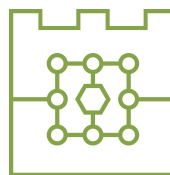




**Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki**

Wydział Informatyki i Telekomunikacji



Michał Mrozek

numer albumu: 142907

**Badanie korelacji zmian cen na giełdach
kryptowalut**

Tytuł pracy po angielsku

praca inżynierska

**na kierunku Matematyka stosowana
specjalność analityk danych**

Praca przygotowana pod kierunkiem:
dr Marcina Wątorka

Kraków, 2025

Spis treści

Wstęp	5
1. Opis kryptowalut i giełd kryptowalut	7
1.1. Początki kryptowalut i ich rozwój	7
1.2. Technologia stojąca za kryptowalutami	11
1.2.1. Blockchain Bitcoina	12
1.2.2. Algorytmy konsensusu	13
1.3. Handel kryptowalutami	15
2. Część teoretyczna	18
2.1. Szereg czasowy	18
2.2. Stopy zwrotu	18
2.3. Macierz korelacji	20
2.4. Wartości własne	21
2.5. Rozkład wartości własnych	22
2.6. Składowe wektora własnego	22
2.7. Macierz losowa korelacji	23
3. Przebieg badania	25
3.1. Opis danych i metodyka badań	25
4. Wyniki i wnioski	29
4.1. Interpretacja macierzy korelacji	29
4.2. Interpretacja rozkładu wartości własnych	33
4.3. Wnioski	37
Podsumowanie	38
Bibliografia	40
Spis rysunków	44
Spis tabel	45

Wstęp

Kryptowaluty stanowią jedną z najnowszych innowacji w dziedzinie finansów i technologii. W ostatnich latach rynek ten dynamicznie się rozwinął za sprawą możliwości oferowanych przez technologię blockchain. Kluczową rolę odegrał Bitcoin, pierwsza wirtualna waluta, która wykazała potencjał tej technologii poprzez zapewnienie bezpiecznych i przejrzystych transakcji bez pośredników. Szybki rozwój kryptowalut przełożyło się na rosnące zainteresowanie inwestorów, zarówno indywidualnych, jak i instytucjonalnych, którzy dostrzegli potencjalne korzyści finansowe związane z inwestycjami w kryptowaluty. Obecnie istnieje ponad 9000 aktywnych kryptowalut notowanych na giełdach na całym świecie, a całkowita kapitalizacja rynkowa w listopadzie 2024 roku wyniosła ponad 3 biliony dolarów [2, 3]. Zainteresowanie kryptowalutami rośnie, jednakże rynek ten pozostaje stosunkowo niewielki w porównaniu do globalnych rynków akcji, których kapitalizacja oscylowała w granicach 109 bilionów dolarów w drugim kwartale 2023 roku [4]. Ze względu na brak centralnego nadzoru i regulacji, rynek kryptowalut charakteryzuje się znaczną zmiennością cen. W odróżnieniu od tradycyjnych giełd, które są ściśle regulowane i zlokalizowane geograficznie, giełdy kryptowalut działają globalnie i są bardziej zdecentralizowane. Rynek kryptowalut reaguje na inne czynniki niż tradycyjne rynki finansowe, w tym zmiany regulacyjne dotyczące technologii blockchain, postęp technologiczny, a także spekulacje inwestorów, co prowadzi do gwałtownych wahań cen. W tym kontekście analiza korelacji na rynkach kryptowalut dostarcza cennych informacji na temat współzależności między poszczególnymi aktywami. Na tradycyjnych rynkach finansowych korelacje są szeroko stosowane w zarządzaniu ryzykiem i dywersyfikacji portfela. Podobne podejście można zaobserwować również na rynku kryptowalut, gdzie badanie korelacji koncentruje się na analizie wpływu zmienności cen jednej kryptowaluty na inne. W niniejszej pracy przeanalizowano korelacje kursów kryptowalut na dwóch giełdach, Binance i Bybit, w celu oceny, czy między nimi występują istotne różnice. Przeanalizowane zostaną różnice w korelacjach kursów na obu giełdach, co pozwoli na lepsze zrozumienie dynamiki rynku oraz identyfikację czynników dominujących wpływających na jego zmienność. Badanie to może dostarczyć istotnych informacji zarówno inwestorom, jak i badaczom, pomagając zrozumieć, w jaki sposób rynki kryptowalut reagują na zmiany lokalne i globalne oraz jakie są konsekwencje tych zmian dla całego rynku cyfrowych aktywów.

W pierwszym rozdziale pracy zostanie przedstawione, czym są kryptowaluty oraz jakie funkcje pełnią giełdy kryptowalutowe. Wyjaśnione zostaną również kluczowe pojęcia związane z technologią stojącą za kryptowalutami, takie jak blockchain, która jest podstawą działania kryptowalut. Szczególna uwaga zostanie poświęcona historii handlu

kryptowalutami, który początkowo był niewielki, ale z czasem rozwinął się dynamicznie, przyciągając inwestorów z całego świata. Zostaną przedstawione najważniejsze wydarzenia wpływające na rozwój tego rynku, takie jak powstanie pierwszych giełd kryptowalut, bańki spekulacyjne czy krachy.

Drugi rozdział stanowi matematyczne podłoże pracy, zawierając opisy wszystkich definicji i pojęć wykorzystanych w badaniu. Szczególną uwagę poświęcono macierzy korelacji oraz metodologii jej konstrukcji na podstawie szeregów czasowych stóp zwrotu stworzonych z kursów wymiany kryptowalut. Omówione zostaną również kluczowe pojęcia, takie jak wartości własne oraz rozkład składowych wektorów własnych. Przedstawiona zostanie także teoria dotycząca macierzy losowych Wisharta i ich rozkładu wartości własnych Marchenko-Pastura. Jest to istotny rozdział dla zrozumienia mechanizmów kształtujących korelacje na rynkach takich jak giełdy kryptowalut.

Trzeci rozdział zostanie poświęcony opisaniu przebiegu oraz metodyki badania. Badanie obejmie analizę korelacji cen między 40 parami kryptowalut dla obu już wcześniej wspomnianych giełd kryptowalut dla okresu od 1 stycznia 2024 roku do 10 listopada 2024 roku. Kryptowaluty zostały dobrane według kryterium największej kapitalizacji z uwzględnieniem tego, aby znajdowały się na obu giełdach (oraz miały wystarczającą płynność). Cały proces pobierania i przystosowywania danych do analizy korelacji, oraz cała analiza wraz z wizualizacjami został wykonany w języku Python. W celu analizy korelacji zastosowane zostaną metody statystyczne opisane w rozdziale drugim.

Czwarty rozdział będzie poświęcony szczegółowemu przedstawieniu wyników przeprowadzonych badań. Zostaną zaprezentowane zarówno wyniki analizy korelacji, jak i ich wizualizacje, co pozwoli na lepsze zrozumienie dynamiki zmian cen kryptowalut. W tej części pracy skupimy się na podsumowaniu kluczowych wyników analizy, wyciągnięciu końcowych wniosków oraz omówieniu ich praktycznych implikacji dla inwestorów. Zostaną również poruszone ograniczenia przeprowadzonych badań, takie jak mała płynność niektórych kryptowalut, które mogą wpływać na wiarygodność wyników. Dodatkowo rozważone będą kierunki przyszłych badań, w tym potencjalne zastosowania wyników w strategiach handlowych. Wyniki badań pozwolą na lepsze zrozumienie rynku kryptowalut mechanizmów, które nim kierują.

1. Opis kryptowalut i giełd kryptowalut

1.1. Początki kryptowalut i ich rozwój

Kryptowaluty to cyfrowe waluty służące jako środek wymiany, które wykorzystują kryptografię w celu zabezpieczenia transakcji, kontroli nowych jednostek oraz weryfikacji transferu aktywów. Główna różnica między kryptowalutami a tradycyjnymi walutami polega na tym, że kryptowaluty są zdecentralizowane i oparte na technologii blockchain, co oznacza, że nie są kontrolowane przez żaden centralny organ, taki jak rząd czy bank centralny. Blockchain to rozproszony rejestr, który umożliwia przechowywanie informacji o transakcjach w sposób przejrzysty i niezmienny. Pierwszą kryptowalutą, która zyskała na popularności, był Bitcoin, wprowadzony w 2009 roku przez anonimową osobę lub grupę osób pod pseudonimem Satoshi Nakamoto. Twórca jeszcze w 2008 roku opublikował dokument nazywany białą księgą o tytule "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" gdzie opisał zasadę działania technologii stojącej za Bitcoinem [6, 9]. Więcej o technologii stojącej za kryptowalutami będzie można przeczytać w podrozdziale, który będzie temu poświęcony. Bitcoin był początkowo używany głównie przez entuzjastów technologii jako alternatywna metoda płatności dla zwykłych walut. Przez pierwsze lata, ta cyfrowa waluta była przedmiotem spekulacji i eksperymentów, ale jego wartość zaczęła wzrastać gdy coraz więcej ludzi zaczęło dostrzegać potencjał tej technologii.

Z biegiem czasu zaczęło powstawać nowe kryptowaluty, nazywane altcoinami, które wprowadziły nowe funkcjonalności oraz usprawnienia. Kryptowaluty można podzielić ze względu na ich zastosowania. Możemy wyróżnić przede wszystkim kryptowaluty płatnicze takie jak wcześniej omówiony Bitcoin czy też Litecoin. Litecoin był jednym z pierwszych altcoinów, zaprojektowany z myślą o usprawnieniu funkcji Bitcoina. Dzięki skróceniu czasu wydobywania bloku do 2,5 minuty zwiększono również jego maksymalną podaż do 84 milionów monet, co stanowi czterokrotność wartości Bitcoina. W rezultacie limit wydobywania został zwiększony czterokrotnie do 84 milionów monet względem Bitcoina. Ponadto, zastosowanie funkcji skrótu Scrypt zamiast SHA-256 jak w przypadku sieci Bitcoin co wpłynęło na poprawę efektywności potwierdzania transakcji, a także zwiększa bezpieczeństwo i dostępność sieci [12].

Innym rodzajem kryptowalut są stablecoiny, czyli tokeny reprezentujące cyfrowe aktywa, których wartość jest powiązana z walutami fiducjarnymi, co zapewnia ich stabilność. Powstały one w odpowiedzi na potrzebę cyfrowej waluty o niskiej zmienności. Łączą one tradycyjne finanse z rynkiem kryptowalut, ułatwiając przeprowadzanie transakcji i stabilizując rynki dzięki powiązaniu z walutami walut fiducjarnych (fiat), co znacznie zmniejsza ich zmienność. Tether (USDT), jako pierwsza tego typu cyfrowa waluta, został uruchomiony w 2014 roku, i opierał się na relacji swojej wartości z dolarem

amerykańskim w stosunku 1 do 1 [14]. Wkrótce potem pojawiły się inne tego typu tokeny, jak USD Coin (USDC), które stały się wsparciem dla zdecentralizowanych finansów (DeFi) oraz popularną alternatywą dla walut fiducjarnych na giełdach kryptowalutowych. Wprowadzenie stablecoinów zrewolucjonizowało handel na giełdach kryptowalut, oferując stabilność cen, łatwość transakcji i zwiększoną płynność, co przyczyniło się do szerszej adopcji kryptowalut [15].

Kolejną kategorią kryptowalut są platformy blockchain, obsługujące inteligentne kontrakty. Platformy tego typu, posiadają swoje natywne tokeny, które pełnią rolę środka płatniczego w ich ekosystemie, ale ich głównym celem jest zapewnienie infrastruktury dla aplikacji zdecentralizowanych (dApps) oraz wdrażanie zaawansowanych mechanizmów automatyzacji procesów. Jednym z pierwszych takich projektów było Ethereum, które zostało uruchomione w 2015 roku, umożliwiając programowanie i automatyzację transakcji na blockchainie. Ethereum umożliwia programowanie i automatyzację procesów za pomocą inteligentnych kontraktów, które są samo wykonującymi się umowami zaprogramowanymi bezpośrednio na blockchainie, co eliminuje potrzebę zaufanych pośredników, obniża koszty i zwiększa efektywność. Ethereum, zrewolucjonizowało rynek kryptowalut i blockchain, wprowadzając nie tylko możliwość przesyłania wartości, ale również budowania zaawansowanych zdecentralizowanych aplikacji bazujących na tej technologii. Dzięki temu, że aplikacje te działają na blockchainie Ethereum, a nie na centralnych serwerach są odporne na cenzurę, a ich kod jest otwarty, co przekłada się na wzrost zaufania wśród użytkowników [17, 18]. Ethereum wprowadziło standardy, które ułatwiły tworzenie tokenów. Najpopularniejszym jest standard ERC-20, który stał się fundamentem dla wielu projektów. Definiuje on zestaw funkcji i zasad, które musi mieć każdy token, aby działać na blockchainie Ethereum. Obejmuje to między innymi funkcje pozwalające na sprawdzanie salda tokenów danego użytkownika, przesyłanie tokenów między użytkownikami oraz zatwierdzanie innych kont do zarządzania tokenami w imieniu właściciela [19]. Wprowadzenie standardu ERC-20 znacząco ułatwiło tworzenie tokenów, co przyczyniło się do wzrostu projektów opartych na Ethereum. Zdecentralizowane aplikacje otworzyły przestrzeń dla wielu różnego rodzaju projektów o szerokim spektrum zastosowań. Największą popularność w ostatnich latach zyskały takich koncepcje jak wspomniane już wcześniej zdecentralizowane finanse DeFi a także NFT, czyli niewymienialne token. DeFi to koncepcja wykorzystująca inteligentne kontrakty do automatyzacji transakcji oraz do zarządzania aktywami, co zapewnia większą przejrzystość i dostępność usług finansowych.

Projekty DeFi oferują podobne funkcjonalności jak zdecentralizowane giełdy kryptowalut, czyli bezpośredni handel między użytkownikami oraz protokoły pożyczkowe, dzięki którym można uzyskać pożyczki zabezpieczone kryptowalutą. Projekty te oferują też takie funkcje jak staking, czyli lokowanie środków swoje kryptowaluty na określony czas, aby wspierać bezpieczeństwo sieci blockchain, za co otrzymują nagrody w postaci dodatkowych tokenów [19]. Dzięki projektom DeFi użytkownicy mają większy dostęp do różnorodnych usług finansowych bez konieczności polegania na tradycyjnych instytucjach bankowych, co pozwala na bardziej samodzielne i elastyczne zarządzanie finansami. Przykładami projektów DeFi działającymi na blockchainie Ethereum oferując zdecen-

tralizowane usługi finansowe, które nie wymagają pośredników są między innymi Aave, Compound czy Uniswap [20].

NFT to unikalne tokeny cyfrowe oparte na technologii blockchain, które reprezentują unikalną własność konkretnego zasobu. Chociaż funkcjonują na blockchainie podobnie jak kryptowaluty, to technicznie nie są „klasycznymi” kryptowalutami. W przeciwieństwie do kryptowalut takich jak Bitcoin czy Ethereum, które są wymienne i mają równą wartość, NFT są unikalne i nie mogą być wymieniane jeden do jednego. Mogą być jednak przedmiotem obrotu i wymieniane na pieniądze czy też kryptowaluty. Takim unikalną własnością konkretnego zasobu mogą być na przykład dzieło sztuki, muzyka, film, czy przedmiot w grze. W rezultacie NFT mogą reprezentować unikalną własność konkretnego zasobu, np. dzieła sztuki, muzyki, filmu czy przedmiotu w grze [21]. Oprócz aspektów związanych ze sztuką cyfrową, gram i monetyzacją treści cyfrowych, NFT-y oferują wyjątkowe właściwości, które czynią je doskonałym narzędziem do przechowywania danych. W miarę jak dokumenty papierowe są coraz bardziej zdigitalizowane, realne aktywa, takie jak dokumenty tożsamości, akty urodzenia, czy prawa własności, mogą skorzystać z tej nowej technologii, by zwiększyć swoje bezpieczeństwo oraz przejrzystość. Dzięki unikalności i transparentności, gdzie każda operacja jest dostępna dla wszystkich użytkowników blockchaina, NFT-y idealnie nadają się do tego celu [22].

Ethereum było pierwszą platformą blockchain, która wprowadziła zdecentralizowane aplikacje. Współcześnie wiele innych platform również obsługuje dApps, w tym Binance Smart Chain (BSC), Polkadot (DOT) oraz Solana (SOL). Binance Smart Chain wyróżnia się niższymi opłatami transakcyjnymi oraz szybszym czasem przetwarzania w porównaniu do Ethereum [23].

Polkadot został zaprojektowany z myślą o możliwości współpracy między różnymi sieciami blockchain, umożliwiając tworzenie aplikacji zdecentralizowanych, które mogą komunikować się z różnymi blockchainami [24].

Ostatni ze wspomnianych wyżej projektów tego typu, czyli Solana jest znana z wysokiej przepustowości oraz niskich opóźnień. Mimo rosnącej konkurencji Ethereum pozostaje liderem w zakresie dApps, co wynika z jego rozwiniętej społeczności deweloperów, szerokiego ekosystemu oraz długotrwałej stabilności technologicznej [25].

Obecnie istnieje ponad cztery tysiące projektów opartych na Ethereum, co czyni go jedną z najpopularniejszych platform dla nowych kryptowalut. Ethereum jest często wybierane ze względu na swoją elastyczność i zaawansowane funkcje smart kontraktów, co przyciąga deweloperów do tworzenia różnych projektów, w tym aplikacji DeFi, NFT i tokenów używanych w grach [26]. Wprowadzenie Ethereum było kluczowym momentem w historii kryptowalut, ponieważ umożliwiło rozwój wielu nowych zastosowań technologii blockchain, wykraczających poza jedynie przechowywanie i transfer wartości. Ethereum zdobyło swoją pozycję na rynku dzięki innowacyjności oraz wszechstronności swojego blockchainu, co przyciągnęło inwestorów i programistów. Od kilku lat Ethereum jest drugą największą kryptowalutą pod względem kapitalizacji, ustępując jedynie Bitcoinowi [2].

Kolejną odrębną grupą kryptowalut są tokeny użytkowe, które są stworzone specjalnie do wspierania ekosystemów blockchain. Tokeny te mają funkcje, które są unikalne

dla każdego projektu. Kryptowaluty te mogą być używane do uzyskiwania dostępu do produktów i usług na danej platformie. Wyróżniają się technicznymi aspektami, które zależą od specyfiki platformy, na której działają, oraz od ich inteligentnych kontraktów. Przykładami takich projektów są Binance Coin oraz Chainlink.

Binance Coin (BNB) to token użytkowy stworzony przez giełdę Binance. Początkowo działał jako token ERC-20 na blockchainie Ethereum, jednak później został przeniesiony na własny łańcuch Binance Chain, co umożliwiło szybsze transakcje oraz większą kontrolę nad infrastrukturą. BNB znajduje zastosowanie w obniżaniu opłat transakcyjnych na platformie Binance oraz jako metoda płatności na Binance Smart Chain (BSC). Binance Smart Chain to blockchain kompatybilny z Ethereum, umożliwiający tworzenie zdecentralizowanych aplikacji (dApps) oraz rozwój projektów DeFi, oferując jednocześnie szybki czas realizacji operacji i korzystne warunki dla użytkowników [27].

Chainlink (LINK) to token sieci Chainlink, która umożliwia połączenie danych zewnętrznych z inteligentnymi kontraktami na różnych platformach blockchain. Pełni rolę mostu, zapewniając bezpieczny transfer danych z rzeczywistego świata do blockchaina. Technologia Chainlink odgrywa kluczową rolę w wielu aplikacjach DeFi, oferując wiarygodne źródła danych. Token LINK, jako rozszerzenie standardu ERC-20 (ERC-677), umożliwia użytkownikom dokonywanie płatności za usługi w ekosystemie Chainlink, wspierając wewnętrzną gospodarkę sieci [28].

Tokeny użytkowe stają się coraz bardziej popularne w przestrzeni kryptowalutowej, ponieważ oferują dostęp do różnych funkcji, które pomagają rozwijać ekosystemy blockchain. Z technicznego punktu widzenia tokeny te są istotne, ponieważ dostosowują się do specyfiki platform i odpowiadają na potrzeby użytkowników danej sieci.

Ostatnią ważną grupą kryptowalut, która zostaną omówione w tym podrozdziale, są tokeny zarządzania. Tokeny te umożliwiają posiadaczom na bezpośredni udział w podejmowaniu kluczowych decyzji dotyczących danego ekosystemu blockchain. Są powszechnie używane między innymi w zdecentralizowanych finansach i działają zgodnie z zasadami zarządzania społecznościowego, gdzie głosy użytkowników wpływają na kierunek rozwoju platformy. Przykłady obejmują takie projekty jak Uniswap (UNI) i MakerDAO (DAI). W przypadku Uniswap, posiadacze tokenów UNI mają prawo głosować na zmiany w protokołach, takie jak modyfikacje opłat transakcyjnych lub sposoby dystrybucji nagród [29]. MakerDAO to z kolei platforma, która stworzyła stablecoin o nazwie DAI. DAI to token, którego wartość jest stabilna i ma odzwierciedlać wartość dolara amerykańskiego. Użytkownicy MakerDAO używają tokenów MKR, aby głosować nad kwestiami związanymi ze stabilnością DAI, na przykład nad wymaganiami dotyczącymi zabezpieczeń czy ustalaniem stóp procentowych [30]. Tokeny zarządzania są kluczowe dla idei decentralizacji, ponieważ dają użytkownikom kontrolę nad rozwojem projektów bez udziału centralnych władz. Każdy głos ma określoną wagę proporcjonalną do ilości posiadanych tokenów. Im więcej tokenów ktoś posiada, tym większy ma wpływ na rozwój danego projektu.

Obecnie rynek kryptowalut jest bardziej zróżnicowany i złożony niż kiedykolwiek wcześniej, z tysiącami aktywów kryptograficznych oraz różnorodnymi zastosowaniami technologii blockchain. W listopadzie 2024 roku wartość rynkowa wszystkich kryptowa-

lut przekroczyła 3 biliony USD, a Bitcoin wciąż pozostaje najpopularniejszym i najcenniejszym aktywem w tym segmencie [31]. Przemiany te pokazują, że kryptowaluty nie tylko zdobyły popularność jako alternatywna forma płatności, ale także jako innowacyjne rozwiązanie dla różnych problemów związanych z finansami i własnością w erze cyfrowej.

1.2. Technologia stojąca za kryptowalutami

Pierwsza idea stworzenia technologii znanej dzisiaj jako blockchain powstała jeszcze przed pojawieniem się kryptowalut. W 1991 roku Stuart Haber i W. Scott Stornetta zaproponowali system kryptograficznie zabezpieczonego łańcucha bloków, który miał na celu zapewnienie nienaruszalności dokumentów. Projekt skupiał się na opracowaniu technologii mającej zabezpieczać przed fałszerstwami, jednak ich wizja blockchainu nie znalazła wówczas szerokiego zastosowania. Pojawiły się między innymi pomysły wdrożenia technologii w sektorze bankowym i finansowy, jednak rynek cyfrowy nie był jeszcze w tych latach na tyle rozwinięty, a instytucje miały opory przed wprowadzeniem nowego rozwiązania [5].

Dopiero wraz z ogłoszeniem koncepcji Bitcoina w 2008 roku technologia blockchain została wykorzystana w praktyce. Stało się to za sprawą osoby lub grupy osób o pseudonimie Satoshi Nakamoto, które opublikowały dokument o tytule "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" [6]. Nakamoto wprowadził ulepszenia do struktury blockchain, wykorzystując strategię podobną do Hashcash, algorytmu stworzonego w 1997 roku przez Adama Backa. Mechanizm ten wymaga wykonania złożonych obliczeń matematycznych w celu rozwiązania kryptograficznego zadania, co według Backa mogło być wykorzystane między innymi do ograniczenia nadużyć, takich jak spam czy podwójne wydawanie pieniędzy w sieci [66]. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe było przechowywanie zapisów czasu i daty dodanych bloków bez potrzeby zatwierdzenia operacji przez centralny podmiot. Twórca bitcoina ustalił także limity czasowe, które regulują częstotliwość dodawania nowych bloków. W kolejnym roku technologia ta stała się kluczowym elementem pierwszej kryptowaluty, czyli Bitcoina, funkcjonując jako publiczny rejestr wszystkich transakcji dokonywanych w tej sieci. W ten sposób narodziła się idea pierwszej cyfrowej zdecentralizowanej waluty.

Blockchain jest technologią, która zrewolucjonizowała przesył i przechowywanie danych, będąc fundamentem działania kryptowalut. Zdecentralizowany charakter sieci był odpowiedzią na potrzebę stworzenia systemu umożliwiającego dokonywanie transakcji bez udziału zaufanych pośredników, takich jak banki. To właśnie brak pośredników sprawia, że blockchain jest technologią o dużym potencjale do zmieniania tradycyjnych modeli biznesowych, szczególnie w sektorze finansowym. W przypadku pierwszej kryptowaluty sieć blockchain umożliwiła przechowywanie i transferowanie jednostek wartości waluty cyfrowej w sposób bezpieczny i przejrzysty dzięki wglądowi do rejestru transakcji dla użytkowników sieci.

1.2.1. Blockchain Bitcoina

Blockchain Bitcoina działa na podstawie sieci węzłów, którymi są komputery uczestniczące w procesie weryfikacji transakcji oraz przechowuje pełne kopie rejestru transakcji. Dzięki temu blockchain jest odporny na manipulacje, ponieważ zmiana jednego bloku w łańcuchu wymagałaby zmiany wszystkich kolejnych bloków, co jest praktycznie niemożliwe do wykonania, ponieważ wymagałaby ogromnych mocy obliczeniowych. Technologia blockchain opiera się na kilku kluczowych rozwiązaniach, które zapewniają jej niezawodność, bezpieczeństwo oraz funkcjonalność. Podstawą działania sieci jest kryptografia, która zapewnia bezpieczeństwo i integralność danych. Funkcją kryptograficzną, używaną w technologii blockchain jest haszowanie. Każda transakcja i blok są przekształcane przez funkcję haszującą, co tworzy unikalny, nieodwracalny ciąg znaków. Nawet mała zmiana danych powoduje całkowitą zmianę w wyniku funkcji haszującej, co skutecznie uniemożliwia ingerencję w zapisy bez natychmiastowego wykrycia. W przypadku Bitcoina stosowana jest funkcja haszująca SHA-256, która odgrywa kluczową rolę w zabezpieczaniu sieci [7].

Kluczowym mechanizmem sieci jest kryptografia asymetryczna, polega ona na wykorzystaniu pary kluczy: publicznego i prywatnego. Użytkownicy sieci korzystają z klucza prywatnego do podpisywania transakcji, co gwarantuje ich autentyczność, oraz prywatność użytkownika dzięki temu, że dane są zaszyfrowane. Natomiast klucz publiczny daje możliwość innym użytkownikom sieci weryfikowania tych transakcji. Transakcje w blockchainie są grupowane w bloki, które są połączone w łańcuch w taki sposób, że każdy blok zawiera skrót nagłówka poprzedniego bloku, co tworzy łańcuch bloków. Bloki są dodawane do łańcucha po ich zweryfikowaniu przez węzły sieci, co zapewnia integralność danych. Użytkownicy sieci blockchain przesyłają transakcje za pomocą oprogramowania, takiego jak aplikacje komputerowe, portfele cyfrowe czy usługi internetowe. Te transakcje trafiają do węzłów w sieci blockchain, które mogą być węzłami publikującymi lub niepublikującymi. Po przesłaniu transakcje są rozsyłane do innych węzłów, jednak to nie oznacza automatycznego dodania ich do łańcucha bloków. Zanim transakcja zostanie dołączona do łańcucha, musi poczekać w kolejce na weryfikację przez węzeł publikujący, który doda nowy blok. Ważność i autentyczność transakcji jest potwierdzana przez sprawdzenie, czy została poprawnie sformatowana i podpisana kryptograficznie przez nadawcę posiadającego klucz prywatny. Po zweryfikowaniu transakcji tworzony jest blok, który zawiera nagłówek z podstawowymi informacjami o bloku oraz listę zweryfikowanych transakcji. Pozostałe węzły sprawdzają poprawność bloku, odrzucając go, jeśli zawiera nieprawidłowe transakcje. W przypadku zmiany zawartości opublikowanego wcześniej bloku jego skrót uległby zmianie, a to z kolei zmieniłoby skróty wszystkich kolejnych bloków, ponieważ każdy zawiera odniesienie do poprzedniego bloku. Ten mechanizm umożliwia łatwe wykrywanie i odrzucanie zmodyfikowanych bloków, co zwiększa bezpieczeństwo i niezmiennosc danych w łańcuchu [5, 7].

1.2.2. Algorytmy konsensusu

Wszystkie transakcje w blockchainie muszą być zatwierdzone przez węzły za pomocą mechanizmu konsensusu, na którym opiera się ta technologia. Węzły to komputery uczestniczące w sieci blockchain, które przechowują kopię całego łańcucha bloków i biorą udział w procesie weryfikacji transakcji. Mechanizm ten zapewnia zgodność węzłów co do tego, które transakcje są prawidłowe i mogą być dodane do łańcucha. Jednym z mechanizmów konsensusu jest Proof of Work, który jest używany między innymi na sieci Bitcoin. W tym modelu węzły, zwane górnikiem, publikują następny blok, jako pierwszy rozwiązując wymagających obliczeniowo problemów kryptograficznych. Rozwiązanie problemu stanowi potwierdzenie, że górnik wykonał wymaganą pracę. Problemy są tak zaprojektowane, że ich rozwiązanie jest skomplikowane i czasochłonne, jednak samo sprawdzenie poprawności przez inne węzły jest stosunkowo proste. Pozwala to węzłom szybko weryfikować poprawność proponowanego bloku. Bloki zawierające błędne rozwiązania są natychmiast odrzucane. Weryfikacja ta wymaga znacznych zasobów obliczeniowych, co sprawia, że blockchain jest odporny na próby manipulacji, ponieważ każdy blok musi być zatwierdzony przez wiele węzłów, co praktycznie uniemożliwia zmienienie zapisanych danych oraz zapobiega podwójnemu wydawaniu tych samych jednostek kryptowaluty. Poziom skomplikowania problemów kryptograficznych w blockchainie, takich jak w sieci Bitcoin, jest dostosowywany poprzez mechanizm regulacji trudności. Co 2016 bloków (około co dwa tygodnie), trudność jest automatycznie dostosowywana w taki sposób, aby średni czas potrzebny do wydobywania nowego bloku wynosił 10 minut. Jeśli górnicy wydobywają bloki szybciej, trudność wzrasta, a jeśli wolniej, trudność zostaje zmniejszona, co pozwala na utrzymanie stabilnego tempa dodawania bloków do sieci [7].

Innym popularnym modelem konsensusu jest Proof of Stake (PoS). W sieciach blockchain opartych na tym modelu wysokość zainwestowanego udziału decyduje o tym, które węzły będą miały prawo do tworzenia nowych bloków. Udział w tym kontekście odnosi się do ilości kryptowaluty, którą użytkownik zablokował w sieci. Może to być realizowane na przykład poprzez specjalne transakcje lub przechowywanie środków w dedykowanych portfelach, które są używane do zabezpieczania sieci. Po wykonaniu tego procesu zablokowane środki nie mogą być wydane. Prawdopodobieństwo wyboru danego użytkownika do potwierdzenia i opublikowania bloku jest proporcjonalne do wartości jego zablokowanych środków w stosunku do całkowitej ilości kryptowaluty zablokowanej w sieci. Dzięki temu mechanizmowi nie ma potrzeby wykonywania skomplikowanych obliczeń wymagających dużych zasobów obliczeniowych, jak ma to miejsce w przypadku modelu Proof of Work (PoW). Ponieważ PoS zużywa znacznie mniej energii i zasobów, niektóre sieci blockchain zdecydowały się zrezygnować z nagród za tworzenie nowych bloków. W takich systemach, gdzie cała kryptowaluta została już rozdyskretywowana, nagrodą dla uczestników jest przede wszystkim otrzymywanie opłat transakcyjnych od użytkowników, zamiast nowo generowanych jednostek kryptowaluty, jak ma to miejsce w PoW [7]. Obecnie jedną z najbardziej znanych sieci blockchain, korzystającą z modelu Proof of Stake, jest Ethereum która w 2022 roku przeszła na tzw. Ethereum 2.0 [18]. W ramach tej aktualizacji Ethereum przeszło z Proof of Work na Proof of Stake. Dzięki temu sieć

stała się bardziej efektywna energetycznie i obniżyła zużycie zasobów obliczeniowych, co było jednym z głównych argumentów za zmianą.

W pracy przybliżono jedynie dwa modele konsensusu ze względu na ich kluczowe znaczenie w kontekście kryptowalut, choć należy nadmienić, że istnieje ich znacznie więcej i cały czas powstają nowe tworzone do różnego rodzaju zastosowań.

Obawy i przyszłość technologii Blockchain

Łańcuchy bloków nie są całkowicie odporne na ataki hakerskie ani scentralizowaną kontrolę, szczególnie te, którym brakuje solidnego ekosystemu uczestników sieci lub sprawdzonego mechanizmu konsensusu. Blockchajny różnią się poziomem decentralizacji i przepustowością, czyli ilością danych, które mogą przetworzyć w danym okresie czasu.

Jednym z kluczowych zagrożeń dla technologii blockchain są ataki hakerskie, które mogą mieć różne formy. Najbardziej znanym typem jest atak typu 51%, w którym podmiot lub grupa kontrolująca większość mocy obliczeniowej w przypadku PoW lub większość tokenów w przypadku PoS może zdominować sieć, co pozwala na dwukrotne wydawanie tych samych środków. W takim scenariuszu atakujący mogą manipulować transakcjami i skutecznie podważyć integralność całego łańcucha bloków. Zagrożenie tego typu atakami jest bardziej realne w mniejszych i mniej zabezpieczonych sieciach. Topowe kryptowaluty, takie jak Bitcoin, Ethereum czy Binance Smart Chain, mają ogromną moc obliczeniową w przypadku PoW lub duży rozkład tokenów w przypadku PoS, co sprawia, że przeprowadzenie takiego ataku jest bardzo trudne i kosztowne [7].

Innym zagrożeniem są ataki na poziomie inteligentnych kontraktów, które mogą zawierać luki w kodzie. Hakerzy, wykorzystując takie luki, mogą uzyskać nieuprawniony dostęp do środków przechowywanych w ramach danego kontraktu. Największym atakiem tego typu na świecie miał miejsce w 2016 roku i dotyczył kryptowaluty DAO opartej na Ethereum. DAO miało na celu zbieranie funduszy na innowacyjne projekty związane z blockchainem. W krótkim czasie przyciągnęło znaczną sumę, około 150 milionów dolarów w ETH, atrakcyjnym celem dla cyberprzestępców. Taki atak pozwala na wielokrotne wywołanie wypłaty środków, zanim saldo kontraktu zostało zaktualizowane. W ten sposób haker zdołał ukraść 3,6 miliona ETH, co na tamten moment stanowiło około 70 milionów dolarów [36]. Działanie to wywołało poważny kryzys w społeczności Ethereum, która zdecydowano się na fundamentalną zmianę w kodzie blockchajna, co spowodowało podział Ethereum na dwa łańcuchy: Ethereum (ETH) i Ethereum Classic (ETC). Ethereum Classic zachowało oryginalny blockchain, podczas gdy Ethereum wdrożyło zmiany, umożliwiając odzyskanie skradzionych środków przez inwestorów. Decyzja ta wywołała duże kontrowersje, gdyż podważała zasadę niezmienności blockchainu, będąc jednocześnie precedensem, który uwypuklił ryzyka związane ze smart kontraktami, zwłaszcza ich podatność na błędy kodu oraz trudność w zabezpieczeniu takich rozwiązań. Blockchajny, choć uznawane za bezpieczne dzięki mechanizmom kryptograficznym, nadal są podatne na te i inne typy ataków, zwłaszcza na poziomie aplikacji i oprogramowania korzystającego z tej technologii [37].

Do zagrożeń sieci blockchain należy dodać również ryzyko centralizacji w technologii. Skala potencjalnej centralizacji zależy od konkretnej kryptowaluty i mechanizmu konsen-

susu. W przypadku algorytmu Proof of Stake, gdzie zatwierdzanie transakcji opiera się na posiadanych tokenach, występuje ryzyko, że większe podmioty posiadające dużą ilość kryptowalut mogą zdobyć zbyt duży wpływ na sieć. Podobnie w przypadku algorytmu Proof of Work (PoW), duże kopalnie kryptowalut mogą skoncentrować moc obliczeniową, co zwiększa ryzyko centralizacji. Ten problem może wystąpić przede wszystkim dla mniejszych i nowych projektów kryptowalutowych, ponieważ mają mniej uczestników w sieci. Jednak w przypadku największych kryptowalut, takich jak Bitcoin czy Ethereum, społeczności aktywnie monitorują i przeciwdziałają centralizacji, co sprawia, że ryzyko to jest umiarkowane i stosunkowo dobrze kontrolowane.

Roczne zużycie energii przez sieć Bitcoin w 2023 roku wyniosło około 160 TWh, co odpowiada rocznemu zużyciu energii przez Polskę. Choć stanowi to tylko około 0,25 % całkowitego globalnego zużycia energii, jest to nadal bardzo wysokie zapotrzebowanie [35]. To znaczne zużycie energii sprawia, że technologia blockchain, szczególnie ta oparta na algorytmie Proof of Work (PoW), jest coraz częściej krytykowana za swój negatywny wpływ na środowisko.

Pojawienie się najpierw Bitcoina a później innych kryptowaluty na globalnej scenie finansowej było pierwszym krokiem w rozwoju technologii blockchain, która stała się integralną częścią biznesu i naszego codziennego życia. Coraz więcej branż wdraża tę technologię, a liczba osób dostrzegających korzyści płynące z produktów i usług opartych na blockchainie rośnie. Rozwój branży blockchain nie wykazuje oznak spowolnienia, a technologia ta wykazuje duże nadzieje na stanie się częścią cyfrowej architektury naszego świata w przyszłości. Blockchain znajduje zastosowanie nie tylko w kryptowalutach, ale również w innych dziedzinach, takich jak logistyka, zdrowie czy handel, gdzie bezpieczeństwo i transparentność są priorytetowe [39].

1.3. Handel kryptowalutami

Handel kryptowalutami rozpoczął się wraz z pojawieniem się pierwszej kryptowaluty, czyli Bitcoina. Pierwsze transakcje dzisiaj największej kryptowaluty miały charakter eksperymentalny. W maju 2010 dokonano kupna dwóch pizz za 10 000 BTC, pokazało to, że Bitcoin mógł mieć realną wartość [40]. Szybko pojawiły się giełdy kryptowalut, czyli miejsca, które umożliwiały wymianę Bitcoina na tradycyjne waluty fiducjarne. Jedną z pierwszych giełd kryptowalut była giełda Mt. Gox, która to już w 2010 roku pozwoliła szerszej liczbie entuzjastów nowej technologii na wymianę Bitcoinów na inne waluty. Giełda ta początkowo dominowała na rynku, obsługując ponad 70 % globalnych transakcji Bitcoinem. Jednak w 2014 roku po serii ataków hakerskich nastąpił jej upadek. Było to bardzo ważne wydarzenie w historii handlu kryptowalutami, które skłonił rynek do większej dbałości o bezpieczeństwo [41].

Z biegiem czasu po wzroście popularności Bitcoina, na rynku zaczęły pojawiać się inne kryptowaluty, takie jak Ethereum czy Ripple. Przyczyniło się to do rozwoju giełd oferujących wymianę nie tylko Bitcoina, ale także wielu innych cyfrowych aktywów. Współcześnie handel kryptowalutami odbywa się 24 godziny na dobę, każdego dnia tygodnia z milionami transakcji dziennie, co sprawiło, że rynek kryptowalut jest jednym

z najbardziej dynamicznych w świecie finansów. Istnieją dwa rodzaje giełd kryptowalut CEX, czyli giełdy scentralizowane oraz zdecentralizowane DEX.

Transakcje na giełdach CEX są zarządzane przez pośredników, czyli firmy, które działają jako zaufane strony, oferując platformy handlowe i usługi wsparcia użytkownikom. Użytkownicy deponują swoje środki na giełdzie, która zarządza ich wymianą. Przykłady scentralizowanych giełd to Binance, Bybit, Coinbase i Kraken. Giełdy tego typu charakteryzują się wysoką płynnością, dużą liczbą par handlowych oraz intuicyjnym interfejsem. Największym zagrożeniem CEX są ataki hakerskie oraz kwestie związane z przechowywaniem funduszy na serwerach giełdy [42]. Na scentralizowanych giełdach użytkownicy, wpłacają środki w kryptowalutach lub walutach fiat, a następnie mogą dokonywać transakcji na parach handlowych. Proces transakcji rozpoczyna się od złożenia zlecenia przez użytkownika, który decyduje o ilości i cenie aktywa, które chce kupić lub sprzedać. Giełda jest pośrednikiem, który realizuje zlecenia kupna oraz sprzedaży, dbając o odpowiednie przeliczenie kursów i bezpieczeństwo transakcji. Giełda dopasowuje zlecenie z odpowiednim kontrahentem, czyli innym użytkownikiem, jeśli są dostępne odpowiednie oferty. Po znalezieniu dopasowania transakcja jest realizowana, a aktywa przechodzą z konta jednego użytkownika na konto drugiego. Giełdy pobierają opłaty transakcyjne za zlecenia kupna i sprzedaży, które są uzależnione od wielkości transakcji. Osoba, która tworzy zlecenie (maker) często płaci niższą prowizję niż osoba realizująca już istniejące zlecenie (taker). Dodatkowo giełdy pobierają prowizje za wpłaty oraz wypłaty środków zarówno fiat, jak i kryptowalut, które mogą różnić się w zależności od metody płatności. Giełdy CEX oferują także inne funkcjonalności takie jak handel na rynkach futures z dźwignią czy też stacking kryptowalut [43].

Zdecentralizowane giełdy działają bez pośredników, umożliwiając handel bezpośrednio między użytkownikami. Przykładem giełdy DEX jest Uniswap, który działa na zasadzie smart kontraktów, oznacza to, że handel odbywa się bezpośrednio na blockchainie. Użytkownicy zachowują pełną kontrolę nad swoimi funduszami, ale tego typu giełdy mają zwykle niższą płynność niż giełdy scentralizowane, a także bardziej złożony interfejs. Zlecenia transakcji na DEX pomiędzy użytkownikami są dopasowywane przez protokoły automatycznych animatorów rynku (AMM), które ustalają ceny na podstawie algorytmów, uwzględniając płynność i zapotrzebowanie na dane aktywa. Po dopasowaniu transakcja jest realizowana bezpośrednio na blockchainie. Aktywa są transferowane z portfela jednego użytkownika do portfela drugiego. Zdecentralizowane giełdy również pobierają prowizje, jednak są one zazwyczaj niższe niż na CEX. Użytkownicy często ponoszą opłaty transakcyjne w formie gazu, który jest jednostką opłaty za operacje wykonywane w sieci blockchain, takiej jak Ethereum [44].

Pomiędzy różnymi giełdami mogą występować różnice w cenach, które wynikają z braku centralnej ceny dla kryptowalut. Liczba użytkowników oraz wolumen obrotu przekładający się na płynność na giełdach, wpływają na cenę aktywów. Giełdy o niskiej płynności mogą mieć większe różnice kursów, co stwarza okazje dla arbitrażu, czyli praktyki, która polega na kupowaniu kryptowaluty na jednej giełdzie i sprzedawaniu na innej po większej cenie. Wspomniany wyżej wolumen obrotu na giełdach kryptowalut odnosi się do całkowitej wartości lub liczby jednostek kryptowalut wymienianych

w określonym czasie, najczęściej mierzonym w godzinach lub dniach. Wyższy wolumen obrotu wskazuje na większą aktywność handlową, co przekłada się na lepszą płynność rynku. Natomiast płynność definiuje się jako łatwość, z jaką można kupić lub sprzedać dane aktywa bez znacznego wpływu na ich cenę. Giełdy o większym wolumenie, takie jak Binance, Bybit czy Coinbase, zapewniają lepszą płynność, co przekłada się na szybsze realizowanie transakcji oraz mniejsze różnice cenowe. Dzięki wysokiej płynności kupno i sprzedaż kryptowalut są mniej podatne na wpływ dużych zleceń, co ma kluczowe znaczenie dla inwestorów poszukujących stabilnych warunków handlowych. W tej pracy badanie korelacji zostanie oparte na danych z CEX-ów, z powodu większej płynności oraz bogatszego wyboru dostępnych par handlowych [47].

W ostatnich latach handel kryptowalutami zyskał na popularności dzięki większemu zainteresowaniu instytucji finansowych, takich jak fundusze inwestycyjne ETF, a także wzrostowi regulacji, co zmniejszyło ryzyko oszustw i zwiększyło zaufanie do rynku. Pierwsze fundusze oparte na kontraktach terminowych Bitcoina powstały już w 2021 roku, jednak ich ograniczenia regulacyjne zmniejszały zaufanie dużych inwestorów instytucjonalnych, którzy preferują bardziej stabilne rozwiązania. Przełom nastąpił w 2023 roku, gdy amerykańska Komisja Papierów Wartościowych i Giełd (SEC) zatwierdziła pierwszy fundusz oparty na fizycznym Bitcoinie, co skutkowało wzrostem zainteresowania wśród inwestorów instytucjonalnych. SEC, jako kluczowy regulator, dba o bezpieczeństwo uczestników rynku oraz jego stabilność, więc jego decyzje istotnie wpływają na amerykański rynek kapitałowy [48]. Niedługo potem SEC zaakceptował fundusz oparty na Ethereum, co wywołało dodatkowe zainteresowanie innymi altcoinami, które mogą w przyszłości stać się przedmiotem regulowanych produktów giełdowych. Takie instrumenty pozwalają inwestorom angażować się w rynek kryptowalut bez potrzeby korzystania z portfela cyfrowego (udziały można nabyć jak zwykłe akcje). Chociaż rynek funduszy opartych na kryptowalutach jest wciąż stosunkowo młody, rosnące zainteresowanie ze strony instytucji oraz pozytywne zmiany regulacyjne wskazują na jego obiecujące perspektywy rozwoju. W miarę rozwoju rynku kryptowalut można oczekiwać powstania kolejnych funduszy o nowych strategiach inwestycyjnych oraz o szerszym zasięgu [49].

2. Część teoretyczna

Rozdział ten jest poświęcony metodom obliczania macierzy korelacji pomiędzy kursami wymiany różnych kryptowalut, które są reprezentowane jako szeregi czasowe. Analiza opiera się na badaniu właściwości tych szeregów czasowych. W dalszej części wyjaśniono kluczowe definicje i zagadnienia istotne w kontekście analizy kryptowalut, co ma na celu ułatwienie pełnego zrozumienia omawianego tematu.

2.1. Szereg czasowy

Analiza szeregów czasowych ma na celu badanie struktury danych tworzących szereg, identyfikację trendów, cykliczności oraz innych wzorców, a także prognozowanie przyszłych wartości na podstawie dostępnych danych.

Definicj 1. Szereg czasowy Y to uporządkowany ciąg wartości, gdzie każda wartość ciągu jest związana z określonym punktem w czasie. Formalnie można go zapisać jako:

$$Y = \{Y_t : t \in T\}, \quad (2.1)$$

gdzie t jest indeksem czasowym, oznaczającym moment w czasie, a T to zbiór wszystkich możliwych wartości indeksu czasowego. Najczęściej zakłada się, że $T = \mathbb{N}$, co oznacza, że indeks czasowy przyjmuje wartości naturalne, reprezentujące na przykład kolejne dni lub minuty. Dla każdej wartości t , Y_t oznacza wartość szeregu czasowego w danym punkcie czasowym [50].

Jeżeli pomiary są wykonywane w równych odstępach czasu τ , taki szereg nazywany jest szeregiem czasowym dyskretnym. W niniejszej pracy analizowane będą szeregi czasowe o tej właśnie strukturze.

2.2. Stopy zwrotu

Stopa zwrotu to powszechnie używana miara zyskowności inwestycji bądź instrumentu finansowego, stosowana również w kontekście kryptowalut. W niniejszej pracy szeregi czasowe będą tworzone na podstawie stóp zwrotu. Do analizy wybrano logarytmiczne stopy zwrotu ze względu na ich właściwość addytywności przy analizie wielookresowej, co oznacza, że stopy zwrotu dla kilku okresów można sumować, co odpowiada logarytmicznej stopie zwrotu z całego okresu. Dodatkowo logarytmiczne stopy zwrotu lepiej

oddają względne zmiany wartości cen, zwłaszcza przy dużych wahanach, ponieważ odzwierciedlają te zmiany w sposób bardziej równomierny i skalowalny. W analizie zostaną obliczone stopy zwrotu względem wybranej kryptowaluty bazowej, którą będzie USDT, czyli stablecoin zaprojektowany tak, aby odzwierciedlać wartość dolara amerykańskiego. Każda stopa zwrotu przedstawia względną zmianę wartości danej kryptowaluty względem kryptowaluty bazowej w określonym przedziale czasowym.

Definicja 2. Dla wybranej kryptowaluty oznaczonej indeksem i (gdzie $i = 1, \dots, n$) stopa zwrotu między momentem początkowym t a końcowym $t + \tau$ jest definiowana jako:

$$G_i(t; \tau) = \log(P_i(t + \tau)) - \log(P_i(t)), \quad (2.2)$$

gdzie:

- $G_i(t; \tau)$ – logarytmiczna stopa zwrotu kryptowaluty i w okresie o długości τ ,
- $P_i(t + \tau)$ – cena kryptowaluty i w momencie $t + \tau$,
- $P_i(t)$ – cena kryptowaluty i w momencie t ,
- t – początkowy moment w czasie,
- τ – długość przedziału czasowego [52].

Na potrzeby badania τ zostało przyjęte jako 1 dzień. Aby skalować zmiany kursów kryptowalut i umożliwić ich obiektywne porównanie pomimo różnej zmienności cen, stosuje się standaryzację stóp zwrotu. Standaryzowaną stopę zwrotu kryptowaluty o indeksie i , wyrażoną względem kryptowaluty bazowej, w przedziale czasowym τ , obliczamy według wzoru:

$$g_i(t; \tau) = \frac{G_i(t; \tau) - \langle G_i(t; \tau) \rangle_T}{\sigma(G_i)} \quad (2.3)$$

gdzie:

- $g_i(t; \tau)$ – standaryzowana stopa zwrotu kryptowaluty i w okresie czasu τ ,
- $G_i(t; \tau)$ – logarytmiczna stopa zwrotu, zdefiniowana wcześniej,
- $\langle G_i(t; \tau) \rangle_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T G_i(t; \tau)$ – średnia stopa zwrotu G_i w oknie czasowym T ,
- T – całkowita liczba obserwacji w szeregu czasowym,
- $\sigma(G_i) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(G_i(t; \tau) - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T G_i(t; \tau) \right)^2}$ – odchylenie standardowe stóp zwrotu G_i ,
- t – moment w czasie,
- τ – odstęp czasowy pomiędzy wartościami stóp zwrotu [52].

Po standaryzacji teoretyczny szereg czasowy stóp zwrotu ma średnią równą zero i odchylenie standardowe równe jeden. Standaryzacja umożliwia porównywanie kryptowalut o różnym poziomie zmienności bez względu na ich cenę jednostkową. Zapobiega to dominacji kryptowalut o wysokiej zmienności, które mogłyby zniekształcić wyniki analizy.

2.3. Macierz korelacji

Macierz korelacji jest narzędziem statystycznym, które służy do badania współzależności pomiędzy wieloma zmiennymi jednocześnie. W kontekście rynków finansowych, w tym kryptowalut, pozwala ocenić wzajemne zależności między stopami zwrotu różnych aktywów, co umożliwia lepsze zrozumienie ich dynamiki.

Definicja 3. Macierz korelacji to macierz, której elementy stanowią wartości współczynników korelacji Pearsona dla odpowiednich par zmiennych losowych. Macierz korelacji definiujemy wzorem:

$$C = \frac{1}{T} M M^T \quad (2.4)$$

Gdzie:

- C – macierz korelacji,
- T – całkowita liczba obserwacji w szeregu czasowym,
- M – macierz znormalizowanych stóp zwrotu,
- M^T – transpozycja macierzy M .

Macierz M składa się z szeregów znormalizowanych stóp zwrotu g_i . Ma ona wymiary $n \times T$, gdzie jej wiersze odpowiadają kryptowalucie i , natomiast kolumny odpowiadają kolejnym momentom czasowym w całym szeregu czasowym, składając się tym samym na długość szeregu czasowego T [51, 55].

Współczynnik korelacji Pearsona dla kryptowalut o indeksie i oraz j , gdzie $i, j = 1, \dots, n$ i $i \neq j$, wyraża się wzorem:

$$r_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T G_i(t; \tau) G_j(t; \tau) \quad (2.5)$$

Gdzie:

- r_{ij} – współczynnik korelacji między kryptowalutami i oraz j ,
- T – liczba obserwacji w szeregu czasowym,
- $G_i(t; \tau)$ – znormalizowana stopa zwrotu kryptowaluty i w chwili t ,
- $G_j(t; \tau)$ – znormalizowana stopa zwrotu kryptowaluty j w chwili t .

Wartości r_{ij} opisują, jak silnie są skorelowane zmiany stóp zwrotu między kryptowalutami i oraz j .

Macierz korelacji C dla zestawu n kryptowalut, składająca się ze współczynników korelacji Pearsona pomiędzy każdą parą kryptowalut o indeksach i oraz j , gdzie $i, j = 1, \dots, n$, można zapisać jako C_{ij} . Każdy element tej macierzy to współczynnik korelacji r_{ij} , który mierzy stopień współzależności między kryptowalutami [57] [59].

Macierz korelacji ma zatem postać:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1(n-1)} \\ r_{12} & 1 & r_{23} & \cdots & r_{2(n-1)} \\ r_{13} & r_{23} & 1 & \cdots & r_{3(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1(n-1)} & r_{2(n-1)} & r_{3(n-1)} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Każdy element macierzy reprezentuje współczynnik korelacji między dwiema kryptowalutami, który informuje, w jakim stopniu ceny tych aktywów poruszają się w sposób skoordynowany. Macierz jest symetryczna, co oznacza, że korelacja między aktywami A i B jest taka sama jak między B i A. Wartości współczynnika korelacji mogą mieścić się w przedziale od -1 do 1, gdzie -1 oznacza bardzo silną ujemną korelację, 1 bardzo silną dodatnią korelację, a wartość bliska 0 wskazuje na brak istotnej zależności między aktywami. Dodatni współczynnik wskazuje, że ceny dwóch kryptowalut mają tendencję do równoczesnych ruchów w tym samym kierunku, czyli wzrost ceny jednego aktywa często towarzyszy wzrostowi drugiego, natomiast ujemny wskazują na odwrotną relację. W przypadku macierzy korelacji elementy diagonalne reprezentują autokorelacje, które zawsze wynoszą 1, co oznacza pełną korelację aktywa z samym sobą. Z kolei elementy pozadiagonalne, odpowiadające za korelacje między różnymi aktywami, mogą mieć zróżnicowane wartości. Macierz korelacji pozwala zrozumieć wzorce współzależności między aktywami, a także umożliwia identyfikację grup kryptowalut, które są bardziej podatne na wspólne wpływy rynkowe. Tego rodzaju analiza jest istotna przy ocenie ryzyka systemowego na rynkach kryptowalut [58].

2.4. Wartości własne

Wektory własne i wartości własne pojawiają się w kontekście analizy macierzy korelacji, aby określić, które kryptowaluty mają największy wpływ na całą zmienność rynku. Wartości własne (λ_k) wskazują, jak duża część całkowitej zmienności danych może być przypisana do odpowiednich wektorów własnych (v_k).

Definicja 4. Wartości własne λ_k macierzy korelacji C są rozwiązaniami równania:

$$Cv_k = \lambda_k v_k \quad (2.6)$$

gdzie:

- C to macierz korelacji,
- λ_k to k -ta wartość własna, gdzie $k = 1, 2, \dots, n$, a n to liczba kryptowalut w analizie,
- v_k to wektor własny odpowiadający wartości własnej λ_k , który jest również numerowany przez indeks k .

Każda wartość własna λ_k odpowiada ilości wariancji w danych, którą można przypisać danemu kierunkowi wektora własnego v_k . Większe wartości własne wskazują na większy wpływ wspólnych czynników na zmienność cen [55].

2.5. Rozkład wartości własnych

Rozkład wartości własnych macierzy korelacji pozwala zidentyfikować dominujące zależności między kryptowalutami i ocenić, które czynniki mają największy wpływ na wspólne ruchy cen.

Rozkład widma macierzy korelacji, czyli zbiór jej wartości własnych λ_k , gdzie $k = 1, 2, \dots, n$, przy n oznaczającym liczbę kryptowalut w analizie, to zestaw rozwiązań równania charakterystycznego:

$$\det(C - \lambda_k I) = 0 \quad (2.7)$$

gdzie:

- C – macierz korelacji,
- I – macierz jednostkowa,
- λ_k – k -ta wartość własna macierzy [60].

Zbiór wszystkich wartości własnych $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ oraz odpowiadających im wektorów własnych v_1, v_2, \dots, v_n pozwala na pełną analizę struktury zmienności rynku kryptowalut. Analiza tych wektorów i wartości umożliwia wykrycie głównych czynników wpływających na korelacje między kryptowalutami oraz ich wzajemne zależności [55]. Rozkład wartości własnych jest opisywany przez funkcje gęstości prawdopodobieństwa $p_c(\lambda)$.

Interpretacja rozkładu wartości własnych:

- Niskie wartości własne: Oznaczają słabą korelację lub mały wpływ zmiennych w tej strukturze. Takie wartości wskazują na to, że zmienność w analizowanej grupie kryptowalut jest w dużej mierze niezależna od pozostałych.
- Wysokie wartości własne: Wskazują na silne skorelowanie grupy kryptowalut. Jest to jeden z głównych składników zmienności rynku. Wysokie wartości własne wskazują na silną współzależność grupy kryptowalut, co oznacza, że duża część zmienności (wariancji) ich cen jest wspólna. Innymi słowy, kryptowaluty w tej grupie reagują w podobny sposób na zmiany rynkowe – ich ceny rosną lub spadają jednocześnie. To prowadzi do koncentracji zmienności w kilku głównych kierunkach, odzwierciedlanych przez wektory własne.
- Największa wartość własna: λ_{\max} odzwierciedla główną grupę silnie powiązanych kryptowalut, które wykazują największą współzależność w analizowanej próbie. Oznacza to, że te kryptowaluty mają najwięcej wspólnej zmienności, co może wskazywać na główne trendy rynkowe. Analiza tej wartości pozwala na wyodrębnienie kryptowalut, które w największym stopniu determinują zmienność całego rynku kryptowalut [61].

2.6. Składowe wektora własnego

Aby zidentyfikować kryptowaluty, które mają największy wpływ na zmiany cen na rynku, analizuje się rozkład współczynników rozwinięcia wektora własnego, które są

nazywane jego składowymi. Najczęściej analizowane są składowe dla wektora własnego odpowiadającego największej wartości własnej, ponieważ to on dostarcza najwięcej informacji o kierunkach zmienności rynkowej oraz o tym, które kryptowaluty wykazują najsilniejszą korelację i dominują w tworzeniu ogólnych trendów rynkowych. Wektor własny $v_k = [v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kn}]$ wskazuje kierunek w przestrzeni, wzdłuż którego wariancja danych jest maksymalna, czyli różnice między wartościami, są największe. Dla danego wektora własnego v_k , każda składowa v_{ki} wskazuje na to, jak dana kryptowaluta, oznaczona indeksem i , przyczynia się do tego kierunku. Oznacza to, że składowe wektora własnego pozwalają określić udział poszczególnych kryptowalut w dominującym trendzie rynkowym. Jako całość, wektor własny odzwierciedla kierunek zmienności w danych, a jego składowe wskazują na indywidualny wpływ poszczególnych kryptowalut na tę zmienność, co umożliwi ich dokładną analizę i identyfikację najważniejszych czynników kształtujących rynek [54].

2.7. Macierz losowa korelacji

Rynek kryptowalut jest stosunkowo młody, zmienny i często niestukturalny. W związku z tym korelacje wyznaczone na podstawie danych empirycznych mogą zawierać szumy, które prowadzą do przeszacowania współzależności między aktywami. Szumy mogą zdominować strukturę macierzy, sprawiając, że niektóre zależności między aktywami wydają się istotne, choć wynikają z przypadkowych fluktuacji cenowych. Dlatego też, bez odpowiednich narzędzi filtrujących szum, analiza korelacji empirycznych może prowadzić do błędnych wniosków dotyczących współzależności między aktywami.

Macierze losowe korelacji, mogą pomóc w ocenie, które korelacje są statystycznie istotne, a które wynikają z szumu. Macierz losowa to macierz, której elementy są zmiennymi losowymi zazwyczaj o określonym rozkładzie prawdopodobieństwa. Tworzenie macierzy losowej wymaga wybrania rozkładu dla każdego elementu macierzy, co pozwala na analizowanie ich statystycznych właściwości. Przykładem macierzy losowej może być Macierz Wisharta.

Definicj 5. Macierz Wisharta W można zdefiniować jako:

$$W = HH^T \quad (2.8)$$

gdzie:

- H to macierz o losowych elementach mających rozkład normalny (rozkład Gaussa $N(0, \sigma)$),
- H^T to transponowana macierz H [62].

Macierz Wisharta może być opisana przez swoje wartości własne, które dają szczegółowy obraz struktury zależności w danych. Rozkład wartości własnych macierzy Wisharta opisany jest przez tzw. rozkład Marczenko-Pasteura, który przedstawia sposób, w jaki wartości własne są rozkładane w losowej macierzy.

Definicj 6. Dla macierzy Wisharta W rozkład wartości własnych opisuje następujący wzór:

$$\rho_c(\lambda) = \frac{Q}{2\pi\sigma^2} \frac{\sqrt{(\lambda_+ - \lambda)(\lambda - \lambda_-)}}{\lambda} \quad (2.9)$$

gdzie:

- $\rho_c(\lambda)$ to prawdopodobieństwo w rozkładzie Marczenko-Pasteura
- λ_+ i λ_- to granice spektrum wartości własnych,
- σ oznacza wariancję zmiennych losowych,
- $Q = T/N$, gdzie T to długość szeregów czasowych, a N to liczba kryptowalut.

Granice spektrum wartości własnych wyznaczamy za pomocą wzoru:

$$\lambda_{\pm} = \sigma^2 \left(1 + \frac{1}{Q} \pm 2\sqrt{\frac{1}{Q}} \right), \quad (2.10)$$

gdzie:

- δ - delta Diraca,
- $\lambda \in [\lambda_-, \lambda_+]$,
- $Q = T/N$,
- T - długość szeregu czasowego,
- N - liczba szeregów czasowych.

Powyższe zależności zachodzą w granicy $T, N \rightarrow \infty$. W praktyce przy obliczaniu rozkładów i spektrum macierzy losowej trzeba przyjąć dostatecznie duże T oraz N . Im większa długość szeregu oraz ich liczba, tym bardziej wiarygodne stają się szacunkowe wartości własne oraz korelacje, ponieważ mają one więcej danych do analizy [63].

Aby zidentyfikować potencjalne wartości własne wynikające z losowych fluktuacji, najlepiej analizować ich zakres w porównaniu do teoretycznego przedziału. Wartości własne znajdujące się poza przedziałem $[\lambda_-, \lambda_+]$, oraz te niemieszczące się w granicach rozkładu Marczenko-Pasteura sugerują istnienie rzeczywistych korelacji, natomiast te mieszczące się w tym zakresie są uznawane za efekty szumu. Filtracja szumów pozwala na oczyszczenie macierzy korelacji z efektów przypadkowych, co prowadzi do bardziej wiarygodnych analiz zależności pomiędzy aktywami [62].

3. Przebieg badania

Badanie korelacji obejmie porównanie zależności między parami kryptowalut na dwóch giełdach: Binance, która dominuje pod względem dziennego wolumenu, oraz Bybit, zajmującej drugie miejsce w tym rankingu. Poprzez zastosowanie macierzy korelacji zostanie zobrazowany stopień zależności między kryptowalutami na poszczególnych platformach, co może dać szerszy pogląd na cały rynek. W ramach tej pracy szczególny nacisk zostanie położony na interpretację macierzy korelacji oraz rozkładu wartości własnych, które pozwalają zidentyfikować główne wzorce współzależności między aktywami. Wykorzystanie teorii macierzy losowych Wisharta, obejmującej rozkład Marczenko-Pasteura, pozwoli określić, kiedy obserwowane korelacje wynikają z przypadkowych fluktuacji, a kiedy wskazują na rzeczywistą strukturę rynkową. Model Marchenki-Pasteura bardzo dobrze opisuje rozkłady większości wartości własnych dla rynków akcji [62], ale także można go z powodzeniem używać przy rynku kryptowalut [63]. Wśród tych wartości zwykle pojawia się przynajmniej jedna, która wyróżnia się i znajduje się poza typowym obszarem dla macierzy losowych. Wartość ta, wraz z przypisanym jej wektorem własnym, reprezentuje wspólne cechy zachowań na rynku. Analiza składowych wektora własnych odpowiadających największym wartościom własnym, pozwala określić, które konkretne kryptowaluty wpływają na trendy korelacji w całej strukturze danych [52].

Celem pracy jest wykrycie istotnych różnic między giełdami oraz określenie, które kryptowaluty wykazują znaczące powiązania. Na podstawie wyników badań będzie można również spróbować zidentyfikować potencjalne przyczyny tych zależności i podjąć spekulacje na temat możliwych przyszłych trendów rynkowych.

3.1. Opis danych i metodyka badań

Badanie zostało przeprowadzone na $n = 40$ kryptowalutach o największej kapitalizacji rynkowej, notowanych na obu giełdach i charakteryzujących się wystarczającą płynnością, aby zapewnić odpowiednią liczbę obserwacji. Wszystkie kryptowaluty zostały wyrażone we wspólnej walucie bazowej USDT (Tether) i stanowią pary handlowe na omawianych giełdach. Dane transakcyjne dla kryptowalut, obejmujące ich główne parametry, takie jak cena, wolumen oraz czas otwarcia i zamknięcia, zebrano z okresu od 1 stycznia 2024 roku do 10 listopada 2024 roku. Dane zostały pobrane w minutowym interwale czasowym, a na ich podstawie skonstruowano szeregi czasowe dla poszczególnych kryptowalut. Szeregi czasowe to znormalizowane stopy zwrotu między omawianymi parami kryptowalut, a ich długość T wynosi 452160. Cały proces badawczy został zautomatyzowany za pomocą języka Python, który umożliwił zarówno pobieranie

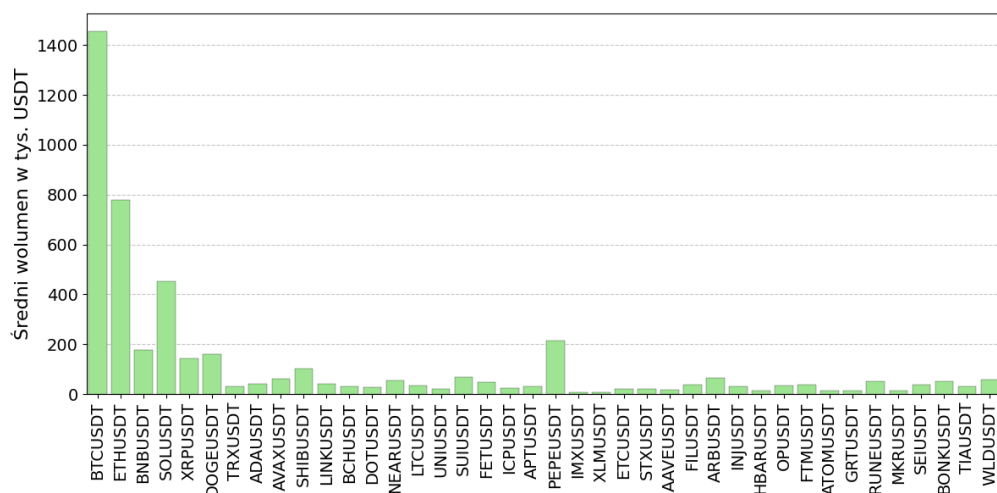
danych poprzez API giełd, jak i wykonanie wszystkich niezbędnych obliczeń. Wizualizacja wyników została wykonana przy użyciu bibliotek takich jak NumPy, Pandas oraz Matplotlib. Dzięki zastosowanym narzędziom możliwe było nie tylko skonstruowanie macierzy korelacji, ale także przeprowadzenie jej szczegółowej analizy, co umożliwiło wyciągnięcie istotnych wniosków dotyczących współzależności na rynkach kryptowalut. Lista kryptowalut uwzględnionych w badaniu, wraz z procentowym udziałem wolumenu zerowego w pobranych danych, znajduje się w Tabeli 3.1. Kolejność kryptowalut w tabeli jest posortowana malejąco według największej kapitalizacji z dnia 10 listopada 2024 według strony CoinGecko [67]. Warto zauważyć, że na giełdzie Bybit kilka kryptowalut charakteryzowało się stosunkowo dużymi brakami danych dotyczącymi wolumenu. Niedostateczna liczba danych może wpływać na stabilność i dokładność obliczeń, skutkując wyższą zmiennością w macierzach korelacji dla tych konkretnych kryptowalut. Korelacje między parami kryptowalut o niskim wolumenie transakcji mogą być mniej reprezentatywne. W celu uzyskania pełniejszego obrazu płynności na obu giełdach obliczono średni wolumen obrotu wszystkich badanych kryptowalut w ciągu 24 godzin, wyrażony w USDT. Wyniki zostały przedstawione na Rysunku 3.1 dla giełdy Binance oraz na Rysunku 3.2 dla giełdy Bybit. Kolejność kryptowalut na wykresach ustalono tak samo jak we wspomnianej wyżej tabeli, czyli na podstawie największej kapitalizacji z dnia 10 listopada 2024 roku, zgodnie z danymi ze strony CoinGecko [67].

Tabela 3.1: Tabela z listą nazw kryptowalut z symbolami oraz procent braków w wolumenie dla giełdy Binance i Bybit - część 1

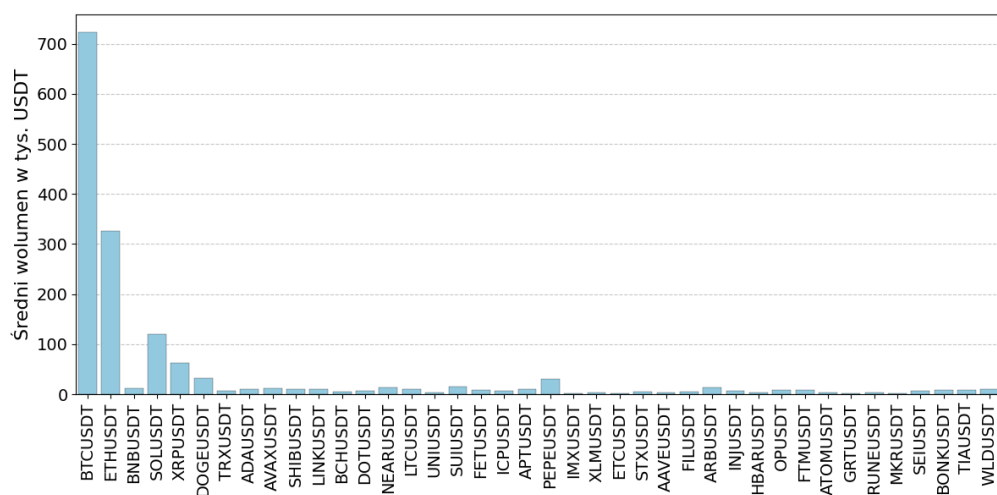
Nazwa	Symbol	Procent brakującego wolumenu na giełdzie Binance	Procent brakującego wolumenu na giełdzie Bybit
Bitcoin	BTC	0.00%	0.00%
Ethereum	ETH	0.00%	0.00%
BNB	BNB	0.00%	0.22%
Solana	SOL	0.00%	0.00%
Ripple	XRP	0.00%	0.10%
Dogecoin	DOGE	0.00%	0.08%
Tron	TRX	0.00%	0.34%
Cardano	ADA	0.00%	1.84%
Avalanche	AVAX	0.00%	0.81%
Shiba Inu	SHIB	0.00%	1.94%
Chainlink	LINK	0.00%	1.64%
Bitcoin Cash	BCH	0.00%	21.98%
Polkadot	DOT	0.04%	4.65%
Near Protocol	NEAR	0.00%	0.84%

Tabela 3.2: Tabela z listą nazw kryptowalut z symbolami oraz procent braków w wolumenie dla giełdy Binance i Bybit - część 2

Nazwa	Symbol	Procent brakującego wolumenu na giełdzie Binance	Procent brakującego wolumenu na giełdzie Bybit
Litecoin	LTC	0.00%	0.85%
Uniswap	UNI	0.50%	14.15%
Sui	SUI	0.01%	1.03%
Artificial Superintelligence Alliance	FET	0.03%	2.25%
Internet Computer	ICP	0.09%	5.35%
Aptos	ATP	1.33%	1.21%
Pepe	PEPE	0.13%	1.25%
Immutable	IMX	1.14%	14.55%
Stellar	XLM	3.49%	8.09%
Ethereum Classic	ETC	2.33%	20.23%
Stacks	STX	0.47%	6.03%
Aave	AAVE	0.72%	13.73%
Filecoin	FIL	0.15%	9.32%
Arbitrum	ARB	0.01%	4.55%
Injective	INJ	0.14%	3.05%
Hedera	HBAR	1.51%	6.86%
Optimism	OP	0.13%	1.11%
Fantom	FTM	0.05%	6.05%
Cosmos Hub	ATOM	0.23%	4.20%
The Graph	GRT	0.48%	14.79%
Rune	RUNE	0.20%	14.01%
Maker	MKR	2.98%	32.03%
Sei	SEI	0.05%	3.96%
Bonk	BONK	0.01%	2.85%
Celestia	TIA	0.18%	2.67%
Worldcoin	WLD	0.00%	2.10%



Rysunek 3.1: Średni wolumen na 24 godziny dla giełdy Binance



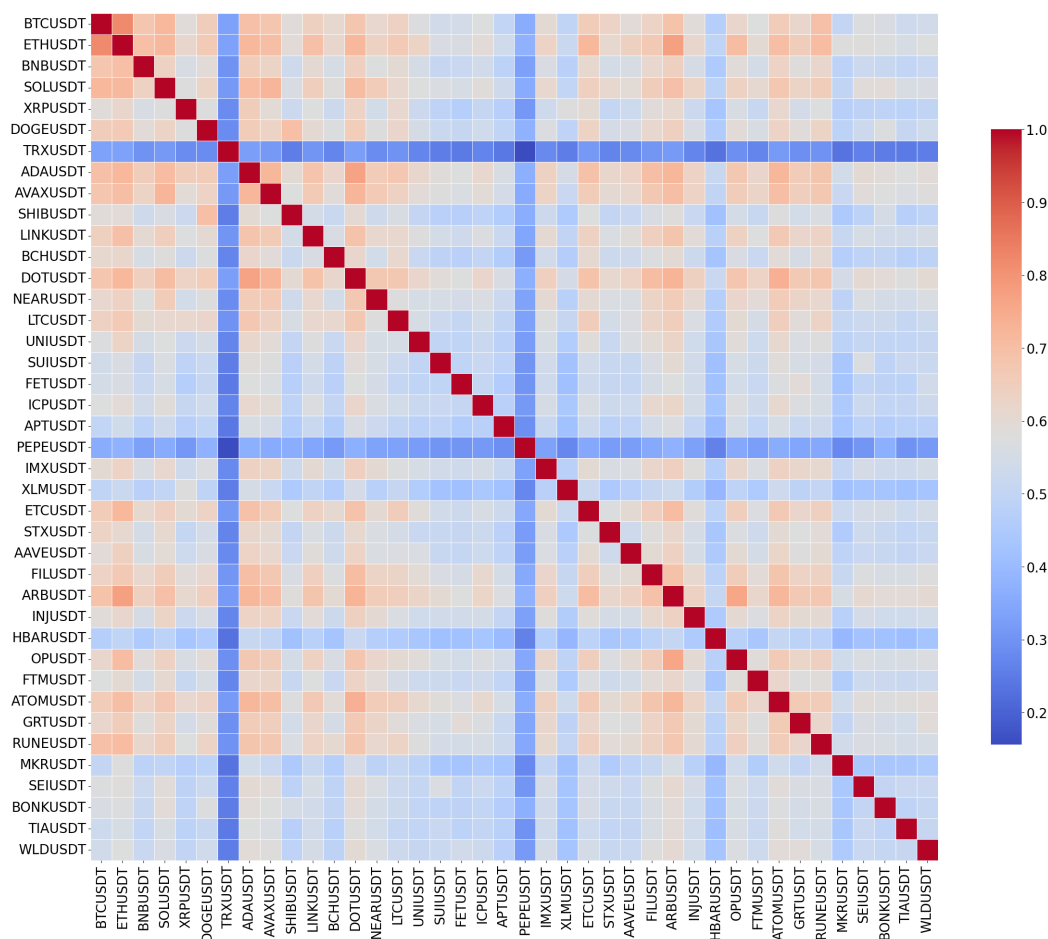
Rysunek 3.2: Średni wolumen na 24 godziny dla giełdy Bybit

Wykresy średniego dziennego wolumenu dla obu giełd mają podobną strukturę. Wolumeny handlowe dla kryptowalut o największej kapitalizacji, takich jak BTC i ETH, są wyraźnie większe w porównaniu do pozostałych. Giełda Binance odznacza się znacznie wyższymi wolumenami dla większości kryptowalut, choć na Bybit proporcje w handlu projektami o mniejszej kapitalizacji pozostają zbliżone. Wyższy wolumen handlowy sprzyja lepszej płynności, co pozytywnie wpływa na badanie korelacji poprzez dostarczenie bardziej reprezentatywnych danych, zmniejszenie wpływu anomalii oraz stabilizację wyników. Z kolei mniejsze wolumeny, częściej obserwowane na Bybit, mogą zwiększać zmienność cen, co obniża dokładność analizy korelacji.

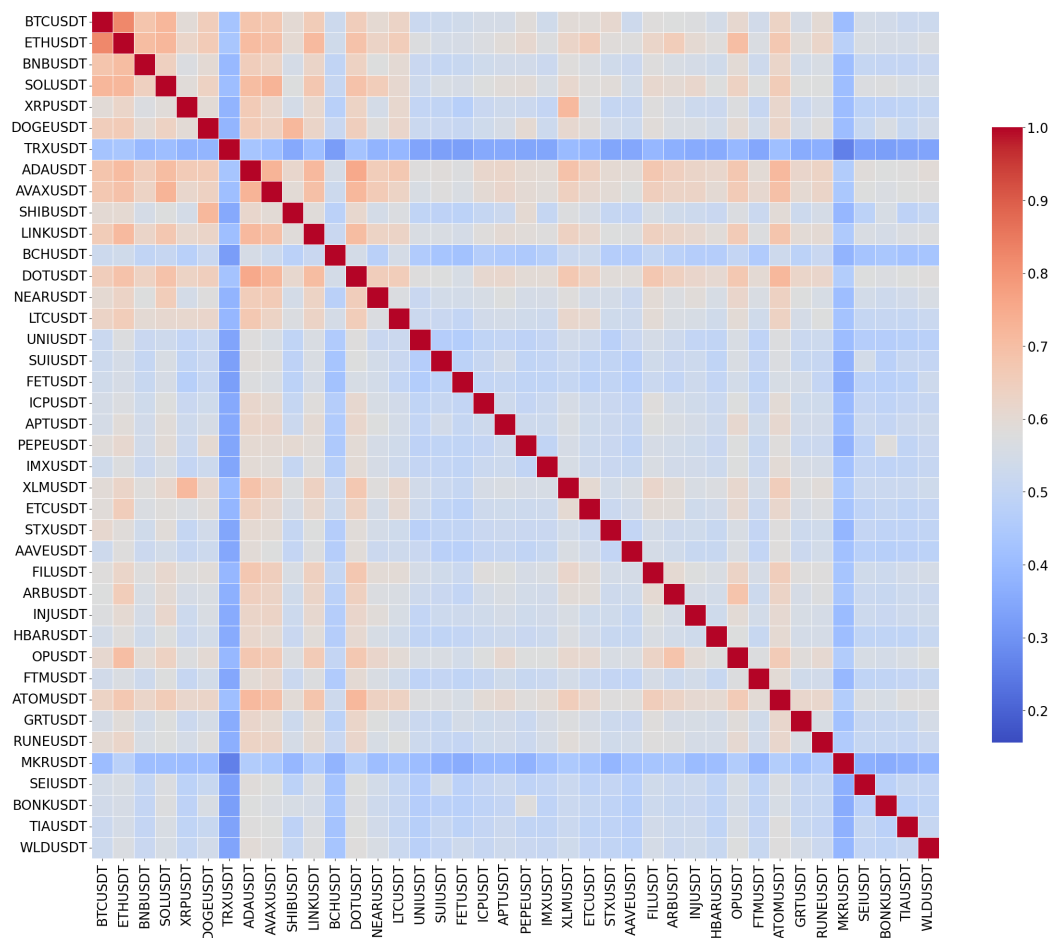
4. Wyniki i wnioski

4.1. Interpretacja macierzy korelacji

Macierze korelacji między parami kryptowalut na giełdach Binance oraz Bybit zostały przedstawione na Rysunku 4.1 i Rysunku 4.2. Obie macierze zawierają pary kryptowalut względem kryptowaluty bazowej USDT, które są uporządkowane na podstawie tabeli 3.1, czyli od największej kapitalizacji rynkowej (na górze i po lewej stronie) do najmniejszej (na dole i po prawej stronie).



Rysunek 4.1: Macierz korelacji C_{ij} kryptowalut dla giełdy Binance



Rysunek 4.2: Macierz korelacji C_{ij} kryptowalut dla giełdy Bybit

Obie macierze wykazują podobne struktury korelacyjne, co sugeruje, że główne kryptowaluty na obu giełdach mają zbliżone relacje między sobą. Widoczna jest ogólna tendencja, że kryptowaluty o większej kapitalizacji rynkowej wykazują wyższe współczynniki korelacji. Kryptowaluty o niskiej płynności mają tendencję do niższych współczynników korelacji, co wynika z nieregularnych ruchów i zmniejszonego wpływu globalnych trendów.

Główną grupę korelacji na obu giełdach tworzą dwie kryptowaluty o największej kapitalizacji, czyli Bitcoin i Ethereum, których to współczynniki korelacji Pearsona są wyraźnie największe na tle innych par kryptowalut. Wskazuje to na bardzo silne powiązanie między tymi aktywami oraz ich kluczową rolę na rynku.

Można wyróżnić też grupy, które zachowują korelacje w obrębie jakiejś konkretnej niszy zajmującej się podobną tematyką. Tego typu grupą są projekty oparte na blockchainie Ethereum. Kryptowaluty takie jak ETC, UNI, AAVE, LINK wykazują dużą ko-

relację względem ETH, co może sugerować ich wspólną reakcję na zmiany w ekosystemie Ethereum lub podobne trendy wśród inwestorów.

Inną tego typu grupą są tak zwane memcoiny takie jak DOGE, SHIB. Memcoiny to rodzaj kryptowalut, które powstały głównie w celu wykorzystania trendów kulturowych, często bez konkretnego zastosowania technologicznego, zyskując popularność dzięki zaangażowaniu społeczności internetowych. Nie są aż tak silnie skorelowane jak inne grupy, ale można wśród nich dostrzec pewne zależności. Wynikają one głównie z podobnego podejścia inwestorów do tych aktywów jako krótkoterminowych spekulacji.

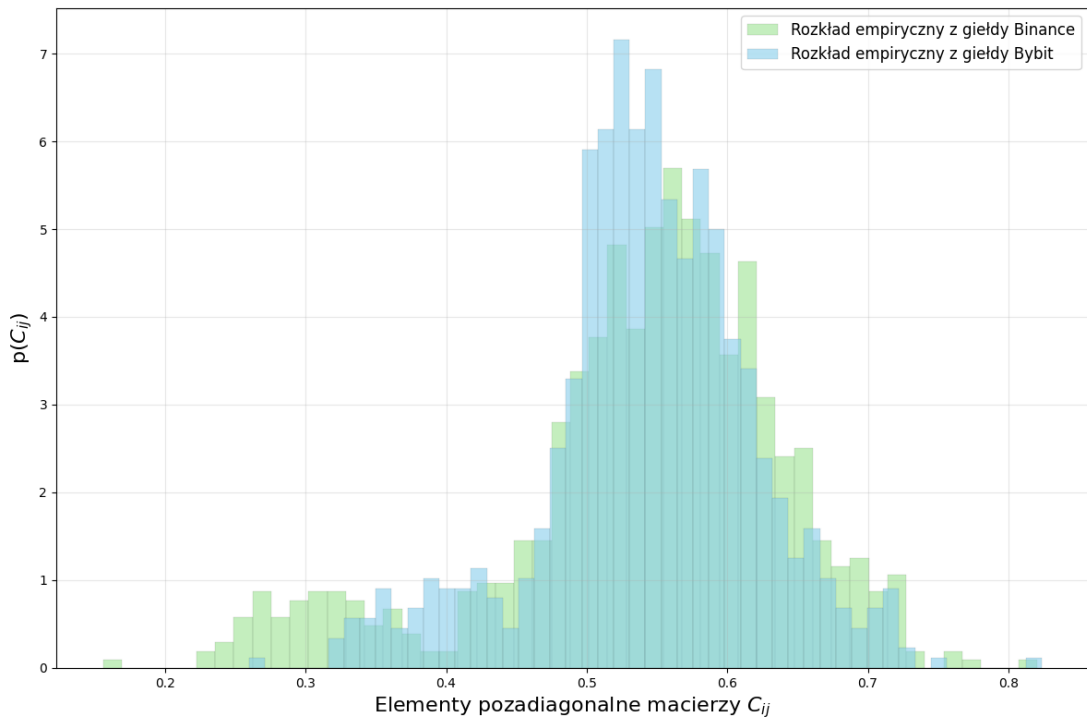
Istnieje również grupa kryptowalut wykazujących relatywnie niskie korelacje z wymienionymi wcześniej grupami. Może to sugerować, że ich płynność jest ograniczona lub że reagują one na specyficzne wydarzenia, przez co zmiany ich cen są mniej podatne na ogólne trendy rynkowe. W obu przypadkach tokenem o najniższej korelacji względem pozostałych okazał się TRON (TRX). Charakteryzuje się on stosunkowo dużą płynnością w porównaniu do całej badanej grupy aktywów, co może wskazywać, że jego niska korelacja wynika z odmiennej dynamiki rynkowej w porównaniu do innych kryptowalut. TRON jest kryptowalutą intensywnie promowaną przez swoje środowisko, co może prowadzić do sezonowych wzrostów popularności lub wpływu spekulacji, które oddzielają jego zmiany cen od innych aktywów. W badanym okresie TRON często notował znaczące wzrosty, podczas gdy większość rynku przechodziła spadki lub konsolidacje, utrzymując ceny na zbliżonym poziomie [65].

Macierze korelacji dla giełd Binance i Bybit, mimo ogólnego podobieństwa, ujawniają pewne różnice wynikające z segmentacji rynku oraz specyfiki handlu na każdej z platform. Najbardziej zauważalne rozbieżności są zapewne spowodowane różnicom w wolumenie i płynności. Binance, będąc większą i bardziej płynną giełdą, charakteryzuje się wyższymi wolumenami transakcyjnymi, co prowadzi do mniejszych rozbieżności cenowych i stabilniejszych korelacji. Natomiast na Bybit, gdzie wolumeny są niższe, zdarzają się większe różnice cenowe między parami kryptowalut, co wpływa na fluktuacje korelacji. Niższa płynność może powodować wyższe odchylenia standardowe korelacji, szczególnie dla kryptowalut o mniejszej kapitalizacji. Znaczące różnice w korelacji między giełdami można zaobserwować w przypadku kryptowalut takich jak ETC oraz przede wszystkim MKR. Na Bybit korelacje tych projektów z innymi kryptowalutami są wyraźnie niższe, co można tłumaczyć niskim wolumenem obrotu. Na Binance tak niskie korelacje nie występują, co potwierdza wpływ większej płynności na stabilność relacji między aktywami. Inną zauważalną różnicą jest zachowanie kryptowaluty PEPE, której współczynniki korelacji na giełdzie Binance są znacznie niższe niż na giełdzie Bybit. Różnice te nie wynikają z braku wolumenu, ponieważ dla tej kryptowaluty praktycznie nie występują okresy zerowego obrotu. Mogą natomiast być związane z niską zmiennością cen w pierwszych miesiącach roku. Taka sytuacja wpłynęła na niewielką korelację tej kryptowaluty z pozostałymi badanymi aktywami w początkowym okresie, co przełożyło się na wyniki dla całego analizowanego przedziału czasowego.

Na obu giełdach widoczna jest pewna ogólna struktura korelacji i podział na klastry kryptowalut, które są silnie skorelowane, co może wskazywać na podobieństwo w ich reakcjach na zmiany rynkowe. Jednak specyficzne różnice, jak niższe korelacje w przypadku

MKR na Bybit czy PEPE na Binance, sugerują, że każde z tych środowisk giełdowych może mieć unikalne uwarunkowania i dynamikę, które wpływają na ostateczne wartości korelacji.

W celu analizy wartości współczynników korelacji macierzy C_{ij} dla obu giełd obliczono rozkład elementów pozadiagonalnych tych macierzy i przedstawiono na wykresie 4.3.

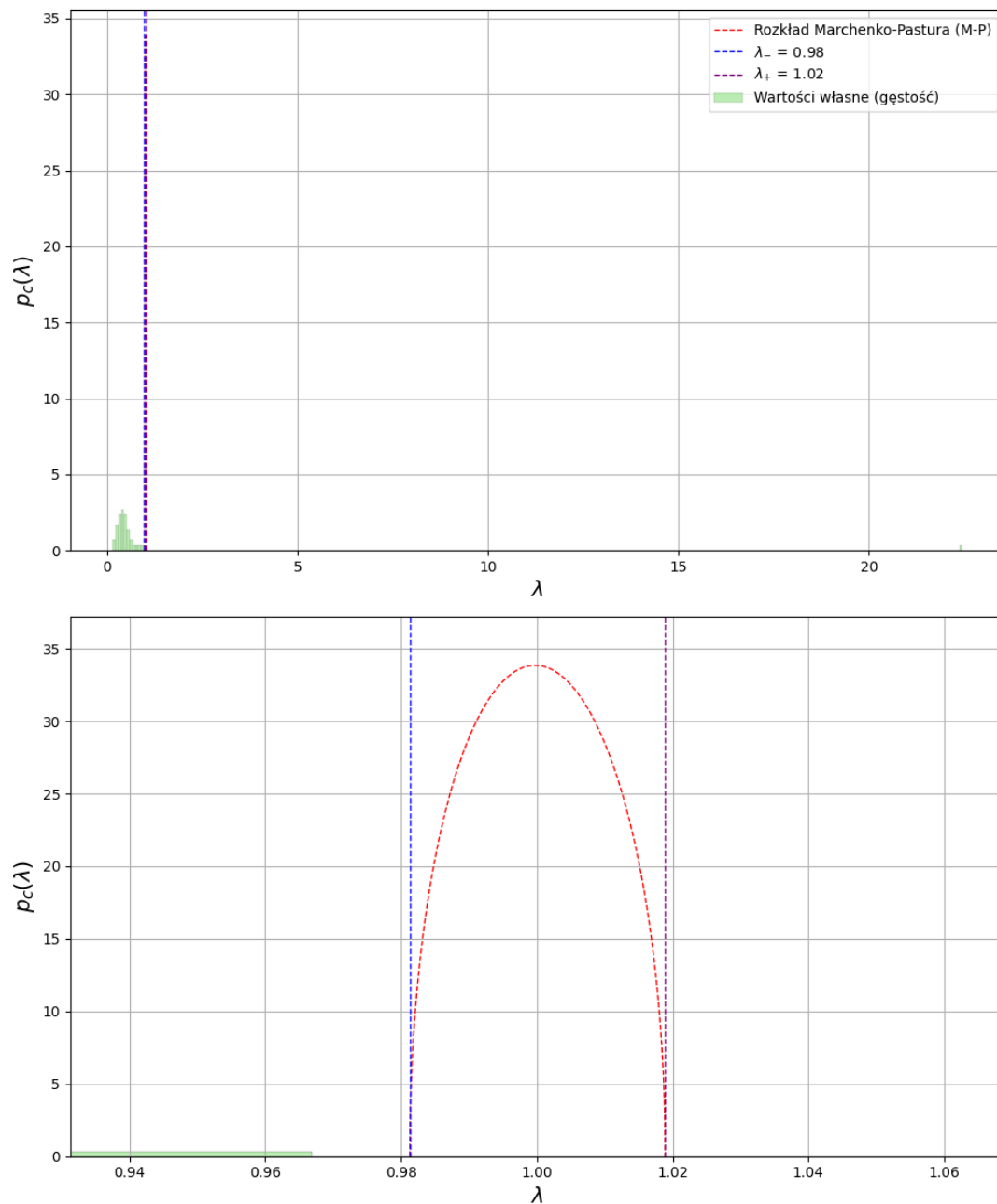


Rysunek 4.3: Rozkład elementów pozadiagonalnych macierzy korelacji C_{ij} kryptowalut dla giełdy Binance

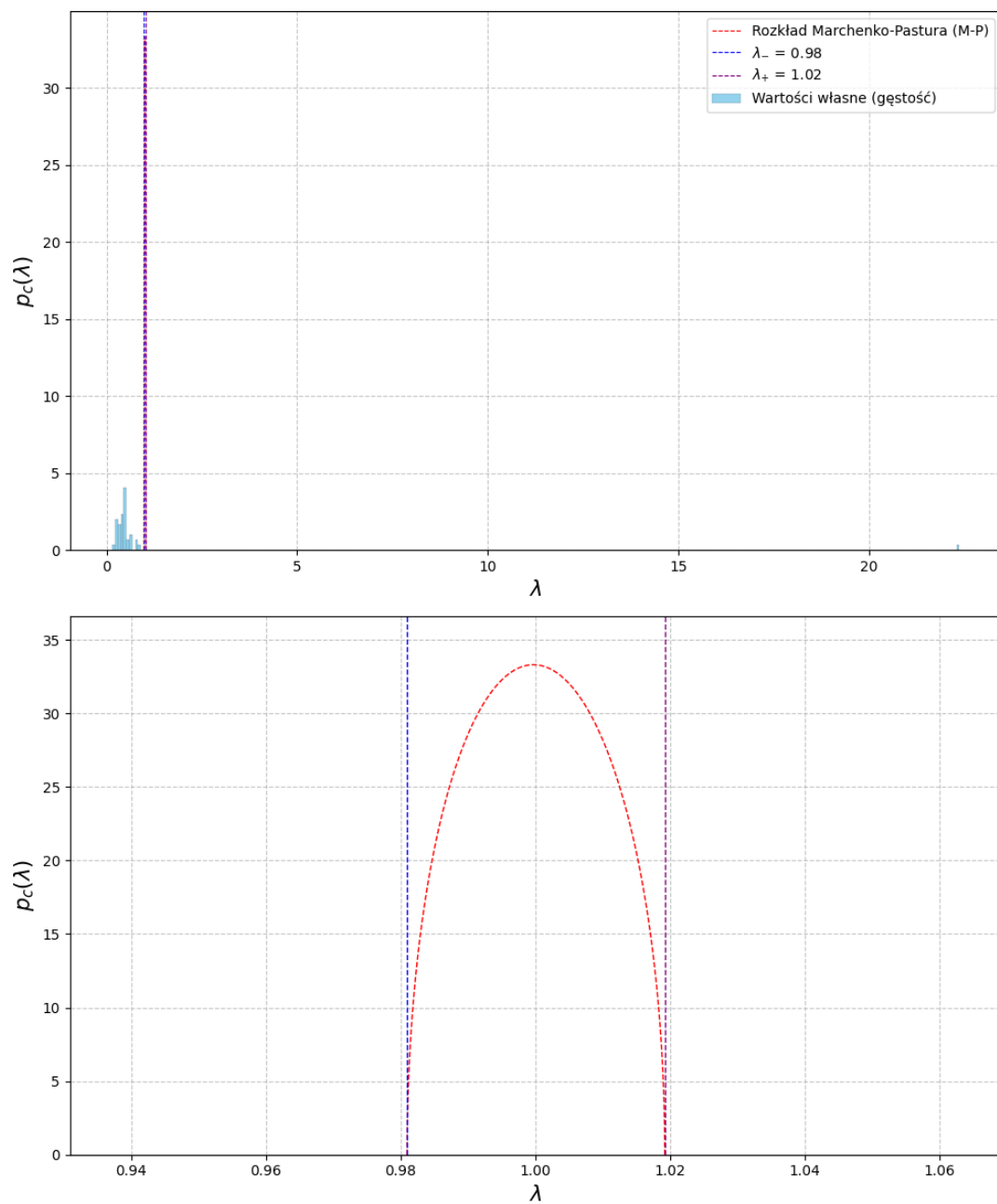
Struktura rozkładów empirycznych dla obu giełd wykazuje znaczące podobieństwo. Elementy pozadiagonalne obu macierzy są dodatnie i rozłożone niesymetrycznie względem średniej, z wyraźnie dłuższym ogonem po lewej stronie. W obu przypadkach rozkłady są przesunięte w stronę wyższych wartości korelacji, co sugeruje obecność silnych zależności między parami kryptowalut. Rozkłady nie przypominają rozkładu normalnego ze względu na odległą od zera średnią oraz asymetryczny kształt, co świadczy o tym, że struktura danych nie jest losowa. Wykresy rozkładu elementów pozadiagonalnych macierzy korelacji dla obu giełd potwierdzają, że zaobserwowane korelacje opierają się na rzeczywistych mechanizmach rynkowych, a nie przypadkowych wahaniach. Porównanie Binance i Bybit ukazuje podobieństwa w strukturze rozkładów, ale różnice w ich kształcie i koncentracji odzwierciedlają specyfikę dynamiki rynkowej każdej z tych platform.

4.2. Interpretacja rozkładu wartości własnych

Rozkłady wartości własnych dla macierzy z obu giełd są przedstawione odpowiednio na Rysunku 4.4 dla giełdy Binance oraz Rysunku 4.5 dla giełdy Bybit.



Rysunek 4.4: Górny wykres przedstawia rozkład gęstości prawdopodobieństwa określającą rozkład wartości własnych macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Binance. Dolny wykres przedstawia przybliżenie rozkładu Marchenka-Pastura.



Rysunek 4.5: Górny wykres przedstawia rozkład gęstości prawdopodobieństwa określającą rozkład wartości własnych macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Bybit. Dolny wykres przedstawia przybliżenie rozkładu Marchenko-Pastura.

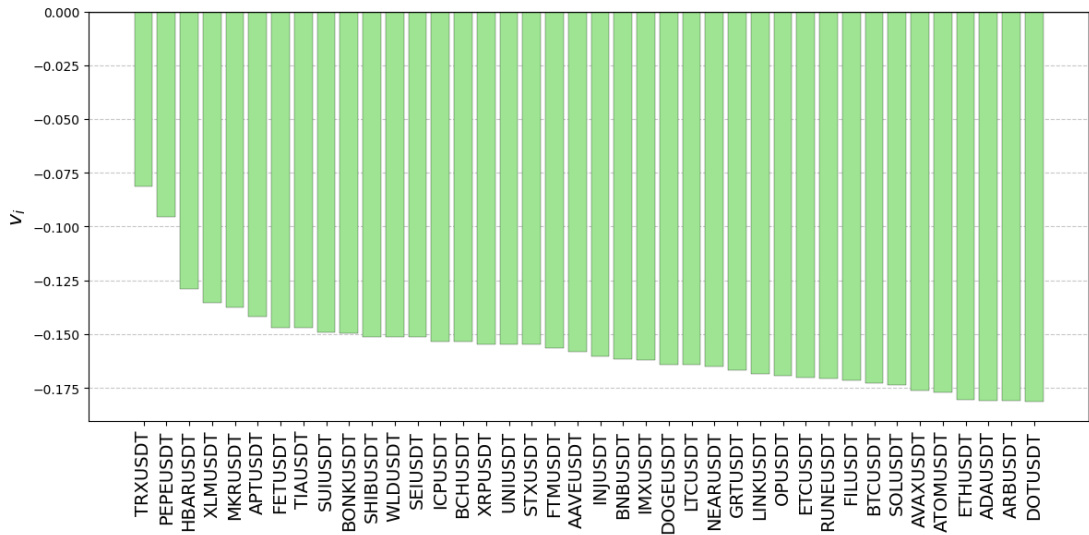
Możemy zauważyć, że dla obu giełd rozkład wartości własnych wygląda bardzo podobnie i możemy z nich wysnuć takie same wnioski. Dla obu giełd pionowe linie na wykresach $\lambda_- = 0.98$ oraz $\lambda_+ = 1.02$ wyznaczają granice, w których powinny znajdować się wartości własne w przypadku losowej struktury korelacji. Przypominając z teorii macierzy losowych, wartości własne uzyskane z macierzy korelacji empirycznej uznaje się za wykazujące losowe zachowanie, jeśli mieszczą się w obszarze rozkładu Marczenko-Pastura, zaznaczonym na wykresach czerwoną przerywaną linią. Natomiast, wartości własne, które wypadają poza obszar tego rozkładu, będą wartościami niosącymi za sobą informacje o występowaniu korelacji, która nie jest wynikiem losowych szumów w danych. W praktyce używamy tylko wartości własnych, które są większe niż λ_+ ponieważ te, które są mniejsze niż λ_- niosą zaniedbywane informacje [62, 63].

Przedział $[\lambda_-, \lambda_+]$ jest bardzo wąski, a sam rozkład M-P ma wydłużony kształt. Wynika to z dużej wartości $Q = T/N$, gdzie T to długość szeregu czasowego, a N liczba kryptowalut. W przypadku dużych wartości Q , przy stosunkowo małej liczbie kryptowalut N w porównaniu do długości szeregu czasowego T , rozkład przyjmuje coraz bardziej smukłą postać. Takie zależności wynikają z teorią macierzy losowych Wisharta, która wskazuje, że dla dużych Q szerokość przedziału $[\lambda_-, \lambda_+]$ maleje, a koncentracja wartości własnych wokół granic teoretycznego rozkładu rośnie [55].

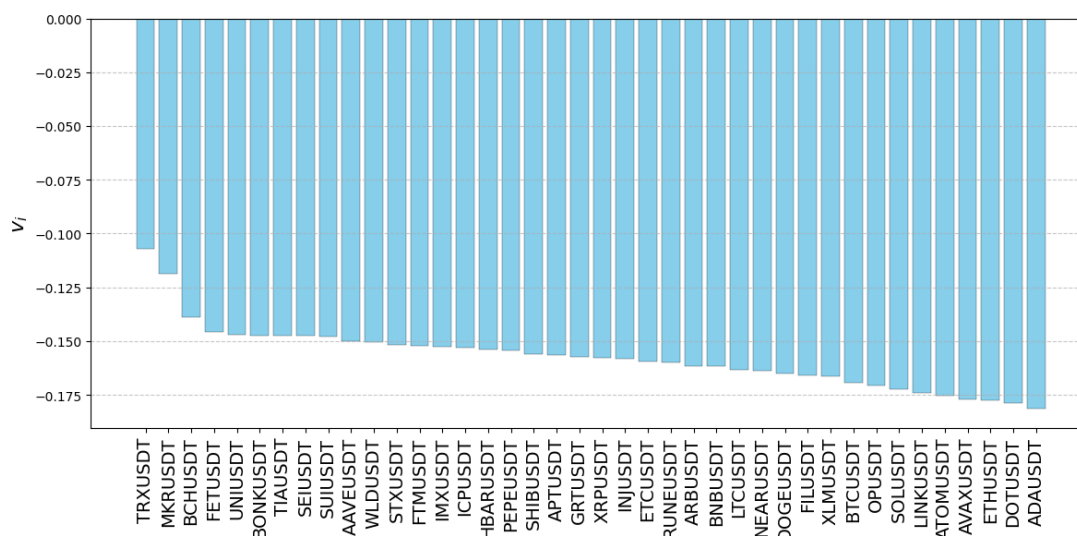
Dla obu giełd żadna z wartości własnych nie mieści się między λ_- a λ_+ , ani tym samym w granicach rozkładu M-P. Rozkłady wartości własnych pokazują, że rynek kryptowalut nie jest zgodny z modelem losowym. Na szczególną uwagę zasługuje największa wartość własna λ_{max} , która w przypadku obu giełd ma podobną wartość około 22 i znajduje się daleko poza obszarem wyznaczonym przez przedział λ_- i λ_+ z rozkładu M-P dla macierzy losowej. Jest to zjawisko często obserwowane na rynkach finansowych, gdzie typowe widmo wartości własnych macierzy korelacji opartych na współczynniku Pearsona charakteryzuje się jedną dużą wartością λ_{max} , wyraźnie oddzieloną od reszty. Taka luka symbolizuje zbiorowy czynnik rynkowy, który odzwierciedla wspólne zachowanie wszystkich aktywów [62].

Na podstawie badań z rynków finansowych można stwierdzić, że sytuacja, w której jedna wartość własna znacząco przewyższa pozostałe, jest charakterystyczna dla rynków podlegających wspólnym czynnikom makroekonomicznym lub systemowym. Takie czynniki prowadzą do silnych korelacji pomiędzy aktywami, co skutkuje koncentracją wartości własnych wokół jednej dominującej. Przykłady tego zjawiska są dobrze udokumentowane w literaturze [52, 62], które wskazują, że globalne, zewnętrzne wpływy sprawiają, że większość aktywów reaguje w podobny sposób na te same impulsy. W wyniku tego, koncentracja wartości własnych sygnalizuje obecność zbiorowego czynnika rynkowego, mogącego wynikać z globalnych trendów lub zmian strukturalnych na rynkach. Największa wartość własna poza zakresem rozkładu Marchenki-Pastura wskazuje, że kryptowaluty tworzą klaster stabilnych współzależności, które wykraczają poza przypadkowe wahania. Oznacza to, że większość kryptowalut wykazuje podobne reakcje na wspólne czynniki rynkowe, takie jak globalne trendy czy kluczowe sygnały rynkowe. Współzależności te mogą wynikać z reakcji na istotne wydarzenia, takie jak zmiany regulacyjne, istotne informacje ekonomiczne lub inne wiadomości o znaczeniu globalnym.

Rozkład składowych wektora własnego, odpowiadającego największej wartości własnej, został przedstawiony na rysunku 4.6 dla giełdy Binance oraz na rysunku 4.7 dla giełdy Bybit. Wszystkie elementy dla obu giełd mają ten sam znak (wartości ujemne). Taki układ wskazuje, że większość analizowanych kryptowalut wykazuje silną współzależność w jednym wspólnym kierunku. Główny kierunek związany z λ_{\max} odzwierciedla zbiorową reakcję rynku kryptowalut na globalne czynniki makroekonomiczne. Sugeruje to, że zmiany w ogólnych warunkach rynkowych wywołują podobne reakcje wśród większości kryptowalut. Składowe o wyższych wartościach wskazują na większe znaczenie danej kryptowaluty w strukturze rynkowej, natomiast składowe o wartościach bliskich zeru mogą sugerować, że dana kryptowaluta jest mniej zależna od reszty rynku. Ogólnie wartości składowych dla obu giełd są bardzo zbliżone, co wskazuje, że żadna kryptowaluta nie dominuje w strukturze rynkowej. Najmniejsza wartość składowej została przypisana kryptowalucie TRX, która na obu giełdach charakteryzuje się jednym z najniższych współczynników korelacji. Wskazuje to, że TRX reaguje na inne czynniki rynkowe niż pozostałe kryptowaluty. Na giełdzie Binance stosunkowo niską wartość składowej przypisano także kryptowalucie PEPE, co jest zgodne z jej niskimi współczynnikami korelacji w macierzy C_{ij} względem innych kryptowalut. Natomiast na giełdzie Bybit warta odnotowania jest stosunkowo niska wartość składowej odpowiadającej kryptowalucie MKR, co również, podobnie jak w przypadku PEPE, pokrywa się z jej niskimi wartościami korelacji na tle innych projektów.



Rysunek 4.6: Składowe wektora własnego odpowiadającego największej wartości własnej z macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Binance



Rysunek 4.7: Składowe wektora własnego odpowiadającego największej wartości własnej z macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Bybit

4.3. Wnioski

Przeprowadzone badania pokazują, że różnice w wynikach między analizowanymi giełdami, Binance i Bybit, są minimalne i sprowadzają się głównie do korelacji kilku kryptowalut. Oba rynki wykazują bardzo zbliżone struktury korelacyjne oraz wspólną dynamikę. Wynika to z faktu, że zarówno Binance, jak i Bybit to giełdy o wysokiej płynności, które obsługują duże dzienne wolumeny transakcji. Chociaż Binance charakteryzuje się większymi obrotami, nie wpływa to znacząco na wyniki badania, co może być związane z globalnym charakterem rynku kryptowalut. Na obie giełdy wpływają podobne trendy makroekonomiczne oraz te same globalne sygnały rynkowe.

Podsumowanie

Popularność rynku kryptowalut rośnie w szybkim tempie, co prowadzi do napływu coraz większego kapitału. Zwiększona płynność na największych giełdach skutkuje większą dostępnością danych o wysokiej częstotliwości, co umożliwia przeprowadzanie precyzyjnych analiz tego rynku. W pracy porównano dwie największe giełdy kryptowalut pod względem dziennego wolumenu, analizując korelacje między 40 kryptowalutami w okresie od 1 stycznia 2024 roku do 10 listopada 2024 roku.

Przeprowadzona analiza wykazała, że rynek kryptowalut charakteryzuje się zarówno wspólną dynamiką, jak i zauważalnym zróżnicowaniem między poszczególnymi aktywami. Analizując współczynniki korelacji, można dostrzec podział rynku na klastry, czyli grupy kryptowalut wykazujące podobne zależności i zachowania. Klastry te mogą wynikać z podobieństw technologicznych, zastosowań lub reakcji na specyficzne czynniki ekonomiczne. Największą korelację między sobą wykazują Bitcoin (BTC) i Ethereum (ETH), co czyni je najbardziej wpływowymi aktywami na rynku. Tylko kryptowaluta Tron (TRX), wyraźnie wyróżnia się odrębnym trendem i mniejszą zależnością od innych aktywów. Dominacja największej wartości własnej (λ_{\max}), która znajduje się poza obszarem Marczenko-Pasteura, wskazuje na istnienie czynnika zbiorowego, który wpływa na większość kryptowalut, odzwierciedlając ich wspólne reakcje na globalne zmiany rynkowe. Również analiza wektorów własnych potwierdza, że większość kryptowalut wykazuje podobny duży wpływ na rynek.

Wspólna dynamika rynku, wynikająca z czynników makroekonomicznych i globalnych trendów, będzie prawdopodobnie dalej odgrywać kluczową rolę. Warto jednak zauważyć, że klastry mogą zmieniać się w czasie, np. w wyniku rozwoju technologii blockchain, wprowadzenia nowych regulacji lub zmiany popularności różnych zastosowań kryptowalut. W przyszłości rynek będzie prawdopodobnie dążył do większej stabilności, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokich korelacji w ramach poszczególnych klastrów. Obserwacja klastrów oraz analiza ich dynamiki będą kluczowe dla lepszego zrozumienia rynku i podejmowania bardziej świadomych decyzji inwestycyjnych.

Analiza przedstawiona w niniejszej pracy pozwala dostrzec subtelne różnice między giełdami i lepiej zrozumieć ich przyczyny. Badanie ukazuje także ogólny obraz rynku kryptowalut, wskazując na interesujące zależności. Wyniki tej analizy mogą być przydatne inwestorom do konstrukcji portfeli opartych na najbardziej skorelowanych aktywach, co może pomóc w redukcji ryzyka inwestycyjnego. Niniejsza praca może również stanowić punkt wyjścia do pogłębienia analizy dynamiki rynkowej, koncentrując się w przyszłości na szerszym zakresie badania, uwzględniając mniej popularne giełdy oraz większą liczbę

kryptowalut, co pozwoliłoby na identyfikację większej liczby zależności na rynku, a także lepsze zrozumienie jego złożoności i potencjalnych trendów.

Bibliografia

- [1] Julie Pinkerton, *The History of Bitcoin*, <https://money.usnews.com/investing/articles/the-history-of-bitcoin>, dostęp 7.10.2024.
- [2] *Wykresy Globalnej kapitalizacji rynkowej kryptowalut*, <https://www.coingecko.com/pl/global-charts>, dostęp 7.10.2024.
- [3] Susan Oh, *How Many Cryptocurrencies Are There in 2024?*, <https://coinweb.com/trends/how-many-cryptocurrencies-are-there/>, dostęp 7.10.2024.
- [4] Dorothy Neufeld, *The \$109 Trillion Global Stock Market in One Chart*, <https://www.visualcapitalist.com/the-109-trillion-global-stock-market-in-one-chart/> (2023), dostęp 7.10.2024.
- [5] Anshika Bhalla, *A detailed history of blockchain: From the Establishment to Broad Adoption*, <https://www.blockchain-council.org/blockchain/a-detailed-history-of-blockchain-from-the-establishment-to-broad-adoption/> (2021), dostęp 7.10.2024.
- [6] Satoshi Nakamoto, *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*, https://www.usssc.gov/sites/default/files/pdf/training/annual-national-training-seminar/2018/Emerging_Tech_Bitcoin_Crypto.pdf, dostęp 7.10.2024.
- [7] Dylan Yaga, Peter Mell, Nik Roby, Karen Scarfone, *NISTIR 8202 Blockchain Technology Overview*, <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8202> (2018), dostęp 7.10.2024.
- [8] *What Is Blockchain? The Tech Behind Crypto Explained*, <https://www.gemini.com/cryptopedia/blockchain-technology-explained>, dostęp 7.10.2024.
- [9] *Historia technologii blockchain od 1991 roku*, <https://cryps.pl/artykul/historia-technologii-blockchain-od-1991-roku/> (2021), dostęp 7.10.2024.
- [10] Andreas M. Antonopoulos, *Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies* (2014), dostęp 7.10.2024.
- [11] *What Is Litecoin (LTC)? How It Works, History, Trends, and Future*, <https://www.investopedia.com/terms/l/litecoin.asp> (2024), dostęp 7.10.2024.
- [12] *Litecoin*, <https://coincodex.com/crypto/litecoin/?period=ALL>, dostęp 7.10.2024.
- [13] Adam Hayes, *Stablecoins: Definition, How They Work, and Types*, <https://www.gemini.com/cryptopedia/blockchain-technology-explained> (2024), dostęp 7.10.2024.
- [14] *Tether*, <https://coinmarketcap.com/currencies/tether/>, dostęp 7.10.2024.
- [15] Chris Riley, *The Impact of Stablecoins in Financial Markets: Future Trends and Innovations*, <https://www.openmarketcap.com/stablecoins-in-financial-markets/> (2024), dostęp 7.10.2024.
- [16] Ganesh Viswanath-Natraj, *How stablecoins will impact foreign exchange markets*, <https://www.gemini.com/cryptopedia/blockchain-technology-explained> (2024), dostęp 7.10.2024.

- [//www.wbs.ac.uk/news/how-stablecoins-will-impact-foreign-exchange-markets/](https://www.wbs.ac.uk/news/how-stablecoins-will-impact-foreign-exchange-markets/) (2024), dostęp 7.10.2024.
- [17] *What Is Ethereum and How Does It Work?*, <https://www.investopedia.com/terms/e/ethereum.asp> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [18] *Ethereum*, <https://coincodex.com/crypto/ethereum/>, dostęp 7.10.2024.
 - [19] *Who Is Ethereum Founder Vitalik Buterin?*, <https://crypto.com/university/who-is-ethereum-founder-vitalik-buterin> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [20] *10 Best DeFi Projects Powering the Decentralized Future*, <https://blocktrade.com/best-defi-projects/> (2023), dostęp 7.10.2024.
 - [21] Rakesh Sharma, *Non-Fungible Token (NFT): What It Means and How It Works*, <https://www.investopedia.com/non-fungible-tokens-nft-5115211> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [22] Ted Late, *What is an NFT and how does it work? Non-Fungible Tokens Explained*, <https://coincodex.com/article/2354/what-are-non-fungible-tokens-nfts/> (2022), dostęp 7.10.2024.
 - [23] *Binance Smart Chain vs. Ethereum: Apa Bedanya?*, <https://www.binance.com/pl/square/post/227357> (2023), dostęp 7.10.2024.
 - [24] *Polkadot*, <https://wiki.polkadot.network/docs/web3-and-polkadot>, dostęp 7.10.2024.
 - [25] *Solana*, <https://solana.com/docs>, dostęp 7.10.2024.
 - [26] *Full Guide – The Ethereum Ecosystem in 2024*, <https://developers.moralis.com/full-guide-the-ethereum-ecosystem-in-2024/> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [27] *Binance Coin*, <https://coincodex.com/crypto/binance-coin/>, dostęp 7.10.2024.
 - [28] *Chainlink*, <https://coincodex.com/crypto/chainlink/>, dostęp 7.10.2024.
 - [29] *Uniswap*, <https://coincodex.com/crypto/uniswap/>, dostęp 7.10.2024.
 - [30] *Multi-Collateral Dai*, <https://coincodex.com/crypto/dai/>, dostęp 7.10.2024.
 - [31] *Kapitalizacja rynkowa*, <https://coinmarketcap.com/charts/>, dostęp 7.10.2024.
 - [32] Julie Pinkerton, *The History of Bitcoin*, <https://money.usnews.com/investing/articles/the-history-of-bitcoin> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [33] Karl Montevirgen, *What are cryptocurrencies and why is the world paying attention?* (2024), <https://www.britannica.com/money/what-is-cryptocurrency>, dostęp 7.10.2024.
 - [34] Akash Takyar, *What is Blockchain? Here's A Comprehensive Guide for Beginners*, <https://www.leewayhertz.com/what-is-blockchain/>, dostęp 7.10.2024.
 - [35] *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index*, <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/comparisons>, dostęp 7.10.2024.
 - [36] Emma Avon, *The DAO hack - what happened and what followed?*, <https://coincodex.com/article/22137/next-cryptocurrency-to-explode/> (2017), dostęp 7.10.2024.
 - [37] Artem Minaev, *The DAO Hack: Understanding the Infamous Attack*, <https://cryptodose.net/learn/the-dao-hack/> (2023), dostęp 7.10.2024.
 - [38] *What Is Blockchain? The Tech Behind Crypto Explained*, <https://www.gemini.com/cryptopedia/blockchain-technology-explained>, dostęp 7.10.2024.
 - [39] *Blockchain: Wyjaśnienie technologii leżącej u podstaw kryptowalut*, <https://oclab.pl/>

- blockchain-wyjasnienie-technologiei-lezacej-u-podstaw-kryptowalut/, dostęp 7.10.2024.
- [40] Aaron Hankin, *Bitcoin Pizza Day: Celebrating the 10,000 BTC Pizza Order*, <https://www.investopedia.com/news/bitcoin-pizza-day-celebrating-20-million-pizza-order/> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [41] *What Was Mt. Gox? Definition, History, Collapse, and Future*, <https://www.investopedia.com/terms/m/mt-gox.asp> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [42] *Centralized vs. decentralized crypto exchanges*, <https://cointelegraph.com/learn/centralized-vs-decentralized-crypto-exchanges> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [43] *Cryptocurrency Exchanges*, <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/cryptocurrency/cryptocurrency-exchanges/>, dostęp 7.10.2024.
 - [44] Mohammad Shahid, *Decentralized Exchanges Explained: How To Use A DEX*, <https://cryptomaniaks.com/how-to-use-decentralized-exchange-dex> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [45] Tasho Tashev, *What is a CEX (centralized crypto exchange)?*, <https://www.webopedia.com/crypto/learn/what-is-a-cex-centralized-crypto-exchange/> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [46] Jan R., *Exploring Arbitrage in Crypto Markets: Insights & Tips*, <https://market-bulls.com/arbitrage-in-crypto-markets/> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [47] *The Crypto Market's Pulse: How to Take the Crypto Trading Volume's Measure*, <https://bitsgap.com/blog/what-is-a-trading-volume-in-cryptocurrency-and-why-is-it-important>, dostęp 7.10.2024.
 - [48] James Chen, *Exchange-Traded Fund (ETF): How to Invest and What It is*, <https://www.investopedia.com/terms/e/etf.asp> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [49] Anndy Lian, *The SEC's Approval of Spot Ethereum ETFs: Why It Matters*, <https://www.techopedia.com/sec-approval-of-spot-ethereum-etfs-why-it-matters> (2024), dostęp 7.10.2024.
 - [50] *Szereg czasowy*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Szereg_czasowy, dostęp 7.10.2024.
 - [51] Marcin Wątopek, *Ilościowe charakterystyki złożoności światowego rynku kryptowalut* (2020), dostęp 7.10.2024.
 - [52] Vasiliki Plerou, Parameswaran Gopikrishnan, Bernd Rosenow, Luí's A. Nunes Amaral, Thomas Guhr, H. Eugene Stanley, *Random matrix approach to cross correlations in financial data*, *Physical Review E*, Volume 65, 066126, (2002) dostęp 7.10.2024.
 - [53] Darko Stosic, Dusan Stosic, Teresa B. Ludermir, Tatijana Stosic, *Collective behavior of cryptocurrency price changes*, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* Volume 507, Pages 499-509 (2018), dostęp 7.10.2024.
 - [54] S. Drożdż, J. Kwapien, F. Grummer, F. Ruf, J. Speth, *Quantifying the dynamics of financial correlations*, *Physica A* 299, 144–153 (2001), dostęp 7.10.2024.
 - [55] Jarosław Kwapien, Stanisław Drożdż, *Physical approach to complex systems*, *Physics Reports*, Volume 515, Issues 3–4, Pages 115-226 (2012), dostęp 7.10.2024.
 - [56] E. Brigatti, V. Rocha Grecco, A. R. Hernández, M. A. Bertella, *Inferring interactions in multispecies communities: The cryptocurrency market case*, (2023) dostęp 7.10.2024.
 - [57] *Współczynnik korelacji Pearsona*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Wsp%C3%B3%C5%82czynnik_korelacji_Pearsona, dostęp 7.10.2024.
 - [58] *Correlation in The Context of Cryptocurrencies*, <https://>

- [//www.bitget.com/academy/Correlation-in-The-Context-of-Cryptocurrencies](https://www.bitget.com/academy/Correlation-in-The-Context-of-Cryptocurrencies) (2022), dostęp 7.10.2024.
- [59] *Correlation*, https://en.wikipedia.org/wiki/Correlation#Correlation_matrices, dostęp 7.10.2024.
- [60] *Eigenvalues and Eigenvectors*, <https://online.stat.psu.edu/stat505/lesson/4/4.5>, dostęp 7.10.2024.
- [61] Wątopek, Paweł Szydło, Jarosław Kwapien, Stanisław Drożdż, *Correlations versus noise in the NFT market*, (2024), dostęp 7.10.2024.
- [62] Laurent Laloux, Pierre Cizeau, Jean-Philippe Bouchaud, Marc Potters, *Noise Dressing of Financial Correlation Matrices*, 2008 Physical Review Letters 83(7):1467 (1999), dostęp 7.10.2024.
- [63] An Pham Ngoc Nguyen, Tai Tan Mai, Marija Bezbradica, Martin Crane, *Volatility and returns connectedness in cryptocurrency markets: Insights from graph-based methods*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications (2023), dostęp 7.10.2024.
- [64] Marcos M. López de Prado, *Machine Learning for Asset Managers Elements In Quantitative*, Elements In Quantitative Finance (2020), dostęp 7.10.2024.
- [65] *Tron*, <https://coincodex.com/crypto/tron/>, dostęp 7.10.2024.
- [66] Adam Back, *Hashcash - A Denial of Service Counter-Measure* (2002), dostęp 7.10.2024.
- [67] *Ceny kryptowalut według kapitalizacji rynkowej*, <https://www.coingecko.com/pl>, dostęp 7.10.2024.

Spis rysunków

3.1	Średni wolumen na 24 godziny dla giełdy Binance	28
3.2	Średni wolumen na 24 godziny dla giełdy Bybit	28
4.1	Macierz korelacji C_{ij} kryptowalut dla giełdy Binance	29
4.2	Macierz korelacji C_{ij} kryptowalut dla giełdy Bybit	30
4.3	Rozkład elementów pozadiagonalnych macierz korelacji C_{ij} kryptowalut dla giełdy Binance	32
4.4	Górny wykres przedstawia rozkład gęstości prawdopodobieństwa określającą rozkład wartości własnych macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Binance. Dolny wykres przedstawia przybliżenie rozkładu Marchenko-Pastura.	33
4.5	Górny wykres przedstawia rozkład gęstości prawdopodobieństwa określającą rozkład wartości własnych macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Bybit. Dolny wykres przedstawia przybliżenie rozkładu Marchenko-Pastura.	34
4.6	Składowe wektora własnego odpowiadającego największej wartości własnej z macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Binance	36
4.7	Składowe wektora własnego odpowiadającego największej wartości własnej z macierzy korelacji C_{ij} dla giełdy Bybit	37

Spis tabel

3.1	Tabela z listą nazw kryptowalut z symbolami oraz procent braków w wolumenie dla giełdy Binance i Bybit - część 1	26
3.2	Tabela z listą nazw kryptowalut z symbolami oraz procent braków w wolumenie dla giełdy Binance i Bybit - część 2	27