až po přečtení dat, považuji daný order book za aktuální až do příchodu nadcházejícího záznamu na stejném měnovém páru. Při inicializaci detekce příležitostí je proto nutné přecházet na každém měnovém páru alespoň dva záznamy. Program musí přecházet dostatek záznamů na to, aby se intervaly počítaných měnových párů překrývaly. Program vyhledávající pozitivní arbitrážní příležitosti iteruje postupně všemi třemi soubory měnových párů následujícím algoritmem.

Předpokládám, že se nejedná o začátek programu, proto mám již načtený trojúhelník, který byl zkontrolován na výskyt arbitrážní příležitosti. Dále mám načtené hodnoty nadcházejících záznamů. V dalším kroku je vyměněna ta hrana trojúhelníku, která má z dopředu načtených hodnot nejnižší timestamp. Tím je zajištěno, že se intervaly překrývají.

Trojúhelníky jsou vybírány a kontrolovány následovně (viz tabulka 3.2), $T(t)$ značí čas začátku nového trojúhelníku (A, B, C značí různé měnové páry):

- $T(0,01) = A1, B1, C1$,
- $T(0,02) = A1, B2, C1$ (výskyt),
- $T(0,03) = A2, B2, C1$,
- $T(0,04) = A2, B2, C2$ (zánik),
- $T(0,05) = A2, B2, C3$,
- $T(0,06) = A3, B2, C3$,
- $T(0,07) = A3, B3, C3$,

Řekněme, že se s příchodem nové hodnoty na měnovém páru B v čase $T(0,02)$ objeví nová pozitivní arbitrážní příležitost. Tato příležitost zanikne v čase $T(0,04)$ se změnou hodnoty na měnovém páru C. Arbitrážní příležitost tedy v tomto případě stihla zmizet dříve, než byl přečten nový order book na měnovém páru B, který způsobil výskyt pozitivní příležitosti.

3.2.3 Kontrola dat

3.2.3.1 Kontrola korektnosti záznamů

V rámci kontroly souborů je nutné sledovat, zdali jsou záznamy korektní. Data jsou kontrolována na správnost typů, správnost požadovaného formátu a správnost pořadí.

Záznamy jsou kontrolovány na souslednost identifikačních čísel. Dále jsou kontrolována časová razítka (timestamp) a to tak, že se porovnává rozdíl mezi aktuálním a následujícím záznamem. Jako korektní je považován monotónní záznam s adekvátní časovou prodlevou.

Adekvátní časovou prodlevu je nutné určit pro každý měnový pár zvlášť, neboť jsou nějaké měnové páry vytíženější než jiné. Adekvátní časové prodlevy jsem určil následujícím způsobem:

1. vybral jsem dny, které měly konzistentní a monotónní data (konkrétně dny od 10. 4. 2020 až do 17. 5. 2020),
2. na těchto datech jsem spočítal percentil 99,9 pro každý den a pro každý měnový pár zvlášť,
3. zvolil jsem medián ze spočítaných percentilů pro tyto dny (viz tabulka časových prodlev 3.3).
4. tento medián jsem vynásobil konstantou 1,1, přičetl 0,1 sekundy a tím určil adekvátní časovou prodlevu.

Byl zvolen percentil 99,9, neboť data byla konzistentní a nedocházelo k velkým výkyvům. Medián byl vybrán, protože jsem nechtěl, aby případný větší výkyv v některém dni zásadně ovlivnil hodnoty. Konstanta 1,1 byla vybrána, aby došlo k zahození menší části dat a stále byly detekovány velké výkyvy. Přičtení 0,1 sekundy bylo provedeno ke zvýšení tolerance u měnových párů s přísnějšími hodnotami.

Konstanta 1,1 byla zaměněna za konstantu 1,5 pro takové výskyty, kdy na sebe přímo navazovala identifikační čísla po sobě jdoucích záznamů. Identifikační čísla obchodů na sebe vždy nenavazovala, byla však vždy seřazená.

Tabulka 3.3: Hodnoty adekvátní časové prodlevy pro jednotlivé měnové páry

Měnový pár	Denní medián percentilů (99,9) časových prodlev (s)
BCH/BNB	15,38
BCH/BTC	1,78
BCH/USDT	1,06
BNB/BTC	2,07
BNB/ETH	4,91
BNB/USDT	1,53
BTC/USDT	1,04
EOS/BNB	11,83
EOS/BTC	3,17
EOS/ETH	5,86
EOS/USDT	1,08
ETH/BTC	1,08
ETH/USDT	1,04
LTC/BNB	19,04
LTC/BTC	2,53
LTC/ETH	6,28
LTC/USDT	1,32
TRX/BNB	14,25
TRX/BTC	3,20
TRX/ETH	5,47
TRX/USDT	2,35
TRX/XRP	20,31
XMR/BNB	29,27
XMR/BTC	5,12
XMR/ETH	12,86
XMR/USDT	2,98
XRP/BNB	14,45
XRP/BTC	2,68
XRP/ETH	4,03
XRP/USDT	1,12

3.2.3.2 Kontrola pozitivních arbitrážních příležitostí

V předchozí sekci byla zmíněna problematika správnosti záznamů v rámci jednotlivých měnových párů. Je však nutné kontrolovat i nalezené arbitrážní příležitosti na správnost časového překrytí intervalů.

Arbitrážní příležitosti jsou kontrolovány následovně. Je spočítán rozdíl nejvzdálenějších časových razítek s nejvyšší adekvátní časovou prodlevou ze zúčastněných párů. Pokud je tato hodnota záporná, je považována arbitrážní příležitost za validní.

3.2.3.3 Problém s duplicitami

V datech od 18. 2. 2020 do 3. 3. 2020 se objevily zmiňované duplicity z kapitoly 3.1.5.1. Duplicity se mi podařilo odstranit kompletně. Vznikl však problém, že v některých časových okamžicích byla data uložena rozházeně podle identifikačních čísel (není zřejmé, jestli byla chyba na mojí straně nebo na straně serveru Binance).

Jednotlivé order book záznamy byly seřazeny podle identifikačních čísel, to způsobilo, že časová razítka nebyla monotónně rostoucí. Těchto chyb se objevovalo na některých měnových párech několik stovek až několik tisíc za den (většina souborů měla okolo 60 až 100 tisíc záznamů). Naskytly se dvě možnosti zpracování poškozených souborů:

1. zahodit několikadenní data,
2. přizpůsobit program tak, aby ignoroval chyby.

Rozhodl jsem se pro druhou možnost, tedy přizpůsobit program chybám. Při výskytu chyby v monotonii jsem restartoval počítací algoritmus a začal jsem znovu s dalšími správnými hodnotami. Správné hodnoty byly vyhodnocovány na základě algoritmu z předchozích sekcí 3.2.3.1 a 3.2.3.2.

V datech byla celkově přeskakována poškozená místa. Výpočty na výskyt trojúhelníkových arbitrážních příležitostí byly prováděny na korektních částech záznamů. Tímto řešením jsem přišel o několik procent záznamů, kde se mohly vyskytovat arbitrážní příležitosti, nepřišel jsem však o všechny záznamy. Upraveným algoritmem by neměly být detekovány nereálné arbitrážní příležitosti, které se nikdy neobjevily. V rámci těchto několika dní se neobjevily žádné větší výkyvy v počtu arbitrážních příležitostí (viz grafy 4.5 a 4.3), proto si dovoluji tvrdit, že se podařilo provést analýzu i na částečně poškozených datech.

3.3 Struktura modulů praktické části

Moje praktická část je rozdělena do čtyř na sobě nezávislých modulů, kterými jsou sběr dat, vyčištění dat, selekce trojúhelníků a statistika na trojúhelnících.

Každý modul je odlišný ve svém chování, proto je důležité zmínit některé jejich důležité vlastnosti.

3.3.1 Sběr dat

Sběr dat je implementován jako spustitelný soubor v jazyce Python 3. Tento program stahuje data z burzy Binance přes websocket a ukládá data ve formě order book do souborů po jednotlivých měnových párech a jednotlivých dnech.

Dny jsou rozděleny na základě časové zóny UTC. Univerzální zóna UTC byla zvolena, protože sbírám data ze světové burzy.

Ke sběru dat je napsaná manuálová stránka vysvětlující jeho funkcionalitu a spouštění a je součástí přílohy (ve stejném adresáři jako program samotný).

3.3.2 Čištění dat

Program na čištění dat je také napsaný v jazyce Python 3 a i on má svoji manuálovou stránku s bližšími informacemi ohledně funkcionality a spouštění, zahrnutou v příloze.

Program čištění dat není nutné spouštět na data sebraná z burzy. Je to však doporučené, protože data chodí ze vzdáleného serveru přes websocket a občas se v datech vyskytly chyby (například s duplikováním některých záznamů), které pak program odstraní.

3.3.3 Selektce trojúhelníků

Program na selekci pozitivních trojúhelníků je jako jediná část kódu z důvodu rychlosti napsaná v jazyce C++. Program je možné spouštět na více vláknech. Opět je k němu napsaná manuálová stránka zahrnutá v příloze.

Selektce trojúhelníků bere data ve formátu CSV (viz obrázek 3.1) a hledá na nich pozitivní trojúhelníky (se zahrnutím poplatků burzy), které ukládá opět po dnech a po jednotlivých trojúhelnících ve formátu JSON (viz ukázka dat 3.2).

3.3.4 Statistiky na trojúhelnících

Poslední část, zabývající se analýzou trojúhelníků, je napsaná opět v jazyce Python 3, avšak ve formě Jupyter notebooku. Tento formát byl zvolen z toho důvodu, že se jedná o přehledný způsob zobrazení grafů a tabulek včetně jejich generujícího kódu. Velkou část kódu totiž tvoří části vykreslující grafy, které se dají jednoduše upravit a vygenerovat tak podobné grafy.

Tato část obsahuje dvě hlavní třídy, starající se o přehledné uložení dat. Tyto třídy jsou zdokumentovány v kódu. K Jupyter notebooku neexistuje manuálová stránka, poněvadž jsou jednotlivé kusy kódu okomentovány pomocí jazyka Markdown v rámci Jupyter notebooku. Popis výstupů z Jupyter notebooku je možný najít v poslední kapitole 4.

Analýza dat

V této kapitole se věnuji analýze reálných dat s pomocí vlastních grafů. Data jsou vyhodnocena na základě více než dvouměsíční sbírky dat.

4.1 Selekce nejlepších trojúhelníků

V této sekci se zabývám selekcí těch nejlepších trojúhelníků vzhledem k nejčastějším výskytům arbitrážních příležitostí, největším potenciálním ziskům. Tato část je nutná, poněvadž celkově pozoruji 41 odlišných trojúhelníků a velké části z nich není nutné se věnovat, protože nejsou z pohledu vytěžování arbitrážních příležitostí vůbec zajímavé.

4.1.1 Základní statistiky trojúhelníků

V této podkapitole se úzce věnuji nejzákladnějším statistikám jednotlivých trojúhelníků. Dále diskutuji nad tím, jakým trojúhelníkům se vyplatí podrobně věnovat v dalších částech této kapitoly. Nejdůležitějšími faktory pro porovnání trojúhelníků jsou:

- četnost výskytů,
- doba trvání,
- potenciální zisk.

Jak je možné vidět v tabulce 4.1, tak průměrný počet pozitivních arbitrážních příležitostí se pro jednotlivé trojúhelníky velmi liší. Pohybuje se od ani ne jednotek denně až po několik desítek denně. V případě trojúhelníku USDT/XRP/TRX je jich nejvíce a jedná se v průměru o více než 30 pozitivních arbitrážních příležitostí denně. Průměrná neefektivita arbitrážní příležitosti (jedná se o hodnotu procentuálního zisku se zahrnutím poplatků), dosahuje hodnot promile pouze u dvou trojúhelníků USDT/BCH/BNB

4.1. Selekce nejlepších trojúhelníků

Tabulka 4.1: Porovnání denních průměrů a průměrné denní % neefektivita

Trojúhelník	Průměrný denní počet	Průměrná % neefektivita
BTC/BCH/BNB	1,9655	1,0003
BTC/BNB/TRX	0,5667	1,0001
BTC/BNB/XMR	2,8966	1,0002
BTC/EOS/BNB	0,8333	1,0001
BTC/ETH/BNB	1,0833	1,0003
BTC/ETH/EOS	0,7586	1,0001
BTC/ETH/TRX	2,1264	1,0002
BTC/ETH/XMR	8,1529	1,0003
BTC/ETH/XRP	5,1609	1,0003
BTC/LTC/BNB	0,8667	1,0002
BTC/LTC/ETH	3,9540	1,0001
BTC/XRP/BNB	1,2667	1,0002
BTC/XRP/TRX	9,0706	1,0003
ETH/BNB/TRX	0,6500	1,0003
ETH/BNB/XMR	4,6471	1,0002
ETH/EOS/BNB	0,3793	1,0002
ETH/XRP/BNB	2,4253	1,0002
ETH/XRP/TRX	3,8353	1,0001
LTC/ETH/BNB	2,8736	1,0003
USDT/BCH/BNB	19,3647	1,0010
USDT/BNB/TRX	3,5500	1,0006
USDT/BNB/XMR	28,9412	1,0007
USDT/BTC/BCH	4,6333	1,0008
USDT/BTC/BNB	7,0167	1,0007
USDT/BTC/EOS	13,3678	1,0006
USDT/BTC/ETH	3,6833	1,0006
USDT/BTC/LTC	12,9080	1,0005
USDT/BTC/TRX	6,3333	1,0006
USDT/BTC/XMR	20,4138	1,0007
USDT/BTC/XRP	14,4023	1,0005
USDT/EOS/BNB	18,2299	1,0007
USDT/ETH/BNB	4,8500	1,0010
USDT/ETH/EOS	2,8966	1,0008
USDT/ETH/TRX	2,9500	1,0010
USDT/ETH/XMR	2,6724	1,0008
USDT/ETH/XRP	3,6500	1,0007
USDT/LTC/BNB	17,7126	1,0007
USDT/LTC/ETH	2,4167	1,0008
USDT/XRP/BNB	12,8506	1,0007
USDT/XRP/TRX	30,9529	1,0004
XRP/BNB/TRX	1,1724	1,0001

4. ANALÝZA DAT

Tabulka 4.2: Potenciální výnosy na jednotlivých trojúhelnících

Trojúhelník	Denní neefektivita	Denní neefektivita (USD)
BTC/BCH/BNB	0,004686 BCH	1,044816
BTC/BNB/TRX	37,669655 TRX	0,474525
BTC/BNB/XMR	0,004210 XMR	0,224689
BTC/EOS/BNB	0,027397 EOS	0,066850
BTC/ETH/BNB	0,089227 BNB	1,385699
BTC/ETH/EOS	0,131114 EOS	0,319919
BTC/ETH/TRX	194,088264 TRX	2,444930
BTC/ETH/XMR	0,018076 XMR	0,964735
BTC/ETH/XRP	18,530252 XRP	3,445978
BTC/LTC/BNB	0,005206 LTC	0,213432
BTC/LTC/ETH	0,024868 LTC	1,019591
BTC/XRP/BNB	5,701067 XRP	1,060199
BTC/XRP/TRX	312,897841 TRX	3,941574
ETH/BNB/TRX	43,673148 TRX	0,550151
ETH/BNB/XMR	0,043816 XMR	2,338451
ETH/EOS/BNB	0,054539 EOS	0,133074
ETH/XRP/BNB	2,743739 XRP	0,510239
ETH/XRP/TRX	25,129313 TRX	0,316554
LTC/ETH/BNB	0,011626 LTC	0,476660
USDT/BCH/BNB	0,379050 BCH	84,520560
USDT/BNB/TRX	147,677652 TRX	1,860295
USDT/BNB/XMR	2,064894 XMR	110,203404
USDT/BTC/BCH	0,080214 BCH	17,886043
USDT/BTC/BNB	1,335634 BNB	20,742392
USDT/BTC/EOS	48,933792 EOS	119,398452
USDT/BTC/ETH	0,127004 ETH	19,901603
USDT/BTC/LTC	2,432875 LTC	99,747878
USDT/BTC/TRX	8549,748140 TRX	107,701177
USDT/BTC/XMR	0,996534 XMR	53,185018
USDT/BTC/XRP	567,201148 XRP	105,479562
USDT/EOS/BNB	73,063663 EOS	178,275337
USDT/ETH/BNB	0,365623 BNB	5,678119
USDT/ETH/EOS	1,768986 EOS	4,316326
USDT/ETH/TRX	568,958881 TRX	7,167175
USDT/ETH/XMR	0,048328 XMR	2,579268
USDT/ETH/XRP	20,859336 XRP	3,879106
USDT/LTC/BNB	2,105659 LTC	86,332007
USDT/LTC/ETH	0,101539 LTC	4,163091
USDT/XRP/BNB	556,557418 XRP	103,500200
USDT/XRP/TRX	1910,756847 TRX	24,069804
XRP/BNB/TRX	4,881886 TRX	0,061497

4.2. Korelace mezi výskytem arbitrážních příležitostí a vnějšími jevy

Tabulka 4.3: Kurzy využívané k přepočtu na americké dolary (údaj z burzy Binance ze dne 13.4.2020)

Kryptoměna	Kurz na USD
BTC	6837,51
LTC	41
ETH	156,7
XRP	0,185965
USDT	1
BCH	222,98
BNB	15,53
EOS	2,44
XMR	53,37
TRX	0,012597

4.2 Korelace mezi výskytem arbitrážních příležitostí a vnějšími jevy

V této sekci řeším, jaké vnější jevy mohou mít na výskyt arbitrážních příležitostí vliv a jak moc s výskytem korelují nebo nekorelují. Je nutné podotknout, že nějaké vztahy nemusí být úplně vypovídající, protože korelace jsou prováděny pouze na datech o objemu dvou až tří měsíců.

4.2.1 Závislost na dni v týdnu

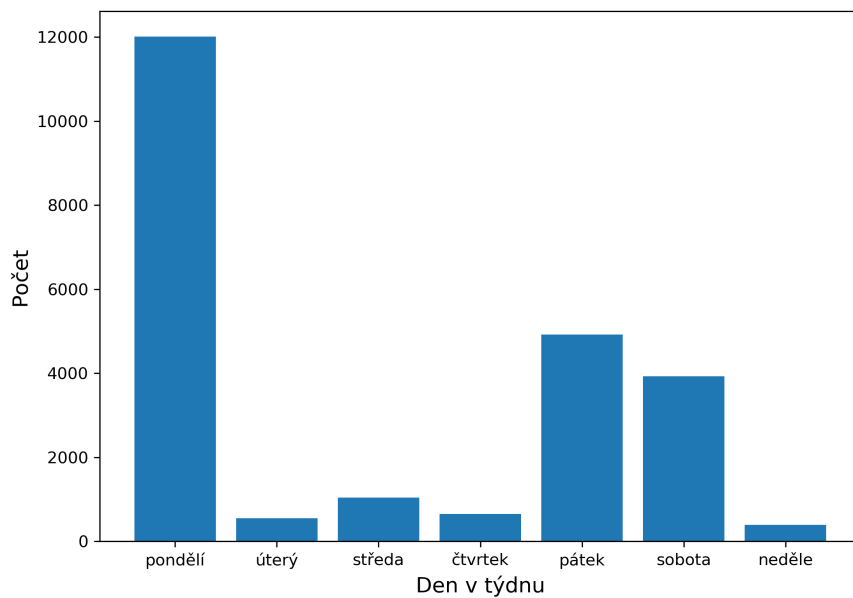
Z grafu 4.2 je možné vyčíst, že se arbitrážní příležitosti vyskytovaly nejvíce v pondělí, v pátek a v sobotu. Na druhou stranu při pohledu na graf 4.3 je jasné vidět, že se ve výskytu arbitrážních příležitostí nevyskytuje žádný periodický vzor, který by se opakoval po každých sedmi dnech. Graf je velice plochý s pár výkyvy, které naprosto převažují všechny ostatní výskyty.

Proto si dovoluji tvrdit, že z mých dat není zřejmá žádná korelace mezi výskytem arbitrážních příležitostí a dnem v týdnu. Nevyracím však možnost, že se nějaká vyskytovat může. Velké výkyvy ve výskytu arbitráží ovlivňují data natolik, že ostatní hodnoty mají téměř nulový význam.

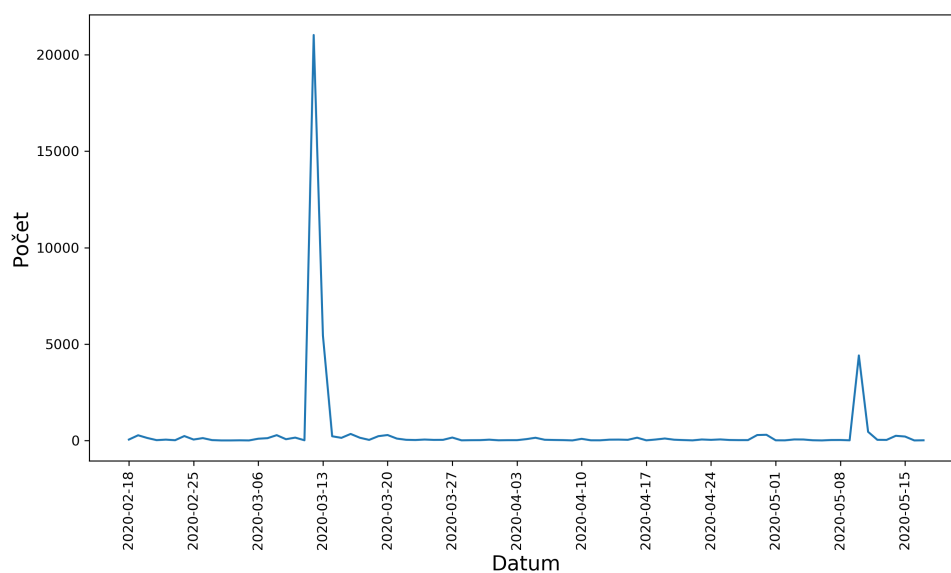
4.2.2 Závislost na denní hodině

Z grafu 4.4 lze vyčíst, že nějaké hodiny silně převažují v počtu výskytu arbitrážních příležitostí. Domnívám se však, že je to způsobeno stejným jevem, jako v případě korelace s dny v týdnu a to tím, že se arbitrážní příležitosti neobjevují rovnoměrně v čase (viz graf 4.3), nýbrž se vyskytují vždy ve velkém množství po krátkou dobu. Tento efekt spojený s faktem, že nemám dostatečné množství dat, poté může způsobovat velké výkyvy v grafu rozložení v závislosti na hodině dne (viz graf 4.4).

4. ANALÝZA DAT

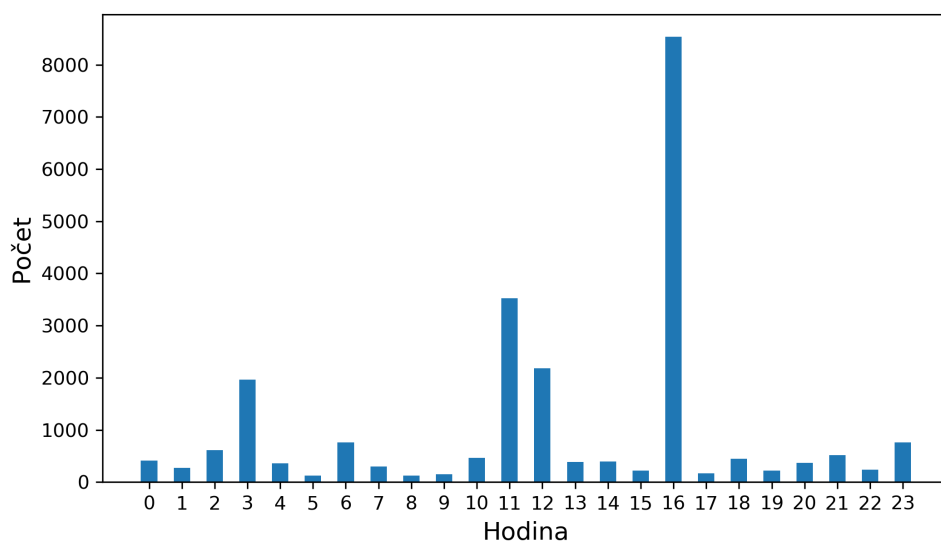


Obrázek 4.2: Rozložení arbitrážních příležitostí v závislosti na dni v týdnu



Obrázek 4.3: Rozložení arbitrážních příležitostí v jednotlivých sledovaných dnech

4.2. Korelace mezi výskytem arbitrážních příležitostí a vnějšími jevy



Obrázek 4.4: Rozložení arbitrážních příležitostí v závislosti na hodině výskytu

Díky tomuto efektu není dále možné z mých dat docházet k jakýmkoliv hlubším závěrům, neboť k tomu nemám zaevidovaný dostatečný počet výkyvů. Z toho důvodu nemohu potvrdit ani vyvrátit možnost výskytu korelace mezi výskytem arbitrážních příležitostí a hodinou ve dni.

4.2.3 Závislost na počtu provedených transakcí

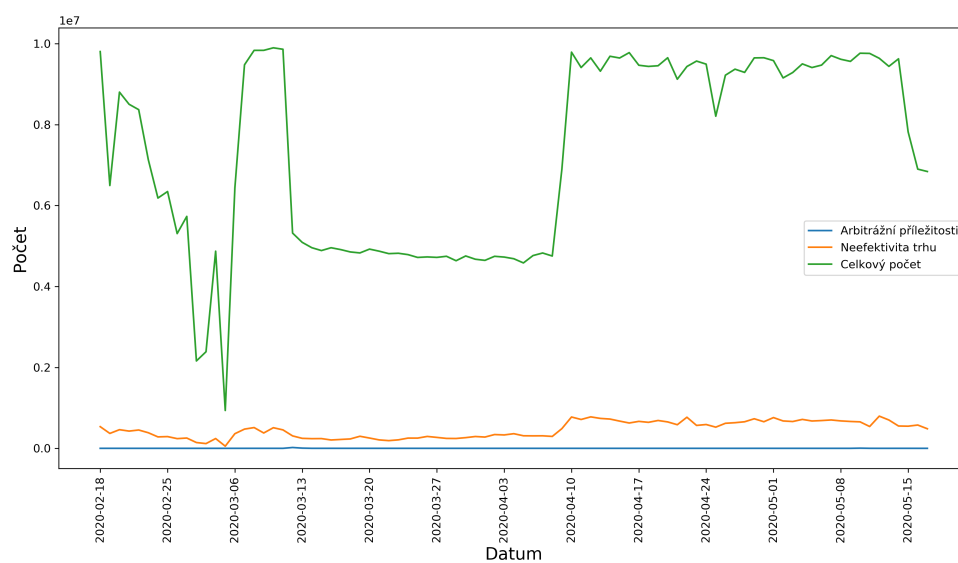
Počet transakcí je číslo, které by také mohlo ovlivňovat počet výskytů arbitrážních příležitostí, protože za předpokladu, že nebudou prováděny žádné transakce, se nemohou vytvářet ani nové arbitrážní příležitosti.

Pearsonův korelační koeficient diskretních hodnot s četností po jednotlivých dnech těchto dvou veličin vyšel $\sim -0,085$, z čehož vyplývá, že tyto dvě veličiny spolu téměř vůbec nekorelují, a proto není možné mluvit o jakékoliv závislosti jedné na druhé (obrázek 4.5).

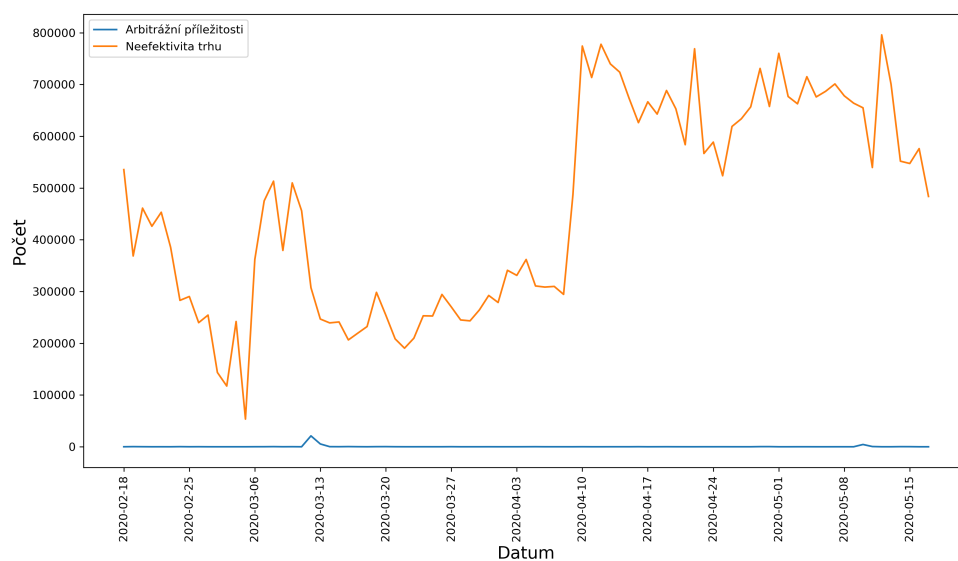
4.2.4 Závislost na počtu obecných neefektivit trhu

Dalším faktorem, na který jsem se zaměřil v souvislosti s otázkou, na čem by mohl být výskyt arbitrážních příležitostí závislý, je počet neefektivit trhu. Jako neefektivitu trhu označuji takovou situaci, kdy by se jednalo o arbitrážní příležitost za předpokladu, že by nebyly zahrnuty poplatky. Z této definice vyplývá, že každá arbitrážní příležitost je také nutně neefektivitou trhu.

4. ANALÝZA DAT



Obrázek 4.5: Vývoj rozložení výskytu arbitrážních příležitostí, neefektivit trhu a celkového počtu provedených transakcí po jednotlivých dnech



Obrázek 4.6: Vývoj rozložení výskytu arbitrážních příležitostí a neefektivit trhu po jednotlivých dnech

Z grafů 4.3 a 4.6 je poměrně zřejmé, že výskyt arbitrážních příležitostí a neefektivit trhu spolu moc nekoreluje. Výpočet Pearsonova korelačního koeficientu diskretních hodnot bráných po jednotlivých dnech to potvrzuje výsledkem $\sim -0,090$. Z korelačního koeficientu tedy plyne, že tyto dvě hodnoty spolu téměř nekoreluje.

4.3 Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků

V této sekci se podrobněji věnuji nejzajímavějším trojúhelníkům, které jsem vybral z dat nashromážděných za téměř tři měsíce.

4.3.1 Selekce

Trojúhelníky jsem vybíral převážně na základě hodnot z předchozí sekce (konkrétně z tabulek 4.1 a 4.2). Většina pozorovaných hodnot se mezi jednotlivými měnami příliš neliší, proto jsem bral v potaz převážně faktor průměrného denního potenciálního zisku. Průměr byl zvolen, protože ne všechny trojúhelníky mají data ze všech dní.

V tabulce 4.4 jsou ponechány pouze záznamy, u kterých je možné každý den v průměru vydělat více než 10 amerických dolarů. V této sekci se však věnuji pouze pěti nejlukrativnějším trojúhelníkům a jednomu zajímavému kvůli jeho odlišným vlastnostem (USDT/BTC/BCH). Nevěnuji se všem trojúhelníkům splňujícím spodní podmínku výdělečnosti, protože mají velmi podobné vlastnosti. Tabulky k ostatním trojúhelníkům jsou uvedeny v příloze (v Jupyter notebooku, v části *statistics* viz podkapitola 3.3.4).

Je zajímavé si povšimnout, že ve všech nejzajímavějších trojúhelnících figuruje USD Tether, zástupce stabilní měny odpovídající americkému dolaru.

4.3.2 Bližší statistiky

V této sekci uvádím konkrétní statistiky k vybraným zajímavým trojúhelníkům. Statistiky ve formě tabulek a grafů ve stejném formátu ke všem ostatním trojúhelníkům jsou k dispozici v příloze (v Jupyter notebooku, v části *statistics* viz podkapitola 3.3.4).

4.3.2.1 Trojúhelník USDT/EOS/BNB

Trojúhelník USDT/EOS/BNB je z pohledu potenciálního zisku nejlepší. Je však nutné podotknout, že pro zobchodování některých příležitostí by bylo nutné provést velmi velké transakce. Například na nejvýhodnější příležitosti bylo možné vydělat 460,43 EOS (1123,44 USD) viz tabulka 4.5. Touto nejvýdělečnější transakcí bylo možné vydělat více než 6,6 % celkového potenciálního

4. ANALÝZA DAT

Tabulka 4.4: Průměrné hodnoty arbitrážních příležitostí na nejlepších trojúhelnících

Trojúhelník	Průměrný denní počet	Denní neefektivita (USD)
USDT/EOS/BNB	18,229885	178,275337
USDT/BTC/EOS	13,367816	119,398452
USDT/BNB/XMR	28,941176	110,203404
USDT/BTC/TRX	6,333333	107,701177
USDT/BTC/XRP	14,402299	105,479562
USDT/XRP/BNB	12,850575	103,500200
USDT/BTC/LTC	12,908046	99,747878
USDT/LTC/BNB	17,712644	86,332007
USDT/BCH/BNB	19,364706	84,520560
USDT/BTC/XMR	20,413793	53,185018
USDT/XRP/TRX	30,952941	24,069804
USDT/BTC/BNB	7,016667	20,742392
USDT/BTC/ETH	3,683333	19,901603
USDT/BTC/BCH	4,633333	17,886043

zisku za téměř tři měsíce. Pro uskutečnění takto velké transakce je však nutné zobchodovat obrovské množství peněz (14 745 EOS tedy asi 35 977 USD).

Tento trojúhelník má i nadprůměrně dlouhou dobu trvání výskytu pozitivní arbitrážní příležitosti 0,41 s (průměr činí 0,35 s a medián 0,25 s). Zajímavé je, že k získání poloviny celkového pozorovaného potenciálního zisku stačilo zobchodovat pouze 12 arbitrážních příležitostí s nejvyšším absolutním ziskem. Zbýlých 2681 arbitrážních příležitostí tvořilo druhou necelou polovinu celkového potenciálního zisku.

Průměrně se každý den vyskytne na tomto trojúhelníku přes 18 arbitrážních příležitostí, toto číslo je však velmi ovlivněno lokálními výkyvy (viz graf 4.7), a proto denní medián výskytu činí pouhý 1 výskyt za den.

4.3.2.2 Trojúhelník USDT/BTC/EOS

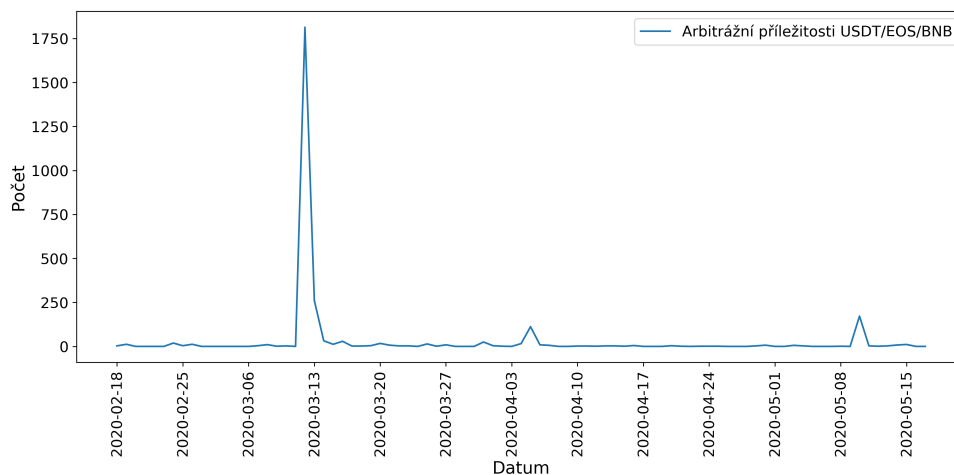
Trojúhelník USDT/BTC/EOS je z pohledu potenciálního zisku druhým nevýdělečnějším. Oproti trojúhelníku USDT/EOS/BNB je vyváženější z hlediska výkyvů ve velikosti příležitostí. Nejvýdělečnější transakce zahrnuje pouze 2,5 % celkového potenciálního zisku (viz tabulka 4.6). Tento trojúhelník má podprůměrně dlouhou dobu trvání výskytu pozitivní arbitrážní příležitosti 0,33 s (průměr činí 0,35 s a medián 0,25 s).

Průměrně se každý den vyskytne na tomto trojúhelníku přes 13 arbitrážních příležitostí. Toto číslo je však velmi ovlivněno lokálními výkyvy (viz graf 4.8), a proto denní medián nečiní žádný výskyt.

4.3. Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků

Tabulka 4.5: Základní statistiky trojúhelníku USDT/EOS/BNB

Název	Hodnota
Název	USDT/EOS/BNB
Počet dní	87
Průměrný denní počet arbitráží	18,229885057471265
Medián denního počtu arbitráží	1,0
Průměrný procentuální zisk	1,0006779030220183
Nejvyšší procentuální zisk	1,099279716
Celkový potenciální zisk	6356,538645 EOS
Celkový potenciální zisk (USD)	15509,954293092293
Průměrný denní potenciální zisk	73,063663 EOS
Průměrný denní potenciální zisk (USD)	178,27533670221027
Nejvyšší potenciální zisk	460,426732 EOS
Nejvyšší potenciální zisk (USD)	1123,441226324
Průměrná doba trvání	0,4055661658894621
Celkový počet příležitostí	2693
Počet příležitostí k zisku poloviny celkového zisku	12

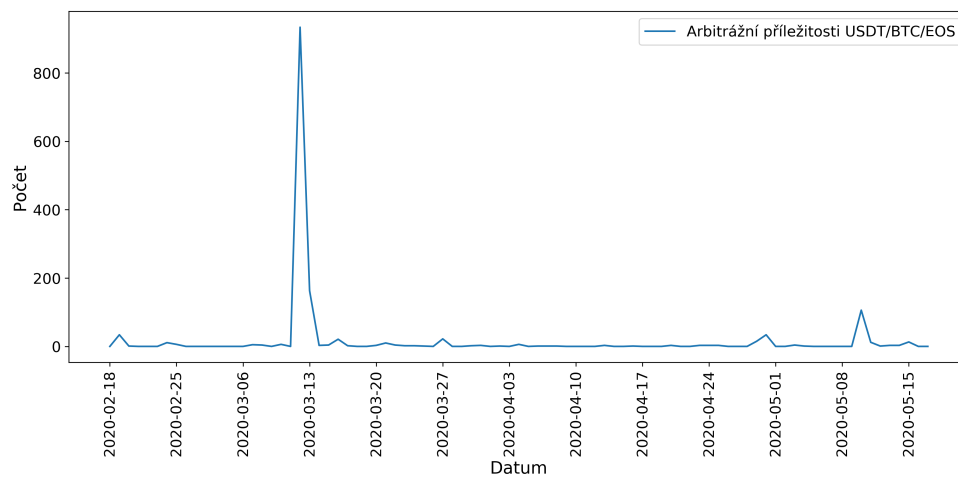


Obrázek 4.7: Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/EOS/BNB

4. ANALÝZA DAT

Tabulka 4.6: Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/EOS

Název	Hodnota
Název	USDT/BTC/EOS
Počet dní	87
Průměrný denní počet arbitráží	13,367816091954023
Medián denního počtu arbitráží	0,0
Průměrný procentuální zisk	1,0006232934708796
Nejvyšší procentuální zisk	1,073843096
Celkový potenciální zisk	4257,239874 EOS
Celkový potenciální zisk (USD)	10387,665291761892
Průměrný denní potenciální zisk	48,933792 EOS
Průměrný denní potenciální zisk (USD)	119,39845162944702
Nejvyšší potenciální zisk	95,706220 EOS
Nejvyšší potenciální zisk (USD)	233,5231760436
Průměrná doba trvání	0,3288854242482326
Celkový počet příležitostí	1461
Počet příležitostí k zisku poloviny celkového zisku	47



Obrázek 4.8: Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/EOS

4.3. Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků

Tabulka 4.7: Základní statistiky trojúhelníku USDT/BNB/XMR

Název	Hodnota
Název	USDT/BNB/XMR
Počet dní	85
Průměrný denní počet arbitráží	28,941176470588236
Medián denního počtu arbitráží	1,0
Průměrný procentuální zisk	1,000667765324073
Nejvyšší procentuální zisk	1,12956548
Celkový potenciální zisk	175,516008 XMR
Celkový potenciální zisk (USD)	9367,289327623277
Průměrný denní potenciální zisk	2,064894 XMR
Průměrný denní potenciální zisk (USD)	110,20340385439151
Nejvyšší potenciální zisk	8,434635 XMR
Nejvyšší potenciální zisk (USD)	450,15648003692996
Průměrná doba trvání	0,33822535252042407
Celkový počet příležitostí	4349
Počet příležitostí k zisku poloviny celkového zisku	16

4.3.2.3 Trojúhelník USDT/BNB/XMR

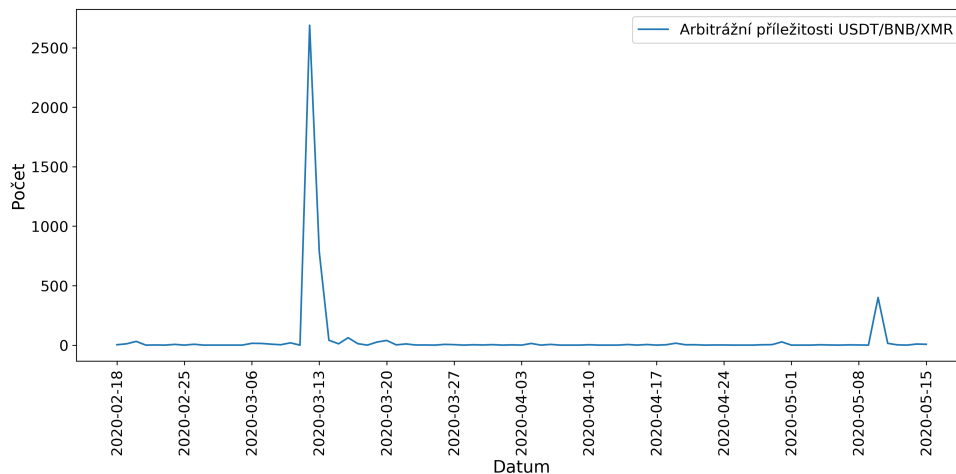
Trojúhelník USDT/BNB/XMR je třetím nejvýdělečnějším trojúhelníkem a svými vlastnostmi se velmi podobá předchozím dvěma trojúhelníkům. Průměrný denní počet výskytů (téměř 29 za den) také velice převyšuje denní medián výskytů, pouze 1 (viz tabulka 4.7 a graf 4.9). Trojúhelník má téměř průměrnou dobu výskytu pozitivní arbitrážní příležitosti 0,34 s (průměr činí 0,35 s a medián 0,25 s).

Zajímavou hodnotou na tomto trojúhelníku je, že z celkových 4349 pozitivních arbitrážních příležitostí pokrylo polovinu celkového potenciálního zisku pouze 16 arbitráží (0,37 % arbitrážních příležitostí pokrylo více než 50 % celkového potenciálního zisku).

4.3.2.4 Trojúhelník USDT/BTC/TRX

Trojúhelník USDT/BTC/TRX je čtvrtým nejvýnosnějším trojúhelníkem a svými vlastnostmi je opět velmi podobný všem výše zmíněným (viz tabulka 4.8). Denní průměr výdělku je poměrně vysoký (105 USD) na to, že se průměrně za den objeví pouze necelých sedm arbitrážních příležitostí. Medián výskytu arbitrážních příležitostí je 0, tedy během většiny dní se na tomto trojúhelníku nic zajímavého neděje. Nejvýnosnější arbitrážní příležitostí bylo možné vydělat 5,5 % celkového potenciálního zisku za pozorovanou dobu.

4. ANALÝZA DAT

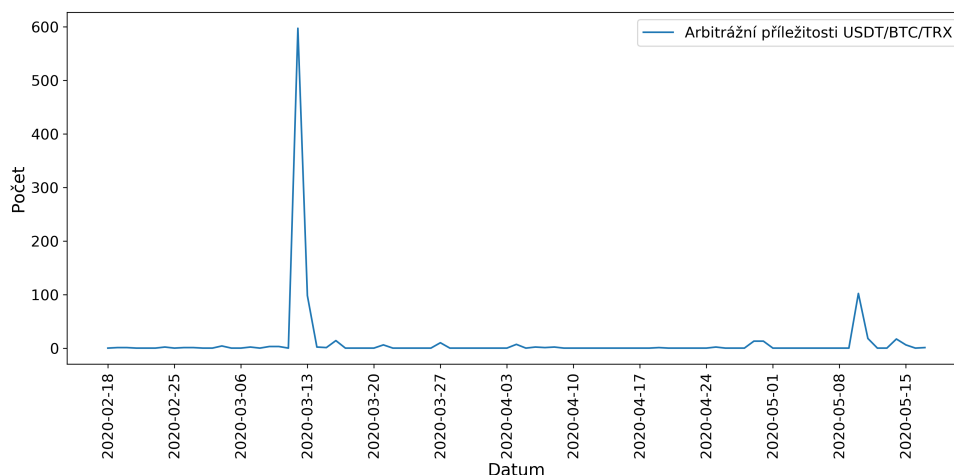


Obrázek 4.9: Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USD/BNB/XMR

Tabulka 4.8: Základní statistiky trojúhelníku USD/BTC/TRX

Název	Hodnota
Název	USD/BTC/TRX
Počet dní	87
Průměrný denní počet arbitráží	6,333333333333333
Medián denního počtu arbitráží	0,0
Průměrný procentuální zisk	1,0005667066046746
Nejvyšší procentuální zisk	1,081229127
Celkový potenciální zisk	743828,088170 TRX
Celkový potenciální zisk (USD)	9370,002426675057
Průměrný denní potenciální zisk	8549,748140 TRX
Průměrný denní potenciální zisk (USD)	107,7011773181041
Nejvyšší potenciální zisk	35482,621400 TRX
Nejvyšší potenciální zisk (USD)	446,97458177580006
Průměrná doba trvání	0,37257756079492343
Celkový počet příležitostí	931
Počet příležitostí k zisku poloviny celkového zisku	27

4.3. Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků



Obrázek 4.10: Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USD/BTC/TRX

4.3.2.5 Trojúhelník USD/BTC/XRP

Trojúhelník USD/BTC/XRP je z pohledu výše celkového potenciálního zisku pátý nejlepší. Trpí však podobnými problémy jako předchozí trojúhelníky. Denně se průměrně objevuje přes 14 arbitrážních příležitostí, avšak medián výskytu je nulový. Tedy během většiny dní se na trojúhelníku nic zajímavého neděje.

Vysoký rozdíl mezi průměrem a mediánem počtu výskytů je taktéž způsoben velkým výkyvem z 12. a 13. března 2020 (viz graf 4.11 a tabulka 4.9). Trojúhelník USD/BTC/XRP má víceméně průměrnou dobu pozitivních arbitrážních příležitostí, a to 0,38 s (průměr činí 0,35 s a medián 0,25 s).

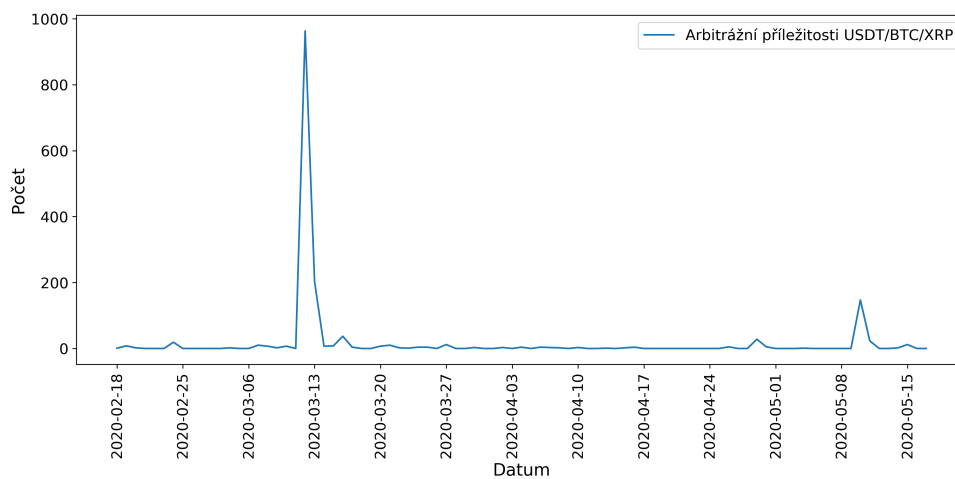
4.3.2.6 Trojúhelník USD/BTC/BCH

Trojúhelník USD/BTC/XRP je sice posledním trojúhelníkem splňujícím podmínku průměrné denní výdělnosti přes 10 amerických dolarů, je ale na druhou stranu zajímavý svými hodnotami. Celkově se na tomto trojúhelníku vyskytuje v průměru ani ne 5 pozitivních arbitrážních příležitostí denně. Zajímavý je tím, že na jeho nejvýdělečnější transakci bylo možné vydělat 0,61 BCH, což odpovídá 36,7 % celkového potenciálního zisku za měřený úsek (viz tabulka 4.10).

4. ANALÝZA DAT

Tabulka 4.9: Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/XRP

Název	Hodnota
Název	USDT/BTC/XRP
Počet dní	87
Průměrný denní počet arbitráží	14,402298850574713
Medián denního počtu arbitráží	0,0
Průměrný procentuální zisk	1,0005281433072273
Nejvyšší procentuální zisk	1,057942892
Celkový potenciální zisk	49346,499917 XRP
Celkový potenciální zisk (USD)	9176,721857055774
Průměrný denní potenciální zisk	567,201148 XRP
Průměrný denní potenciální zisk (USD)	105,47956157535371
Nejvyšší potenciální zisk	1226,628320 XRP
Nejvyšší potenciální zisk (USD)	228,1099355288
Průměrná doba trvání	0,38476166983032234
Celkový počet příležitostí	1572
Počet příležitostí k zisku poloviny celkového zisku	65

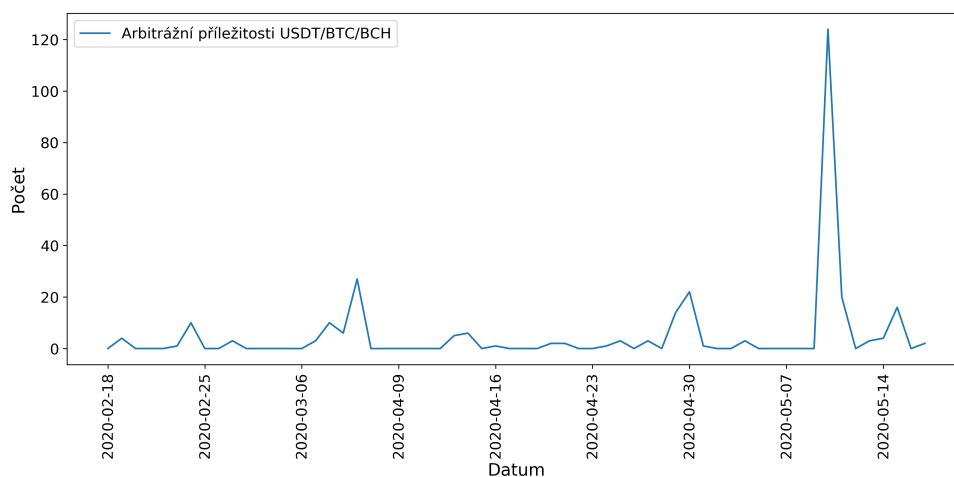


Obrázek 4.11: Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/XRP

4.3. Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků

Tabulka 4.10: Základní statistiky trojúhelníku USDT/BTC/BCH

Název	Hodnota
Název	USDT/BTC/BCH
Počet dní	60
Průměrný denní počet arbitráží	4,633333333333334
Medián denního počtu arbitráží	0,0
Průměrný procentuální zisk	1,0007975736975039
Nejvyšší procentuální zisk	1,03076856
Celkový potenciální zisk	4,812820 BCH
Celkový potenciální zisk (USD)	1073,1625924129744
Průměrný denní potenciální zisk	0,080214 BCH
Průměrný denní potenciální zisk (USD)	17,886043206882906
Nejvyšší potenciální zisk	0,611238 BCH
Nejvyšší potenciální zisk (USD)	136,29376486436797
Průměrná doba trvání	0,37848524100832015
Celkový počet příležitostí	296
Počet příležitostí k zisku poloviny celkového zisku	8



Obrázek 4.12: Vývoj arbitrážních příležitostí na trojúhelníku USDT/BTC/BCH

4.3.3 Zhodnocení nejlepších trojúhelníků

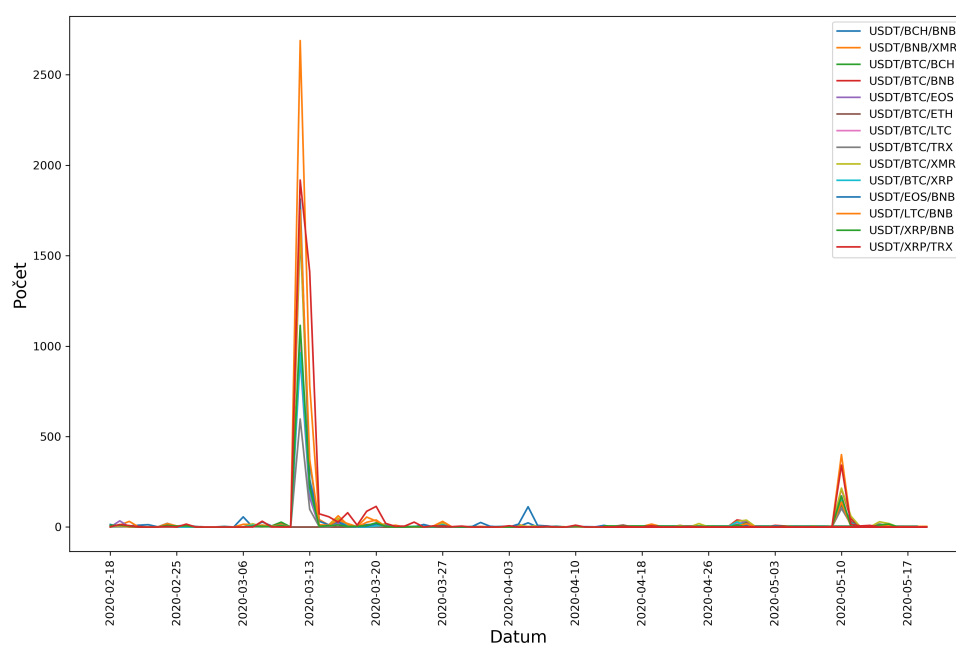
Z předchozích podkapitol, kde se blíže věnuji nejzajímavějším trojúhelníkům, vyplývá, že všechny mají velmi podobné vlastnosti, co se týče data výskytu i délky výskytu (viz spojený graf nejlepších trojúhelníků 4.13). Tento jev může být částečně způsobený tím, že ve všech trojúhelnících figuruje USD Tether.

Průměrná doba životnosti arbitrážní příležitosti v žádném případě ani nedosahuje jedné vteřiny, proto není reálně možné detekovat a vytěžit arbitrážní příležitosti ručně bez jakéhokoliv bota, který by se staral o detekci a následné vytěžování.

Dále je nutné podotknout, že pro zobchodování některých arbitrážních příležitostí by bylo nutné zobchodovat jmění o objemech několika desítek tisíc amerických dolarů. Jelikož na téměř všech výdělečných trojúhelnících figuruje USDT stačí mít teoreticky pro vytěžování většiny trojúhelníků velký obnos pouze v této měně.

Nějaké měnové páry jsou obsaženy v několika trojúhelnících, což může způsobit efekt, že například při větším výkyvu na jednom měnovém páru, může dojít k detekci rozdílných arbitrážních příležitostí na několika trojúhelnících se stejnou vychýlenou hodnotou. Reálně by pak tedy nebylo možné vytěžit všechny takto vzniklé arbitrážní příležitosti. Na trojúhelníky je však v této práci pohlíženo zvlášť, proto tento jev není prakticky řešen.

4.3. Konkrétní hodnoty nejzajímavějších trojúhelníků



Obrázek 4.13: Srovnání vývoje denního výskytu arbitrážních příležitostí na nejlepších trojúhelnících

Závěr

Cílem práce bylo zanalyzovat arbitrážní příležitosti kryptoměn a na základě reálných dat z kryptoměnových burz vyhodnotit základní statistiky výskytu a výdělečnosti.

V teoretické části jsem popsal historii Bitcoinu, rozebral jsem jeho princip a základní technologie. Dále jsem se zaměřil na několik altcoinů a několik kryptoměnových burz a zaobíral jsem se tématem arbitrážních příležitostí.

V praktické části jsem úspěšně implementoval program, který sbíral data z burzy Binance. Na datech jsem následně vyhledával trojúhelníkové arbitrážní příležitosti, které jsem v poslední části své bakalářské práce vyhodnocoval.

Po nalezení arbitrážních příležitostí jsem se v rámci analytické části věnoval statistikám výskytů a výdělečnosti arbitrážních příležitostí, ke kterým jsem využíval tabulky a grafy vytvořené z nasbíraných dat. Zabýval jsem se selekcí těch nejlepších trojúhelníků z pohledu jejich výdělečnosti a potenciální vytěžitelnosti.

Ze statistik jsem zjistil, že problematika trojúhelníkových arbitrážních příležitostí je stále aktuální a je na ni možné vydělat poměrně velké množství peněz. Úkol vydělávání se však nyní stává náročnější z důvodu krátké životnosti arbitrážních příležitostí, kterou člověk nemá šanci sledovat dostatečně rychle bez využití počítačové síly.

Práci je možné dále rozšířit, převážně části závisující na sběru dat. V rámci bakalářské práce jsem neměl dostatek času na vytvoření větší datové kolekce a tří měsíční data nebyla dostatečně rozmanitá k vyhodnocení některých závěrů převážně v částech hodnotících korelace s arbitrážními příležitostmi.

V rámci své práce jsem se nevěnoval reálnému vytěžování pozitivních arbitrážních příležitostí, které si však plánuji na základě zjištěných závěrů v budoucnu vytvořit. Data ze skutečného vytěžování arbitrážních příležitostí by bylo také zajímavé zahrnout do analytické části práce.

Bibliografie

1. ŠKAPA, Jan. *Kryptoměny a budoucnost finančních trhů* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=144519. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská. Vedoucí práce Jan BUDÍK.
2. *Bitcoin (BTC) – Kurz, graf ceny, těžba, peněženka, nákup*. [online]. Magazín Finex, 2017 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://finex.cz/kryptomena/bitcoin/>.
3. *How does Bitcoin work?* [online]. Bitcoin org., 2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://bitcoin.org/en/how-it-works>.
4. *Blockchain – Co je blockchain a jak funguje?* [online]. Magazín Finex [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://finex.cz/blockchain/>.
5. ANTONOPOULOS, Andreas M. *Mastering Bitcoin* [online]. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472, 2015 [cit. 2020-05-11]. ISBN 978-1-449-37404-4. Dostupné z: <https://unglueit-files.s3.amazonaws.com/ebf/05db7df4f31840f0a873d6ea14dcc28d.pdf>.
6. PEČEV, Adam. *Cryptocurrencies Exchange Rates Reporting Tool* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82697/F8-DP-2019-PecEV-Adam-thesis.pdf>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Štěpán STAROSTA.
7. MALÝ, Vojtěch. *Co je to litecoin* [online]. Živě, 2017 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/co-je-to-litecoin/sc-3-a-190910/default.aspx>.
8. GALVÁNEK, Matej. *Monero (VŠE, CO CHCETE VĚDĚT) – Kryptoměna, která nabízí úplnou anonymitu* [online]. Alza, 2018 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/monero>.

9. *Binance exchange market* [online]. Binance, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.binance.com/en/markets>.
10. *BITCOIN VS ETHEREUM: DIFFERENCES, ADVANTAGES AND DISADVANTAGES – WHICH IS BETTER?* [online]. Bitcoinist, 2017 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://bitcoinist.com/bitcoin-vs-ethereum/>.
11. *Co je to Ethereum?* [online]. Virtual Property, 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.virtualproperty.cz/detail-clanku/co-je-to-ethereum-%5C%3F/>.
12. *Ripple (VŠE, CO CHCETE VĚDĚT)*. [online]. Alza, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/ripple-xrp>.
13. SCHWARTZ, David; BRITTO, Arthur; YOUNGS, Noah. *The Ripple Protocol Consensus Algorithm* [online]. 2018 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://ripple.com/files/ripple_consensus_whitepaper.pdf.
14. *XRP Avg. Transaction Fee historical chart* [online]. bitinfocharts, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://bitinfocharts.com/comparison/xrp-transactionfees.html%5C#1y>.
15. BOLD, David. *Why Is Ripple So Much Faster than Bitcoin?* [online]. Coincodex, 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://coincodex.com/article/3365/why-is-ripple-so-much-faster-than-bitcoin/>.
16. *Bitcoin Cash - BCH/Bitcoin Cash kurz*. [online]. kurzycz, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kryptomeny/bitcoin-cash/>.
17. *EOS (EOS) – Kurz, graf ceny, kde koupit*. [online]. Finex, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://finex.cz/kryptomena/eos/>.
18. ŠÍSTEK, Martin. *Binance coin (BNB)*. [online]. 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.martinsistek.cz/binance-coin/>.
19. *TRON (TRX) – Kurz, graf ceny, kde koupit kryptoměnu*. [online]. Finex, 2020 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://finex.cz/kryptomena/tron/>.
20. *Stable coin – token stálé hodnoty* [online]. Mladý Investor, 2019 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://mladyinvestor.cz/stable-coin-token/>.
21. *CoinMate exchange: fees, volume, charts and market trading* [online]. Coin360, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://coin360.com/exchange/coinmate>.
22. *Top 100 Cryptocurrency Exchanges by Trade Volume* [online]. CoinMarketCap, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://coinmarketcap.com/rankings/exchanges/reported/>.

-
23. *FIAT payment options re-establishment*. [online]. Crypto Wisser, 2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.cryptowisser.com/exchange/lbank/>.
 24. *EXCHANGE REVIEW CoinMate* [online]. Crypto Wisser, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.cryptowisser.com/exchange/coinmate/>.
 25. *Coinmate - Agregated trading fees* [online]. Coinmate, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://coinmate.io/fees>.
 26. DOB, Daniel. *Binance Review: The World's Leading Cryptocurrency Exchange?* [online]. Blockonomi, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://blockonomi.com/binance-review/>.
 27. *Fee Schedule*. [online]. Binance, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.binance.com/en/fee/deposit>.
 28. *Exchange spot > MXC* [online]. CoinGecko, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.coingecko.com/en/exchanges/mxc>.
 29. *EXCHANGE REVIEW MXC*. [online]. Crypto Wisser, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.cryptowisser.com/exchange/mxc/>.
 30. *Fees - MXC - Bitcoin, Litecoin and Ethereum Exchange and Margin*. [online]. MXC, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.mxct.top/info/fee>.
 31. *EXCHANGE REVIEW BitForex*. [online]. Crypto Wisser, 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.cryptowisser.com/exchange/bitforex/>.
 32. *Withdrawal Fees*. [online]. BitForex, 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.bitforex.com/en/Fees>.
 33. *EXCHANGE REVIEW LBank*. [online]. Crypto Wisser, 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.cryptowisser.com/exchange/lbank>.
 34. *Efektivita trhu* [online]. ITBIZ, 2015 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.itbiz.cz/slovník/ekonomie/efektivita-trhu>.
 35. ZEMAN, Petr. *Efektivnost trhu a automatické obchodní systémy* [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://theses.cz/id/fuzrn6/Disertan_prce.pdf. Disertační práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ekonomická fakulta. Vedoucí práce Milan JÍLEK.
 36. LIOUDIS, NICK K. *What Is Arbitrage?* [online]. Investopedia, 2019 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/ask/answers/what-is-arbitrage/>.
 37. *Arbitráž* [online]. Capital, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://capital.com/cs/arbitraz-definice>.

38. CHEN, James. *Currency Arbitrage* [online]. Investopedia, 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/c/currency-arbitrage.asp>.
39. FALK, Tim. *The straightforward guide to cryptocurrency arbitrage* [online]. Finder, 2019 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.finder.com/ca/cryptocurrency-arbitrage>.
40. *Měnový pár* [online]. Capital, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://capital.com/cs/menovy-par-definice>.
41. *Arbitráže na kryptoměnách – dají se s nimi vydělávat peníze?* [online]. CZInvestor, 2017 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://czinvestor.cz/forex/kryptomeny/arbitraze-kryptomenach-daji-se-nimi-vydelavat-penize>.
42. SÁNCHEZ, Luis Miguel. *Data Science and Cryptocurrency arbitrage: How to profit from it* [online]. Towards Data Science, 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/cryptocurrency-arbitrage-how-to-profit-from-it-e2d7bf805fde>.
43. *Cryptocurrency Arbitrage: A Lucrative Trading Strategy* [online]. Shrimpy, 2019 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://blog.shrimpy.io/blog/cryptocurrency-arbitrage-a-lucrative-trading-strategy>.
44. *Public Rest API for Binance (2020-04-25)* [online]. GitHub Inc., 2020 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://github.com/binance-exchange/binance-official-api-docs/blob/master/rest-api.md>.
45. *Bitforex-aio 1.0.2* [online]. PyPi, 2020 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/bitforex-aio/>.
46. *GitHub – LBank-exchange/lbank-official-api-docs* [online]. GitHub Inc., 2020 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://github.com/LBank-exchange/lbank-official-api-docs>.
47. *CoinMate.io Trading Portal API* [online]. Apiary, 2020 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://coinmate.docs.apiary.io/>.
48. *Web Socket API for MXC (2019-06-25)* [online]. GitHub Inc., 2019 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://github.com/mxcdevelop/APIDoc/blob/master/websocket/websocket-api.md>.

Seznam použitých zkratek

BTC Bitcoin

LTC Litecoin

ETH Ethereum

TRX TRON

XMR Monero

USDT USD Tether

BNB Binance Coin

BCH Bitcoin Cash

XRP Ripple

API Application Program Interface

Obsah přiloženého CD

README.md.....	stručný popis obsahu
data_collection	
├─ getbook.py.....	spustitelný skript sběru dat
├─ getbook.1.....	manuálová stránka sběru dat
data_cleanup	
├─ cleanup.py.....	spustitelný skript čištění dat
├─ cleanup.1.....	manuálová stránka čištění dat
selection.....	adresář se zdrojovými kódy selekce dat včetně s Makefile
statistics	
├─ statistics.ipynb.....	Jupyter notebooku se statistikami arbitráží
├─ output_data.....	adresáře s JSON soubory nalezených arbitráží
├─ output_data.....	adresáře s \LaTeX soubory tabulek v práci
├─ images.....	obrázky vygenerované z Jupyter notebooku
teorie.....	text práce
├─ thesis.pdf.....	text práce ve formátu PDF