Univerza v Ljubljani
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Žan Pižmoht

Sistem za zagotavljanje zaupanja v dobavni verigi zdravil z uporabo verige blokov

magistrsko delo

magistrski študijski program druge stopnje
računalništvo in informatika

Mentor: prof. dr. Vlado Stankovski
Somentor: doc. dr. Petar Kochovski

Ljubljana, 2025

Zahvala

Na tem mestu zapišite, komu se zahvaljujete za izdelavo magistrske naloge. V zahvali se poleg mentorja spodobi omeniti vse, ki so s svojo pomočjo prispevali k nastanku vašega izdelka.

Žan Pižmoht, 2025

Vsem rožicam tega sveta.

"The only reason for time is so that everything doesn't happen at once."

— Albert Einstein

Kazalo

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
CA	classification accuracy	klasifikacijska točnost
DBMS	database management system	sistem za upravljanje podatkovnih baz
SVM	support vector machine	metoda podpornih vektorjev
...	...	...

Povzetek

Naslov: Sistem za zagotavljanje zaupanja v dobavni verigi zdravil z uporabo verige blokov

V vzorcu je predstavljen postopek priprave magistrskega dela z uporabo okolja LaTeX. Vaš povzetek mora sicer vsebovati približno 100 besed, ta tukaj je odločno prekratek. Dober povzetek vključuje: (1) kratek opis obravnavanega problema, (2) kratek opis vašega pristopa za reševanje tega problema in (3) (najbolj uspešen) rezultat ali prispevek magistrske naloge.

Ključne besede

zaupanje, tehnologija veriženja blokov, dobavna veriga zdravil

Abstract

Title: Trust System in Pharmaceutical Supply Chain Using Blockchain

This sample document presents an approach to typesetting your BSc thesis using LaTeX. A proper abstract should contain around 100 words which makes this one way too short. A good abstract contains: (1) a short description of the tackled problem, (2) a short description of your approach to solving the problem, and (3) (the most successful) result or contribution in your thesis.

Keywords

trust, blockchain, pharmaceutical supply chain

Poglavje 1

Uvod

Poglavje 2

Pregled literature in ozadje

To poglavje združuje temeljne koncepte, na katerih temelji sistem, razvit v okviru magistrske naloge. Začnemo z razumevanjem zaupanja in njegovih lastnosti ter s pregledom pristopov, ki se v razpršenih sistemih uporabljajo za njegovo modeliranje in ocenjevanje. V nadaljevanju se posvetimo farmacevtskim dobavnim verigam, kjer izpostavimo ključne težave, ki se pojavljajo pri zagotavljanju sledljivosti, varnosti in sodelovanja med akterji. Tu omenimo obstoječe rešitve, ki se že uporabljajo v praksi in predstavimo probleme, ki jih te rešitve imajo. Sledi pregled tehnologije veriženja blokov, pametnih pogodb in orakljev, ki danes predstavljajo pomemben del modernih decentraliziranih arhitektur. Poglavje zaključimo s predstavitvijo semantičnega spleta in ontoloških metod, ki so potrebne za formalno opisovanje akterjev in njihovih lastnosti. Ta poglavja skupaj strnemo v množico, v kateri lahko prepoznamo vrzeli obstoječih pristopov in pripravimo teren za rešitev, ki jo predstavimo v nadaljevanju naloge.

2.1 Zaupanje

Pojem zaupanja je temeljni gradnik pri zasnovi našega sistema za farmacevtsko dobavno verigo. Zaupanje je kompleksen, večdimenzionalen in interdisciplinaren koncept, ki ga obravnavajo različne vede. Obravnava se v sociologiji,

psihologiji, ekonomiji, računalništvu in še ostalih vedah. Prav zaradi te raznolikosti v literaturi ne obstaja enotna definicija, temveč več pristopov, ki poudarjajo različne vidike [1, 2].

2.1.1 Definicije zaupanja

V družboslovnem kontekstu je zaupanje pogosto opredeljeno kot stanje pozitivnih pričakovanj glede dejanj druge osebe v okoliščinah, kjer obstaja določena stopnja tveganja [3]. Gambetta [4] zaupanje definira kot subjektivno verjetnost, da bo agent opravil določeno dejanje, še preden je to mogoče preveriti. Mayer, Davis in Schoorman [5] pa ga opredelijo kot pripravljenost ene stranke, da se izpostavi ranljivosti glede na dejanja druge stranke, ob pričakovanju, da bo ta delovala v skladu s pričakovanji.

V digitalnem okolju se koncept zaupanja prenaša iz družbenega v tehnični kontekst. Denning [6] trdi, da je zaupanje v sistem lastnost, ki jo je mogoče formalno določiti in jo modelirati. Sistem je torej zaupanja vreden, če mu njegovi uporabniki zaupajo glede na opaženo skladnost z vnaprej določenimi standardi. Grandison in Sloman [2] zaupanje obravnavata kot kvalificirano prepričanje zaupnika o kompetentnosti, integriteti, varnosti in zanesljivosti zaupanja vrednega subjekta.

2.1.2 Lastnosti zaupanja

Zaupanje je po svoji naravi večdimenzionalen pojem, ki ga ni mogoče zajeti z eno samo definicijo. V literaturi se ponavlja, da zaupanje vključuje čustvene in vedenjske komponente, ki se med seboj prepletajo in vplivajo na odločanje posameznika ali sistema [7, 8]. V družbenem kontekstu gre za pripravljenost posameznika, da se izpostavi tveganju na podlagi prepričanja, da bo druga stran delovala predvidljivo in skladno s pričakovanji. V informacijskih sistemih pa to pomeni sposobnost sistema, da sprejema odločitve o sodelovanju na podlagi preteklih izkušenj in ocenjene zanesljivosti entitet.

Zaupanje obstaja le v razmerju med dvema ali več entitetami, kjer ena

zaupa drugi v določeni situaciji ali kontekstu. Takšno razmerje je dinamično, saj se lahko stopnja zaupanja sčasoma povečuje ali zmanjšuje. Poleg tega je zaupanje asimetrično: dejstvo, da entiteta A zaupa entiteti B, še ne pomeni, da bo tudi B zaupala A [5].

Ena od osrednjih značilnosti zaupanja je njegova povezanost s tveganjem in negotovostjo. Zaupanje je smiselno le v okoliščinah, kjer obstaja možnost, da drugi akter ne bo ravnal skladno s pričakovanji [3]. Če bi imeli popoln nadzor ali popolno informacijo, zaupanje sploh ne bi bilo potrebno. V kontekstu varnostnih in distribucijskih sistemov zaupanje dopolnjuje formalne zaščitne mehanizme, kot so avtentikacija in šifriranje, saj omogoča oceno vedenja akterjev tam, kjer tehnični ukrepi ne zadostujejo [6].

Zaupanje je tudi subjektivno in kontekstualno. Različni akterji lahko enake vedenjske vzorce interpretirajo različno, odvisno od svojih ciljev, izkušenj, regulatornih zahtev, prepričanj itn.

2.1.3 Atributi zaupanja

Da bi bilo zaupanje uporabno v digitalnem okolju, ga je potrebno izraziti z merljivimi atributi, ki opisujejo lastnosti ali vedenje zaupanja vrednega subjekta. Ti atributi omogočajo, da se konceptualna ideja zaupanja preslika v formalne modele. V literaturi se pojavljajo različne skupine atributov.

Klasični modeli, kot sta Mayer, Davis in Schoorman [5] ter McKnight in Chervany [7], opredeljujejo tri temeljne dimenzije zaupanja: kompetentnost, integriteto in dobrohotnost. Kompetentnost se nanaša na sposobnost entitete, da učinkovito izvede nalogo, integriteta na njeno zavezanost etičnim in profesionalnim načelom, dobrohotnost pa na odsotnost namere povzročiti škodo. Kasneje so bili tem trem dodani še predvidljivost in zanesljivost, ki poudarjata konsistentnost vedenja skozi čas.

V digitalnih in porazdeljenih okoljih so se pojavili dodatni atributi, ki izhajajo iz tehničnih vidikov zaupanja. Grandison in Sloman [2] zaupanje opišeta kot prepričanje o kompetentnosti, varnosti in verodostojnosti drugega subjekta. Denning [6] poudarja, da je zaupanja vrednost sistema mogoče oce-

njevati tudi z vidika varnosti, skladnosti s pravili ter preverljivosti delovanja. Ti atributi omogočajo formalno ocenjevanje zaupanja med akterji.

V farmacevtski dobavni verigi imajo atributi zaupanja izrazito regulatorno in sledilno komponento. Uddin in sodelavci [9] poudarjajo, da so pri zagotavljanju zaupanja ključni kazalniki sledljivost, pristnost in celovitost podatkov. Kayhan in sodelavci [10] izpostavljajo še pomen transparentnosti, nespremenljivosti in izvorne sledljivosti (angl. *provenance*), ki jih omogoča tehnologija veriženja blokov.

Predstavljeni atributi ne predstavljajo univerzalne množice meril, temveč zbirko značilnosti, ki jih lahko posamezen akter uporabi pri lastni presoji zaupanja. V sistemu, ki je predstavljen v tej nalogi, se atributi uporabljajo predvsem kot podatkovne lastnosti (angl. *data properties*) v ontologiji. Te omogočajo, da akterji formalno zapišejo svoje kriterije za ocenjevanje drugih entitet. S tem v sistemu omogočamo standardizirano predstavitev vhodnih metrik, ki jih posamezni akterji uporabljajo pri svojem algoritmu za izračunavanje zaupanja.

2.2 Upravljanje zaupanja v razpršenih sistemih

Huaizhi Li in Mukesh Singhal v članku *Trust Management in Distributed Systems* [11] opredelita upravljanje zaupanja kot proces zbiranja informacij, potrebnih za vzpostavitev zaupanja med entitetami, ter dinamičnega spremljanja in prilagajanja obstoječih razmerij zaupanja. Avtorja poudarjata, da v razpršenih okoljih kot so internet, sistemi enakovrednih entitet (angl. `peer-to-peer`) in mobilna omrežja ad hoc pogosto sodelujejo entitete, ki se med seboj ne poznajo. Zato zaupanje postane ključni mehanizem za zmanjšanje tveganja in zagotavljanje sodelovanja. Namen sistema za upravljanje zaupanja je ohranjati ažurne in skladne informacije o zaupanju med akterji v omrežju.

2.2.1 Dokazni modeli zaupanja

Dokazni modeli temeljijo na preverljivih dokazih, kot so digitalna potrdila, javni ključi ali kriptografski podpisi. Ti pristopi zagotavljajo preverjanje identitete in integritete entitet, ne pa tudi njihove dejanske zanesljivosti. Najpogostejša primera sta hierarhični sistem X.509 [12] in decentralizirani sistem PGP [13], kjer se zaupanje posreduje prek verige certifikatov oziroma prek subjektivnih ocen uporabnikov. Tak model se uporablja predvsem pri inicializaciji zaupanja in zagotavlja osnovno preverjanje pristnosti brez ocenjevanja vedenja.

2.2.2 Priporočilni modeli zaupanja

Priporočilni modeli gradijo zaupanje na osnovi izkušenj in posredovanih ocen drugih entitet. Vsaka entiteta ocenjuje druge glede na pretekle interakcije, te ocene pa se lahko delijo naprej kot priporočila. Model uporablja pogojno tranzitivnost zaupanja – entiteta A lahko zaupa entiteti C, če A zaupa B kot priporočitelju in lahko ovrednoti njegovo oceno.

Pri tem se uporablja zvezna vrednost zaupanja tv_T med 0 in 1, izračunana iz vrednosti priporočil po poti $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$. Za končno vrednost se uporabi zmnožek delnih zaupanj na poti:

$$tv_T = \prod_{i=1}^{n} \frac{rtv(i)}{4} \times tv(T)$$

kjer $rtv(i)$ predstavlja stopnjo zaupanja v posameznega posrednika, $tv(T)$ pa končno vrednost zaupanja v ciljno entiteto. Če obstaja več poti med akterjema, se končna vrednost določi kot povprečje rezultatov posameznih poti.

2.2.3 Porazdeljeno ocenjevanje zaupanja

V omrežjih enakovrednih akterjev (angl. *peer-to-peer*) se zaupanje ocenjuje decentralizirano. Vsako vozlišče vodi lastno evidenco interakcij in vrednoti

druge glede na uspešnost sodelovanja. Xiong in Liu predlagata metriko, ki temelji na razmerju med pozitivnimi in negativnimi interakcijami:

$$T(u,t) = \frac{\sum_{v \in P, v \neq u} S(u,v,t)\, Cr(v,t)}{\sum_{v \in P, v \neq u} I(u,v,t)}$$

kjer $S(u,v,t)$ označuje zadovoljstvo uporabnika u z v do časa t, $Cr(v,t)$ je korekcijski faktor za filtriranje povratnih informacij, $I(u,v,t)$ pa število interakcij med u in v. Rezultat $T(u,t)$ je vedno v intervalu $(0,1)$ in predstavlja trenutno stopnjo zaupanja v entiteto. Sistem lahko določi pragove C_1 in C_2, pri čemer entiteta velja za zaupanja vredno, če velja $I(u,t) > C_1$ in $T(u,t) > C_2$.

Takšni sistemi so učinkoviti pri akumuliranju ocen, vendar občutljivi za napačne ali zlonamerne povratne informacije. Zato številne rešitve uvajajo uteževanje priporočil glede na zanesljivost virov ali časovno starost podatkov.

2.2.4 Dinamično posodabljanje zaupanja

Ker se vedenje akterjev sčasoma spreminja, se mora zaupanje prilagajati novim podatkom. Posodobitev vrednosti se pogosto izvede z amortizacijskimi ali diskontnimi faktorji, ki dajejo večjo težo nedavnim interakcijam. Primer takega mehanizma je izračun nove vrednosti zaupanja po zaključeni interakciji:

$$T_{\text{new}} = \frac{r + N\, T_{\text{old}}\, e^{-\beta \Delta t}}{1 + N\, e^{-\beta \Delta t}}$$

kjer T_{old} predstavlja prejšnjo vrednost zaupanja, r novo oceno po transakciji, N število izvedenih interakcij, β faktor dušenja, Δt pa čas od zadnje posodobitve. Na ta način sistem zagotavlja, da nove izkušnje hitreje vplivajo na oceno, stare pa postopoma izgubijo težo.

2.2.5 Povezava z našo rešitvijo

Predstavljeni modeli zaupanja predstavljajo osnovo za delovanje razvitega sistema. Vsak akter v dobavni verigi lahko uporabi svoj način izračuna zaupanja, ki temelji na dokazih, priporočilih ali dinamičnih metrikah. Sistem ne

vsiljuje enotnega algoritma, temveč omogoča, da akter sam oblikuje pravila na podlagi podatkov iz ontologije. Rezultati teh izračunov se shranjujejo v verigo blokov, ki deluje kot skupen in trajen zapis ocen. S tem smo združili različne pristope v enoten sistem, kjer je zaupanje merljivo in preverljivo.

2.3 Farmacevtske dobavne verige

2.3.1 Značilnosti in pomen sledljivosti

Farmacevtska dobavna veriga je ena najbolj reguliranih in kompleksnih industrijskih verig. Vključuje proizvajalce, distributerje, prevoznike, lekarne, regulatorne agencije in končne uporabnike [14]. Zaradi velikega števila vmesnih akterjev in globalnega obsega poslovanja je nadzor nad izvorom in kakovostjo zdravil zahtevna naloga.

Sledenje zdravilom omogoča identifikacijo posamezne serije skozi celoten življenjski cikel izdelka, od proizvodnje do izdaje pacientu [10]. Natančno beleženje gibanja zdravil preprečuje vstop ponaredkov v sistem in omogoča hitro ukrepanje ob odpoklicih ali neskladjih. Sledljivost je zato neposredno povezana z varnostjo pacientov in zaupnostjo zdravstvenega sistema [15].

Za zagotavljanje sledljivosti so regulatorji uvedli stroge predpise. Evropska unija je sprejela Direktivo o ponarejenih zdravilih (2011/62/EU) [16] in Delegirano uredbo (EU) 2016/161 [17], ki zahtevata enolično označevanje embalaže z dvodimenzionalno kodo in uporabo evropskega sistema EMVS. V ZDA podobno vlogo opravlja zakon DSCSA, ki uvaja popolnoma digitalno sledenje zdravil do leta 2025 [18].

Ti ukrepi predstavljajo pomembne korake k večji sledljivosti, vendar še vedno temeljijo na centraliziranih bazah podatkov, kjer posamezni akterji nimajo popolnega vpogleda v celotno verigo.

2.3.2 Izzivi in tveganja

Kljub regulacijam farmacevtske dobavne verige ostajajo izpostavljene številnim tveganjem. Največji problem predstavljajo ponarejena in neustrezna zdravila, katerih število v zadnjih letih narašča. Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije je bilo med letoma 2017 in 2021 zabeleženih 877 incidentov ponarejenih ali neustreznih medicinskih izdelkov, kar pomeni povprečno letno rast za 36 % [19]. Ti izdelki so bili zaznani v vseh regijah sveta, tudi v državah z razvitimi regulativnimi sistemi. Ponarejena zdravila so lahko neučinkovita ali nevarna, njihova prisotnost pa neposredno ogroža zdravje pacientov in zmanjšuje zaupanje javnosti v zdravstvene sisteme.

Drugo tveganje izhaja iz razdrobljenosti informacijskih sistemov. Podatki o serijah, skladiščih in pošiljkah se pogosto hranijo v ločenih bazah, ki med seboj niso povezane [9]. To povzroča zamude, napake in oteženo preverjanje izvora zdravila. Centralizirane rešitve, kot je EMVS, sicer izboljšajo preverjanje avtentičnosti, vendar ne rešujejo težave zaupanja med različnimi organizacijami, ki podatke ustvarjajo in posredujejo.

Poleg ponarejanja in pomanjkljive sledljivosti se pojavljajo tudi tveganja, povezana z motnjami v dobavi zdravil. V kriznih obdobjih, kot so pandemije ali politične napetosti, se zaradi pomanjkanja podatkov o zalogah in zanesljivosti partnerjev pogosto pojavijo nepričakovane prekinitve dobav. Takšni dogodki razkrivajo, kako pomembno je zaupanje med organizacijami in pravočasna izmenjava podatkov.

Kljub tehnološkim in pravnim izboljšavam obstoječi modeli še vedno ne zagotavljajo celovitega vpogleda v dogajanje znotraj verige. Potrebne so rešitve, ki združujejo varno upravljanje podatkov, decentralizirano preverjanje in semantično usklajevanje informacij med akterji.

2.3.3 Regulativni okvir in trenutne rešitve

Evropska zakonodaja temelji na Direktivi o ponarejenih zdravilih (2011/62/EU) [16] ter Delegirani uredbi (EU) 2016/161 [17]. Skupaj uvajata obvezne var-

nostne elemente na embalaži, dvodimenzionalno kodo ter sistem EMVS (European Medicines Verification System). EMVS omogoča preverjanje serijske številke ob izdaji zdravila, sistemi NMVS pa sodelujejo prek skupnega evropskega vozlišča. Sistem zaznava poskuse ponarejanja v fazi distribucije, ne omogoča pa vpogleda v celotno zgodovino serije, saj temelji na centralizirani arhitekturi [10].

V ZDA sledljivost ureja zakon DSCSA (Drug Supply Chain Security Act), ki je del zakona DQSA iz leta 2013 [18]. DSCSA uvaja elektronsko izmenjavo treh vrst podatkov: transakcijske informacije, zgodovine transakcij in izjave o skladnosti. Sistem zahteva popolnoma interoperabilno sledljivost do leta 2025. Kljub napredku ameriški model ostaja pretežno centraliziran, podatki pa se prenašajo predvsem med neposrednimi poslovnimi partnerji [9].

Na mednarodni ravni Svetovna zdravstvena organizacija (WHO) pripravlja smernice za dobre distribucijske prakse in spremlja pojav ponarejenih in neustreznih izdelkov.

Za izpolnjevanje regulativnih zahtev podjetja uporabljajo različne informacijske platforme, med katerimi so najpogostejše centralizirane rešitve, kot so že omenjeni EMVS, TraceLink in SAP ATTP. Te rešitve izboljšujejo sledljivost serij in omogočajo avtomatizirano poročanje regulatorjem, vendar ne omogočajo skupnega vpogleda v podatke ali preverjanja zanesljivosti akterjev po celotni verigi [10]. Podatkovni tokovi ostajajo razdrobljeni, zanašajo pa se tudi na zaupanja vredne posrednike.

V zadnjem desetletju se pojavljajo projekti, ki preučujejo uporabo tehnologije veriženja blokov v farmacevtskih dobavnih verigah. Projekta MediLedger v ZDA in PharmaLedger v Evropi uporabljata porazdeljene zapise za izboljšanje integritete in sledljivosti podatkov [9]. Takšni pristopi dokazujejo, da blockchain omogoča nespremenljivost zapisov in enostavnejše preverjanje informacij, vendar večinoma rešujejo le problem integritete podatkov.

Kljub temu večina rešitev ostaja usmerjena v zaupanje v podatke, medtem ko je upravljanje zaupanja med posameznimi organizacijami pogosto implicitno, vezano na statične pravice dostopa ali vnaprej dogovorjene po-

godbeno–pravne odnose. Manj je pristopov, kjer bi lahko vsak akter izrecno definiral svoje kriterije zaupanja in iz njih izpeljal odločitve o sodelovanju. Prav to vrzel bo zapolnil sistem, predstavljen v tej nalogi, saj kombinira semantični model dobavne verige, subjektivne politike zaupanja in zapis rezultatov v verigo blokov.

2.4 Tehnologija veriženja blokov v dobavnih verigah

Tehnologija veriženja blokov je bila prvič predstavljena leta 2008 v sklopu kriptovalute Bitcoin [20]. Osnovna ideja je zasnova podatkovne strukture, ki povezuje zapise v verigo blokov. Vsak blok vsebuje podatke, kriptografski povzetek prejšnjega bloka in časovno oznako. Takšna vezava med bloki preprečuje naknadne spremembe podatkov, saj bi sprememba v enem bloku povzročila neujemanje celotne verige [21].

Veriga blokov deluje v porazdeljenem omrežju, kjer vsako vozlišče hrani kopijo celotne verige. Soglasje o pravilnem zaporedju blokov se doseže s konsenznim mehanizmom. V javnih verigah se pogosto uporabljata t. i. Proof of Work ali Proof of Stake, medtem ko dovoljena omrežja uporabljajo lažje mehanizme, ki temeljijo na znanih udeležencih. Zaradi porazdeljene narave sistem ne potrebuje centralne avtoritete, kar omogoča zanesljivo beleženje podatkov v okolju z različnimi deležniki.

Poleg javnih omrežij, kot je Ethereum, so v praksi pogosta dovoljena omrežja, kjer je dostop omejen na pooblaščene organizacije. Primer takšnega sistema je Hyperledger Fabric [22]. Ta pristop omogoča višjo prepustnost, večjo zasebnost podatkov in nadzor nad identitetami v omrežju. V dobavnih verigah so takšne lastnosti ključne, saj morajo podjetja varovati poslovne podatke, hkrati pa zagotavljati zanesljivo izmenjavo informacij.

Verige blokov omogočajo nespremenljiv zapis dogodkov, preverljivo zgodovino podatkov in enoten pogled na transakcije. To so pomembne zahteve farmacevtskih dobavnih verig, saj želimo omgočiti transparenten pogled na

transakcije v takšnem sistemu.

2.4.1 Pametne pogodbe

Pametne pogodbe predstavljajo enega ključnih konceptov sodobnih verig blokov. Gre za programe, ki se shranijo in izvajajo neposredno v verigi blokov ter se sprožijo, ko so izpolnjeni določeni pogoji. Ethereum je prvi uvedel splošno platformo za izvajanje pametnih pogodb prek navideznega stroja EVM (Ethereum Virtual Machine), ki omogoča deterministično izvajanje kode na vseh vozliščih omrežja [23].

Pametne pogodbe omogočajo avtomatizacijo pravil in procesov, pri čemer ni potrebno zaupati enemu samemu posredniku. Njihovo delovanje je predvidljivo, saj se vedno izvršijo natančno tako, kot je določeno v kodi. Zaradi teh lastnosti se pogosto uporabljajo v scenarijih, kjer je treba uveljaviti dogovorjena pravila med neodvisnimi akterji. V dobavnih verigah se uporabljajo za potrjevanje dogodkov, registracijo premikov blaga ter preverjanje skladnosti podatkov.

V modelih, ki temeljijo na verigi blokov, pametne pogodbe služijo tudi kot enotna plast poslovne logike. S tem omogočajo, da vsi akterji delujejo na osnovi istega sklopa pravil. To je posebej pomembno v okoljih, kjer se morajo organizacije dogovarjati o interpretaciji podatkov ali izvajanju procesov. Pametne pogodbe z nespremenljivo kodo zagotovijo, da se pravila ne spreminjajo brez soglasja deležnikov.

V predstavljenem sistemu ima pametna pogodba osrednjo vlogo, saj hrani rezultate ocenjevanja zaupanja in omogoča preverjanje vzpostavljenih razmerij med akterji. Pogodba vsebuje funkcije za zapisovanje rezultatov, njihovo posodabljanje in preverjanje stanja zaupanja. Tako tvori register zaupanja, ki je dostopen vsem udeležencem verige.

2.4.2 Orakli v pametnih pogodbah

Pametne pogodbe lahko zanesljivo izvajajo le pravila nad podatki, ki so že zapisani na verigi blokov. Ker so verige blokov zasnovane kot zaprt, deterministič en sistem, nimajo neposrednega dostopa do zunanjega sveta. Da bi pametne pogodbe lahko reagirale na dogodke iz realnega okolja (cene na trgu, vremenske razmere, meritve senzorjev, podatke informacijskih sistemov), potrebujemo posrednika, ki te podatke pridobi in jih v preverljivi obliki posreduje na verigo. Tak posrednik se imenuje orakelj [24].

Caldarelli oraklje opiše kot celoten ekosistem, ki povezuje zunanje vire podatkov z decentralizirano aplikacijo [25]. Tipično ga sestavljajo trije deli: vir podatkov, komunikacijski kanal in pametna pogodba. Vir podatkov je lahko spletni vmesnik API, podatkovna baza, senzor v internetu stvari ali celo človek, ki potrdi nek dogodek.

Komunikacijski kanal predstavlja vozlišče oziroma niz vozlišč, ki podatke zbrane iz vira prevedejo v obliko transakcije in jih pošljejo pametni pogodbi. Pametna pogodba na drugi strani vsebuje pravila, s katerimi sprejme ali zavrne posredovane podatke in na njihovi podlagi sproži ustrezno logiko.

Ker oraklji ponovno uvajajo zaupanje v zunanje subjekte, se je v literaturi uveljavil pojem *problem oraklja* (angl. oracle problem) [24]. Blockchain sam po sebi nudi lastnosti, kot so nespremenljivost, deterministično izvajanje in odpornost proti cenzuri, vendar te lastnosti ne veljajo avtomatično za podatke, ki prihajajo preko oraklja. Če vir podatkov ni zanesljiv ali je komunikacijski kanal centraliziran, lahko napačni podatki povzročijo napačno izvedbo pametne pogodbe, ne da bi to bilo na verigi neposredno razvidno. Zato je v skupnosti poudarjena potreba po jasnem modelu zaupanja za vsak orakelj. Ta mora opisati, kakšen je motiv oraklja, da deluje pošteno, in kako sistem zazna ali kaznuje odstopanja [24].

V praksi se pojavlja več arhitektur, ki omogočajo delovanje orakljev. Najpreprostejši so centralizirani oraklji, kjer ena organizacija zbira podatke in jih pošilja pametnim pogodbam. Tak pristop je enostaven za implementacijo, vendar ponovno uvaja enotno točko zaupanja in napake. Sledijo jim poraz-

deljeni oziroma decentralizirani oraklji, kjer več neodvisnih vozlišč pridobiva in agregira podatke ter tako zmanjšuje tveganje manipulacije. Primer takšne zasnove je sistem ASTRAEA, ki uporabi glasovalno igro z vložki (angl. stake) in ločene vloge udeležencev (oddajatelji trditev, glasovalci, certificiranci), da z ekonomsko motivacijo spodbudi udeležence k poštenemu poročanju o resničnosti trditev [26]. Podobno pristopajo tudi druge rešitve, kjer se omrežja orakljev, kot je Chainlink, uporabljajo za zbiranje podatkov iz več API-jev in senzorjev ter za izračun dodatnih metrik (npr. reputacije) še pred zapisom v verigo blokov [27].

V okviru te naloge oraklje obravnavamo kot ločeno plast med semantičnim delom sistema in verigo blokov. Podobno kot pri Chainlinku smo zasnovali decentralizirano omrežje pametnih orakljev, kjer teče koda. Ta iz ontologije in pravil zaupanja prebere podatke, izvede izračun zaupanja ter rezultat posredujejo pametni pogodbi. S tem sledimo pristopu, ki ga Kochovski in sodelavci imenujejo *pametni oraklji brez zaupanja* (angl. trustless smart oracles), kjer so oraklji zasnovani tako, da so preverljivi in zamenljivi, veriga blokov pa služi kot nespremenljiv dnevnik rezultatov, ki jih izračunajo oraklji [27]. Na ta način odpravimo potrebo po centraliziranem zaupnem posredniku, hkrati pa omogočimo, da se različne implementacije orakljev oz. različni izračuni zaupanja enotno zapišejo v register zaupanja na verigi blokov. Podrobnejši opis delovanja decentraliziranega sistema orakljev si bomo pogledali v poglavju 3.

2.4.3 Decentralizirane identitete in preverljiva dokazila

Decentralizirane identitete (DID) predstavljajo mehanizem za dosledno in preverljivo identifikacijo akterjev v decentraliziranih okoljih. Standard W3C DID opisuje identifikatorje, ki niso vezani na centraliziranega ponudnika, temveč so pod nadzorom lastnika identitete [28]. DID je globalno enoličen identifikator, na primer `did:ethr:0x1234...`, pri čemer se podatki o tem, kako identiteto preveriti, hranijo v tako imenovanem DID dokumentu. Ta

dokument vsebuje javne ključe, metode preverjanja in dodatne atribute, ki jih sistem lahko uporabi pri avtentikaciji.

Preverljiva dokazila (angl. Verifiable Credentials - VC) so standardizirana digitalna dokazila, ki jih neka entiteta izda drugi entiteti. Model W3C sledi arhitekturi izdajatelj–imetnik–preveritelj. Izdajatelj (Issuer) ustvari in podpiše dokazilo, imetnik (Holder) ga hrani, preveritelj (Verifier) pa ga validira s pomočjo kriptografskih podpisov [29]. VC omogočajo prenos lastnosti ali certifikatov na način, ki je preverljiv, varen in ne potrebuje zaupanja v posrednika. V literaturi so prepoznani kot jedrni gradnik digitalnih identitet, ki združujejo suverenost uporabnika, interoperabilnost ter preverljivost podatkov [30].

V predstavljenem sistemu ima vsak akter v ontologiji lasten DID. DID služi kot osnovni identifikator, na katerega se vežejo atributi in podatki v ontološkem grafu. Na ta način sistem ohrani enotno identiteto akterjev med vsemi plastmi arhitekture.

Preverljiva dokazila uporabljamo za opis lastnosti, ki so pomembne za ocenjevanje zaupanja. Regulator, kot je EMA, lahko na primer izda VC, ki potrjuje veljavnost licence, certifikat GMP ali rezultat presoje kakovosti. Ta dokazila so digitalno podpisana in povezana z DID akterja. Orakelj lahko med izračunom zaupanja prebere VC, preveri podpis izdajatelja ter iz podatkov izlušči metrike, ki jih akter uporablja v svoji politiki zaupanja. Če akter v svojih pravilih določi, da mora imeti partner veljavno licenco ali ustrezno oceno presoje kakovosti, lahko te kriterije pridobi neposredno iz VC.

2.5 Semantični splet in ontološke metode

Semantični splet predstavlja razširitev svetovnega spleta, kjer podatki niso opisani le sintaktično, temveč tudi semantično. To pomeni, da so podatki strukturirani na način, ki omogoča strojno razumevanje in logično sklepanje. Temeljna ideja je, da lahko različni sistemi izmenjujejo podatke v enotnih formatih ter iz njih izpeljujejo nova dejstva, ne da bi se morali dogovoriti o

skupni implementaciji ali aplikaciji [31].

RDF (Resource Description Framework) je osnovni podatkovni model semantičnega spleta. Podatke predstavlja v obliki trojk subjekt–predikat–objekt, kar omogoča enostavno združevanje in razširjanje podatkovnih grafov [32]. RDF ne predpisuje sheme, zato se lahko prilagodi različnim domenam. Zapis se pogosto izvaja v obliki Turtle, RDF/XML ali JSON-LD.

Nad RDF je zasnovan OWL (Web Ontology Language), ki omogoča formalno opisovanje razredov, lastnosti in odnosov med pojmi. OWL temelji na deskripcijski logiki, zaradi česar omogoča avtomatsko sklepanje in preverjanje konsistence ontologije [33]. Z uporabo reasonerjev lahko sistem samodejno razvršča primerke v ustrezne razrede, zazna protislovja in izpelje nova dejstva, ki niso bila eksplicitno zapisana.

Ontologije so osrednji gradnik semantičnega spleta. Predstavljajo formalne modele znanja, kjer so pojmi, lastnosti in hierarhije jasno definirani. Tak pristop je posebej uporaben v kompleksnih domenah, kjer nastopa veliko različnih akterjev in množica podatkovnih razmerij. Ontologije omogočajo enotno semantično podlago, ki ni vezana na implementacijo posameznega sistema, temveč na konceptualni model podatkov.

V predstavljenem sistemu ontologija služi kot centralni model znanja za vse akterje farmacevtske dobavne verige. RDF omogoča predstavitev akterjev in njihovih lastnosti kot povezav v grafu, OWL pa dodaja formalne razrede in omejitve, ki omogočajo avtomatsko sklepanje o lastnostih ali vlogah akterjev. Reasoner iz RDF–OWL grafa izlušči podatke, ki jih orakelj nato uporabi pri izračunu zaupanja. Z uporabo semantičnih tehnologij je mogoče podatke strukturirati na način, ki je razširljiv, interoperabilen in neodvisen od posamezne aplikacije. Zato je ontološka plast primerna kot osnova za izmenjavo informacij med različnimi organizacijami in se dobro povezuje s preostalo arhitekturo sistema.

2.6 Analiza vrzeli in prispevek te naloge

V tem poglavju smo predstavili ključne gradnike, ki so pomembni za razumevanje razvitega sistema. Najprej smo opredelili pojem zaupanja in pokazali, da gre za večdimenzionalen koncept, ki ga ni mogoče zajeti z eno samo definicijo. Različni modeli poudarjajo kompetentnost, integriteto, dobrohotnost in zanesljivost, v digitalnem okolju pa se temu pridružijo še vidiki varnosti, verodostojnosti in skladnosti z zahtevami sistema. Nato smo opisali modele upravljanja zaupanja v razpršenih sistemih ter pokazali, da se ti modeli večinoma osredotočajo na izračun številčne vrednosti zaupanja na podlagi dokazov, priporočil ali zgodovine interakcij.

V nadaljevanju smo predstavili posebnosti farmacevtskih dobavnih verig. Te verige so močno regulirane in vključujejo veliko različnih akterjev. Regulativa, kot sta evropska direktiva o ponarejenih zdravilih in zakon DSCSA v ZDA, uvaja sledljivost serij in elektronsko izmenjavo podatkov. Kljub temu ostajajo pomembne vrzeli. Obstoječi sistemi večinoma temeljijo na centraliziranih bazah podatkov, kjer posamezna podjetja nimajo celovitega vpogleda v verigo. Ponarejena ali neustrezna zdravila se še vedno pojavljajo, podatkovni tokovi pa so razdrobljeni in vezani na zaupanja vredne posrednike. Trenutne rešitve tako izboljšujejo sledljivost, ne rešujejo pa dovolj dobro vprašanja, komu lahko posamezna organizacija zaupa pri sodelovanju.

Tehnologija veriženja blokov in pametne pogodbe ponujajo nov način upravljanja podatkov v takih okoljih. Verige blokov omogočajo nespremenljiv zapis dogodkov in enoten pogled na podatke v porazdeljenem omrežju. Pametne pogodbe omogočajo izvajanje skupnih pravil, ki veljajo za vse udeležence. Oraklji rešujejo problem povezave med verigo blokov in zunanjimi viri podatkov, vendar ponovno odpirajo vprašanje, komu zaupati pri posredovanju podatkov. Semantični splet in ontologije pa omogočajo formalno predstavitev znanja o akterjih in njihovih lastnostih ter avtomatsko sklepanje nad podatki. V literaturi se ti pristopi le redko združijo v enotno arhitekturo, kjer bi imeli akterji možnost, da na podlagi skupne ontologije definirajo svoje kriterije zaupanja, rezultat teh ocen pa se nato trajno zapiše v verigo blokov.

Na tej točki se pokaže osrednja vrzel. Obstoječe rešitve za sledljivost zdravil se osredotočajo na varnost in integriteto podatkov, upravljanje zaupanja med organizacijami pa je običajno implicitno. Temelji na statičnih pravicah dostopa, pogodbah in ročnih pregledih partnerjev. Po drugi strani številni modeli zaupanja in ontološki okviri ne upoštevajo posebnosti farmacevtske domene in niso povezani z verigo blokov. Manj je pristopov, kjer bi lahko vsak akter izrecno zapisal svojo politiko zaupanja, jo vezal na skupni semantični model ter rezultate ocenjevanja delil na način, ki ga lahko drugi akterji neodvisno preverijo.

Prispevek te naloge je predlog sistema, ki te elemente poveže v enoten okvir. Ontologija farmacevtske dobavne verige predstavlja skupno semantično plast, v kateri so akterji in njihove lastnosti opisani na strukturiran in razširljiv način. Vsak akter lahko nad temi podatki definira lastna pravila zaupanja v berljivi obliki JSON in tako določi, katere metrike so zanj pomembne. Mehanizem za sklepanje iz ontologije prebere lastnosti akterjev, uporabi lokalna pravila in za vsak par udeležencev izračuna rezultat zaupanja. Decentralizirani oraklji nato te rezultate prenesejo v pametno pogodbo, ki na verigi blokov hrani register relacij zaupanja. Sistem omogoča tudi vezavo na decentralizirane identitete in preverljiva dokazila, kadar akterji želijo izvor podatkov podpreti z digitalnimi certifikati.

Tak pristop neposredno naslavlja vrzeli, opisane v tem poglavju. Namesto enotne, vnaprej določene metrike zaupanja omogoča, da vsak akter oblikuje lastno politiko na osnovi skupnega modela podatkov. Rezultati teh različnih politik so kljub temu zbrani v enoten register, ki ga lahko delijo vsi udeleženci verige. S tem sistem podpira različne poglede na zanesljivost partnerjev, hkrati pa ohranja konsistentno predstavitev identitet in podatkovnih lastnosti.

Čeprav je sistem razvit na primeru farmacevtske dobavne verige, je zasnova splošna. Ontologijo in nabor atributov bi bilo mogoče prilagoditi drugim domenam, na primer pametnim mestom ali omrežjem interneta stvari, kjer številni akterji izmenjujejo podatke in storitve. Enak vzorec se ponovi

tudi tam: skupni semantični model entitet, subjektivne politike zaupanja, modul za sklepanje in register rezultatov na verigi blokov.

V nadaljevanju naloge bomo opisali, kako je tak sistem konkretno implementiran ter kako se obnaša v izbranih scenarijih uporabe.

Poglavje 3

Implementacija sistema

3.1 Uporabljene tehnologije

Pri razvoju sistema smo uporabili različna orodja in platforme, ki skupaj omogočajo obdelavo semantičnih podatkov, izvajanje izračuna zaupanja ter zapis rezultatov v verigo blokov. V tej sekciji podajamo pregled najpomembnejših tehnologij in njihovih vlog v sistemu.

Apache Jena Fuseki Semantični podatki o akterjih in njihovih lastnostih so shranjeni v strežniku Apache Jena Fuseki, ki predstavlja RDF podatkovno bazo z dostopom prek SPARQL vmesnika. Fuseki omogoča centralizirano hrambo ontologije in primerkov ter enoten način pridobivanja podatkov za vse oraklje. Zaradi stabilnosti, enostavne uporabe in dobre združljivosti s standardi RDF je bila izbira naravna. Sistem teče v Docker vsebniku, kar omogoča hitro postavitev in ponovljivost okolja.

Ontologija v OWL/RDF Ontologija farmacevtske dobavne verige je zapisana v jeziku OWL, ki definira razrede, lastnosti in odnose med akterji. Podatki so organizirani v RDF trojkah, kar omogoča enostavno obdelavo s knjižnico `rdflib` [34] v programskem jeziku Python. Na ta način lahko sklepanje temelji na aktualnih podatkih, zapisanih v ontološkem grafu, brez

potrebe po relacijski bazi ali ročnem povezovanju.

JSON pravila zaupanja Vsak akter lahko svoje kriterije zaupanja definira v JSON obliki. JSON je izbran zaradi enostavne berljivosti in neposredne integracije s Pythonom. Pravila določajo pragove, ki jih mora akter izpolniti, na primer minimalno točnost dostave ali največjo dovoljeno stopnjo temperaturnih odstopanj. Python orakelj ta pravila interpretira in preveri, ali podatki iz ontologije ustrezajo zahtevam ocenjevalca.

Ethereum, Solidity in pametna pogodba Za zapis rezultatov izračunanega zaupanja smo uporabili verigo blokov Ethereum. Pametna pogodba `TrustGraph`, napisana v jeziku Solidity, hrani relacije zaupanja med akterji. Ethereum je bil izbran zaradi široke podpore za orodja, stabilnega ekosistema in zmožnosti izvajanja pametnih pogodb brez zaupanja v enega posrednika. Razvoj in testiranje sta izvedena s pomočjo orodja Foundry, ki nudi lokalno testno omrežje, kompilator ter hitre skripte za izvajanje transakcij.

Pametna pogodba omogoča zapis rezultatov izračuna, preverjanje stanja zaupanja in beleženje dogodkov. Deluje kot nespremenljiv register, ki je dostopen vsem akterjem sistema.

Decentralizirane identitete in preverljiva dokazila Vsak akter v ontologiji ima dodeljen decentraliziran identifikator (DID). DID služi kot enoličen identifikator, ki povezuje podatke v ontologiji s predstavnikom akterja v decentraliziranem okolju. Poleg tega sistem podpira uporabo preverljivih dokazil (VC), ki jih lahko izdajajo regulatorji, kot je EMA. Ta dokazila vsebujejo metrike, kot so veljavnost licence, GMP skladnost ali rezultati presoje kakovosti. Orakelj lahko, kadar akter to določi v pravilih, med izračunom zaupanja prebere VC in uporabi podatke kot dodatne kriterije.

Python in osnovne knjižnice Del logike sistema je implementiran v programskem jeziku Python, kjer tečejo oraklji, agregator ter orodja za upravljanje ontologije. Python je bil izbran zaradi že razvitih uporabnih knjižnic

za obdelavo podatkov, delo z RDF in integracijo z verigami blokov. Spodaj so povzete ključne knjižnice, ki jih sistem uporablja:

- `web3` in `eth_account` – knjižnica `web3` omogoča povezavo z omrežjem Ethereum oziroma lokalnim vozliščem Anvil, klicanje funkcij pametne pogodbe in pošiljanje transakcij. Modul `eth_account` se uporablja za podpisovanje poročil orakljev in preverjanje podpisov, ki jih agregator prejme.

- `aiohttp` zagotavlja asinhroni spletni strežnik in odjemalca, ki ju uporabljata agregator in oraklji. Prek njega oraklji prejemajo zahteve za izračun zaupanja, berejo podatke iz Fusekija in pošiljajo poročila nazaj agregatorju.

- `rdflib` omogoča delo z RDF grafi, razčlenjevanje OWL datotek in manipulacijo ontologije.

- `SPARQLWrapper` omogoča pošiljanje SPARQL poizvedb strežniku Apache Jena Fuseki in s tem branje lastnosti akterjev iz ontologije

- `requests` se uporablja pri pomožnih sinhronih HTTP klicih, kjer asinhrona izvedba ni potrebna ali bi otežila implementacijo.

- `click` se uporablja pri implementaciji ukaznih orodij, kot je `trustkb`, ki omogoča delo z ontologijo, uvoz podatkov in izvajanje SPARQL poizvedb iz ukazne vrstice.

- `pytest` knjižnica je bila uporabljena za enotsko testiranje ključnih modulov sistema, saj omogoča enostavno pisanje testov ter avtomatizirano preverjanje logike orakljev in agregatorja.

- `didkit` – knjižnica se uporablja v primerih, kjer se digitalna dokazila (VC) izdaja ali preverja neposredno iz Python okolja. Omogoča delo z DID metodami in verifikacijo podpisov, skladno s standardi W3C DID in VC.

Pametni oraklji Oraklji predstavljajo most med semantično plastjo in verigo blokov. Vsak orakelj zažene Python modul, ki prebere ontologijo, uporabi lokalna pravila akterja in izračuna vrednosti zaupanja. Nato preko `web3.py` pošlje transakcijo pametni pogodbi. Oraklji so zasnovani modularno, zato jih lahko organizacije poganjajo samostojno, kar omogoča decentralizirano izvajanje izračuna.

Docker Vse komponente sistema so zajete v vsebnikih Docker. To nam je omogočilo hitro postavitev razvojnega okolja, enostavno upravljanje odvisnosti in ponovljivost testov. Vsak orakelj, strežnik Fuseki, in lokalna Ethereum veriga tečejo v ločenih vsebnikih. Docker je uporabljen izključno za potrebe testiranja med razvojem.

3.2 Arhitektura sistema

Arhitektura razvitega sistema temelji na večplastnem pristopu, ki ločuje podatkovni model, mehanizme izračuna in zapis rezultatov zaupanja. Takšna zasnova omogoča jasne meje med posameznimi odgovornostmi, kar olajša razvoj, testiranje in morebitno razširjanje sistema na druge domene. V okviru magistrske naloge smo zasnovali arhitekturo, ki je dovolj splošna, da jo je mogoče uporabiti v različnih razpršenih okoljih, od farmacevtskih dobavnih verig do pametnih mest.

Osnovna ideja arhitekture je bila, da združimo tri ključne tehnologije: semantični splet, pametne oraklje in verigo blokov. Semantični splet omogoča opis akterjev in njihovih lastnosti v ontološkem grafu. Oraklji predstavljajo računsko plast, kjer posamezni akter izvede oceno zaupanja po svojih pravilih. Veriga blokov pa služi kot zanesljiva in nespremenljiva plast, kjer se hranijo rezultati teh ocen.

Sistem se razlikuje od ostalih rešitev, ki se osredotočajo zgolj na sledljivost ali upravljanje podatkov. Omogoča, da vsak akter izrecno definira svoje kriterije zaupanja in jih izvede nad skupnim modelom znanja. Rezultati teh

izračunov se zapišejo v decentraliziran register, ki je enak za vse udeležence.

V nadaljevanju poglavja predstavimo zasnovo arhitekture in posamezne plasti, prikažemo njihov medsebojni tok podatkov ter utemeljimo vlogo uporabljenih tehnologij. Tak pristop daje sistemu modularnost, zamenljivost izračunskih enot in razširljivost na druge aplikacijske domene.

3.2.1 Pregled večplastne zasnove

Arhitektura sistema temelji na treh jasno ločenih plasteh, ki skupaj tvorijo celoten potek od zajema podatkov do zapisa rezultatov zaupanja na verigo blokov. Takšna razdelitev omogoča boljše razumevanje posameznih vlog in enostavnejše nadgrajevanje sistema, saj lahko vsako plast obravnavamo neodvisno od drugih.

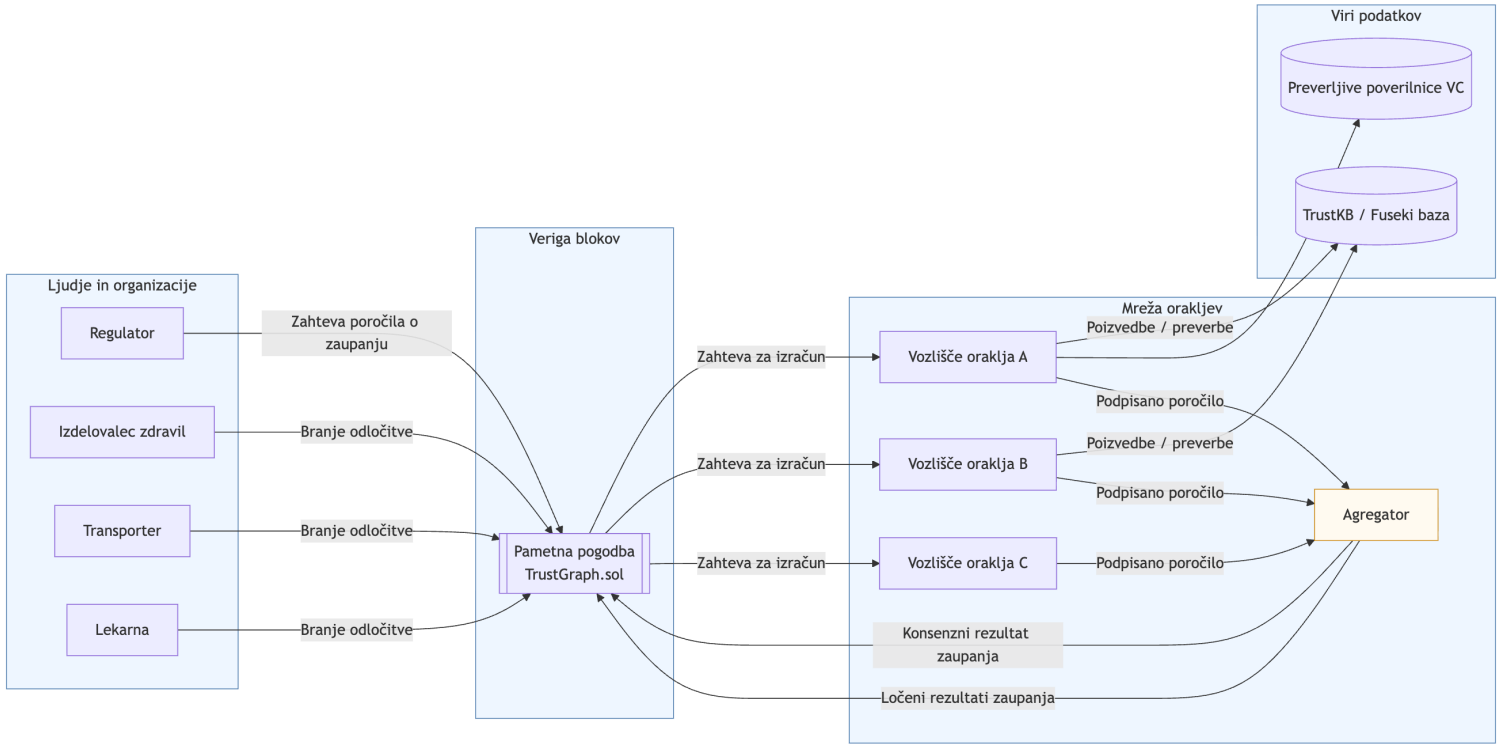
Na sliki 3.1 je prikazan kontekstni pogled celotnega sistema. Diagram združuje tri glavne sklope: akterje iz dobavne verige na levi, infrastrukturo orakljev in podatkovnih virov na desni ter verigo blokov v sredini. Akterji, kot so regulator, proizvajalec zdravil, prevoznik in lekarna, komunicirajo izključno s pametno pogodbo `TrustGraph.sol`. Ta beleži rezultate zaupanja in upravlja zahteve za ponovno oceno posameznih entitet.

Ko regulator ali drug akter sproži zahtevo za izračun zaupanja, pametna pogodba pošlje zahtevo omrežju orakljev. Vsak orakelj nato izvede svoj del naloge: iz ontologije in baze TrustKB pridobi podatke, po potrebi preveri pripadajoča preverljiva dokazila, nato pa izračuna rezultat zaupanja. Oraklji rezultate podpišejo in posredujejo agregatorju, ki pripravi končni konsenzni izračun in ga zapiše nazaj v pametno pogodbo.

V skrajnem desnem delu diagrama je prikazana plast znanja. Ta vključuje ontologijo (TrustKB), kjer so zbrani koncepti, njihove lastnosti in meritve, ter skladišče dokazil VC, ki zajema licence, certifikate in druge verodostojne podatke o akterjih. Oraklji pri izračunu združujejo oba vira: semantične lastnosti iz ontologije in verodostojne podatke iz dokazil.

Sistem tako deluje skozi jasno razmejene sklope, kar je razvidno iz celotnega toka na diagramu – od zahteve, preko izračuna, do zapisa končnega

rezultata zaupanja na verigi blokov.



Slika 3.1: Kontekstni pogled sistema za upravljanje zaupanja.

V nadaljevanju so podrobneje opisane tri plasti, ki sestavljajo arhitekturo:

1. **Plast znanja (Knowledge Layer)** V tej plasti se nahaja ontologija dobavne verige in opisne lastnosti akterjev. Ontologija predstavlja skupni referenčni model, ki omogoča enotno interpretacijo podatkov o akterjih. Poleg ontologije se tukaj nahaja tudi skladišče preverljivih dokazil (VC), ki dodaja podatke o licencah, certifikatih in presojah kakovosti.

2. **Plast izračuna zaupanja (Trust Resolution Layer)** Oraklji v tej plasti izvajajo izračune zaupanja. Podatke pridobijo iz ontologije in preverljivih dokazil ter jih povežejo s pravili, ki jih določi posamezen akter. Pravila so zapisana v JSON obliki in opisujejo pogoje, ki jih mora ocenjovana entiteta izpolnjevati. Oraklji izvedejo izračun, rezultat podpišejo in ga posredujejo agregatorju.

3. **Plast registra zaupanja na verigi blokov (Blockchain Trust Registry Layer)** Ta plast vključuje pametno pogodbo, ki hrani rezultate ocenjevanja zaupanja. Pogodba deluje kot decentraliziran register, ki omogoča vpogled v trenutna in pretekla razmerja zaupanja med akterji. Vanjo se vpisujejo tako posamezni odgovori orakljev kot konsenzni rezultat evalvacije.

V naslednjih poglavjih so opisane tehnične podrobnosti posamezne plasti ter njihove medsebojne povezave.

Plast znanja

Plast znanja predstavlja osnovni vir informacij, na katerem poteka izračun zaupanja. Vsebuje semantični model dobavne verige zdravil, podatke o posameznih akterjih ter dodatna preverljiva dokazila, ki opisujejo regulatorne lastnosti ali skladnost z zahtevami. V tej plasti se združujejo podatki iz dveh virov: ontologije, ki opisuje akterje in njihove lastnosti, ter preverljivih

dokazil (VC), ki dopolnjujejo semantični model z digitalno podpisanimi trditvami. Oraklji te podatke uporabljajo pri izračunu zaupanja v nadaljnjih plasteh sistema.

Ontologija (OWL/RDF) Ontologija farmacevtske dobavne verige je zgrajena v jeziku OWL in zapisana v formatu RDF. Vsebuje razrede, ki predstavljajo posamezne tipe akterjev, kot so *Proizvajalec*, *Prevoznik*, *Lekarna* in *Regulator*. Tem razredom so pripisane lastnosti, ki opisujejo njihovo vedenje ali skladnost s standardi, na primer:

- `hasDeliveryPunctuality` – delež pravočasnih dostav,
- `hasTempViolationRate` – delež temperaturnih odstopanj pri transportu,
- `hasLicense` – veljavnost poslovne licence,
- `hasGMP` – skladnost s standardi GMP [35],
- `hasAuditScore` – rezultat presoje kakovosti.

Ontologija vsebuje tudi posamezne primerke akterjev, na primer *Pfizer*, *DHL* in *MediPlus*, ki imajo pripisane konkretne vrednosti lastnosti. Spodaj je prikazan primer zapisa prevoznika v RDF/Turtle obliki:

```
ex:DHL a ex:Transporter ;
  ex:hasDeliveryPunctuality "0.94"^^xsd:decimal ;
  ex:hasTempViolationRate "0.02"^^xsd:decimal ;
  ex:hasLicense "true"^^xsd:boolean .
```

Ontologija je shranjena v strežniku Apache Jena Fuseki, ki omogoča izvajanje SPARQL 1.1 poizvedb preko spletnega vmesnika. Oraklji tako dostopajo do podatkov z neposrednimi poizvedbami, kot je na primer:

```
PREFIX ex: <http://example.org/trust#>

SELECT ?punctuality ?tempRate ?license
```

```
WHERE {
  ex:DHL ex:hasDeliveryPunctuality ?punctuality .
  ex:DHL ex:hasTempViolationRate ?tempRate .
  ex:DHL ex:hasLicense ?license .
}
```

Ker je ontologija zgrajena v OWL, omogoča tudi uporabo razumevalnika (angl. reasoner). Razumevalnik lahko samodejno razvrsti akterje v razrede (npr. `TrustedTransporter`), zazna nedoslednosti in izpelje lastnosti, ki niso zapisane neposredno. Vsak orakelj lahko razumevalnik po potrebi zažene lokalno in s tem pridobi izpeljane podatke.

Preverljiva dokazila (VC) Poleg podatkov iz ontologije sistem uporablja še preverljiva dokazila (VC), ki jih izdajajo regulatorji ali druge zaupanja vredne organizacije. Ta dokazila vsebujejo trditve o akterjih, kot so veljavnost licence, GMP skladnost ali datum zadnje presoje kakovosti. Dokazila so zapisana v formatu JSON-LD in digitalno podpisana.

Primer dokazila, ki ga izda regulator:

```
{
  "id": "vc-gmp-pfizer-001",
  "type": ["VerifiableCredential", "GMPCertificate"],
  "issuer": "did:example:ema",
  "credentialSubject": {
    "id": "did:example:pfizer",
    "hasGMP": true
  },
  "proof": {
    "type": "Ed25519Signature2018",
    "signatureValue": "3f9ac..."
  }
}
```

Preverljiva dokazila so shranjena v ločeni podatkovni bazi. Ob izračunu zaupanja orakelj preveri kriptografski podpis izdajatelja, iz podatkov izlušči relevantne lastnosti in jih združi z informacijami iz ontologije. Tako sestavi popoln nabor kriterijev, ki jih akter uporabi pri ocenjevanju zaupanja.

Plast znanja združuje semantične opise akterjev in njihove lastnosti z regulatorno potrjenimi podatki iz preverljivih dokazil. Oraklji pri izračunu zaupanja dostopajo do obeh virov: iz Fusekija pridobijo opisne metrike, iz VC-jev pa dodatne podatke, ki jih ontologija ne vsebuje. S tem plast znanja omogoča enoten, strukturen in preverljiv nabor podatkov, na katerem temelji celoten izračun zaupanja.

Plast izračuna zaupanja

Plast izračuna zaupanja predstavlja osrednjo procesno komponento arhitekture. Njena naloga je, da podatke iz plasti znanja pretvori v konkretne odločitve o zaupanju in jih posreduje verigi blokov. V tej plasti se nahaja omrežje orakljev in agregator, ki skupaj tvorita neodvisen mehanizem sklepanja. Oraklji izvajajo izračune, agregator pa skrbi za preverjanje rezultatov in zapis končnega stanja v pametno pogodbo.

Oraklji Ko sistem prejme zahtevo za izračun zaupanja, pametna pogodba sproži dogodek, ki služi kot signal orakljem, da morajo izvesti novo oceno. Oraklji ne delujejo kot pasivni odjemalci, temveč aktivno spremljajo verigo blokov in zaznavajo zahteve, ki jih je treba obdelati. Za podani subjekt nato pridobijo vse podatke iz plasti znanja: opisne lastnosti iz ontologije ter pripadajoča preverljiva dokazila iz baze poverilnic VC. Na ta način je izračun zaupanja vedno vezan na najnovejše in preverljive podatke.

Pridobljene podatke orakelj združi s pravili ocenjevalca. Pravila določajo, katere lastnosti mora ocenjevan akter izpolnjevati in pod kakšnimi pogoji. Orakelj izvede ocenjevanje in pripravi strukturirano poročilo, ki vsebuje identifikator subjekta, končno odločitev, numerično oceno, kriptografske povzetke uporabljenih dokazil ter čas izračuna. Poročilo je serializirano v JSON obliki

in digitalno podpisano z zasebnim ključem oraklja. S tem postane rezultat preverljiv in vezan na točno določen orakelj.

Agregator Podpisano poročilo orakelj pošlje agregatorju, ki deluje kot zbirni člen med oraklji in pametno pogodbo. Agregator preveri digitalni podpis, preveri, ali je poročilo prišlo od dovoljenega oraklja, ter ga zapiše na verigo kot posamično oddajo. Ko prejme zadostno število poročil, izvede konsenz nad prejetimi odločitvami in oceno zaupanja ter prek transakcije posreduje končni rezultat v pametno pogodbo `TrustGraph`.

Na visoki ravni potek izračuna poteka v naslednjih korakih:

1. pametna pogodba na verigi blokov prejme zahtevo za nov izračun zaupanja in sproži dogodek,
2. oraklji poslušajo te dogodke, za podanega akterja preberejo podatke iz ontologije in pripadajočih preverljivih dokazil,
3. podatke združijo s pravili ocenjevalca in izvedejo izračun zaupanja,
4. rezultat pretvorijo v strukturirano poročilo, ga digitalno podpišejo in pošljejo agregatorju,
5. agregator preveri prejeta poročila, izračuna konsenz in prek transakcij zapiše posamezne oddaje ter končni rezultat v pametno pogodbo.

Na ta način plast izračuna zaupanja povezuje semantične podatke z decentraliziranim zapisom rezultatov. Oraklji omogočajo neodvisno izvajanje izračunov, agregator pa poskrbi za preverjanje in enoten zapis v register zaupanja na verigi blokov. Plast tako tvorimo most med modelom znanja in verigo blokov ter predstavlja ključen element celotne arhitekture.

Plast registra zaupanja na verigi blokov

Plast registra zaupanja predstavlja končni sloj arhitekture, kjer se rezultati izračuna zaupanja trajno zapišejo. Njena vloga je zagotoviti podatkovno

plast, ki ni odvisna od posamezne organizacije in ki omogoča preverljiv, dosleden ter nespremenljiv zapis vseh odločitev o zaupanju. V tej plasti se nahaja pametna pogodba `TrustGraph`, ki deluje kot decentraliziran register razmerij zaupanja med akterji.

Pametna pogodba je zasnovana tako, da sprejema rezultate evalvacij orakljev in jih zapisuje v podatkovne strukture na verigi. Podpisi orakljev, konsenz agregatorja in mehanizmi preverjanja identitet poskrbijo, da v register pridejo le preverjene in verodostojne informacije. Vsak zapis je povezan z identifikatorjem akterja, časom vnosa in dodatnimi metapodatki, kar omogoča transparenten zgodovinski vpogled v spremembe zaupanja skozi čas.

Ko agregator prejme dovolj veljavnih poročil orakljev, izvede postopek združevanja in prek transakcije pokliče funkcijo v pametni pogodbi, ki zapiše tako posamične oddaje kot končni konsenzni rezultat. Pogodba sproži dogodke, ki služijo kot signal akterjem ali nadrejenim sistemom, da je za določen subjekt na voljo nova ocena zaupanja. Vsaka sprememba je trajno zapisana v verigo blokov, zato je mogoče rezultate neodvisno preveriti tudi za nazaj.

Register zaupanja hrani dve vrsti podatkov. Prva vrsta so posamične oddaje orakljev, ki predstavljajo neobdelane rezultate izračuna. Druga vrsta so konsenzni rezultati, ki jih agregator izračuna na podlagi več oddaj in jih pogodba obravnava kot veljavno končno stanje zaupanja za posameznega akterja. Na ta način lahko sistem ohranja celovito sliko o tem, kako so se rezultati spreminjali in kako je bila sprejeta končna odločitev.

Zapis v register omogoča tudi poizvedovanje nad trenutnim ali zgodovinskim stanjem zaupanja. Akterji v dobavni verigi lahko kadar koli preverijo, ali je določen partner trenutno ocenjen kot zaupanja vreden ali ne. Ker podatki niso shranjeni v centraliziranem sistemu, temveč v porazdeljeni verigi blokov, se vnosov ne da naknadno spreminjati ali brisati. To daje sistemu lastnost dolgoročne preverljivosti, kar je ključno v okoljih, kjer se sprejemajo odločitve z regulatornimi posledicami.

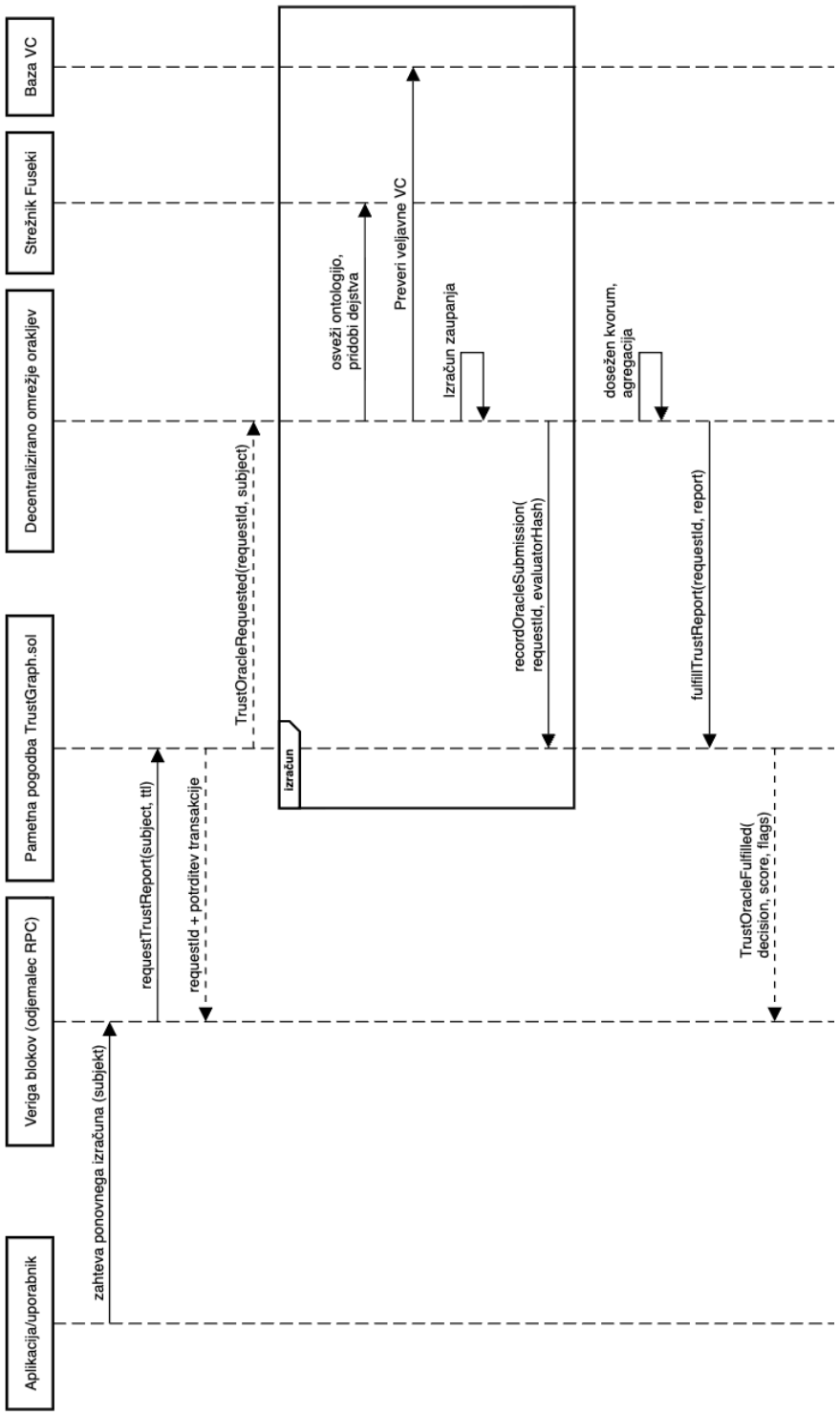
Plast registra zaupanja tako predstavlja stičišče celotnega sistema: prejme rezultate iz računske plasti, jih trajno zapiše in omogoča zanesljiv vpogled v

relacije zaupanja v vsakem trenutku. V nadaljevanju bomo opisali funkcije pametne pogodbe `TrustGraph`, podatkovne strukture, dogodke ter način, kako zunanji akterji dostopajo do registra.

3.3 Tok podatkov v sistemu

3.3.1 Celoten potek izračuna zaupanja

Na sliki 3.2 je prikazan celoten proces izračuna zaupanja, ki vključuje vse komponente sistema: aplikacijo, pametno pogodbo `TrustGraph.sol`, decentralizirano omrežje orakljev, strežnik Fuseki ter bazo preverljivih dokazil VC. V nadaljevanju se osredotočimo na funkcije uporabljene v procesu. Pri vsakem koraku so navedene ključne funkcije.



Slika 3.2: Diagram poteka ob izračunu zaupanja za subjekt.

1. **Aplikacija ali uporabnik ustvari zahtevo**
   Uporabnik preko aplikacije ali klica API sproži postopek za izračun zaupanja za želenega akterja. Akterjev DID pred klicem funkcije pretvorimo v binarno vrednost `bytes32` s pomočjo zgoščevalne funkcije Keccak-256, ki je značilna za Ethereumov ekosistem. Aplikacija preko odjemalca RPC pokliče funkcijo na pametni pogodbi:

   ```
   requestTrustReport(subject, ttl)
   ```

2. **Pametna pogodba obdela zahtevo in izda signal za izračun**
   Po klicu funkcije `requestTrustReport(subject, ttl)` pametna pogodba preveri, ali je za izbranega akterja že aktivna zahteva ter ali ima klicatelj ustrezna dovoljenja (če je seznam dovoljenih nastavljen). Ko so pogoji izpolnjeni, pogodba ustvari nov identifikator zahteve `requestId`. Identifikator temelji na zgoščeni kombinaciji DID akterja, časovnega žiga, naslova pošiljatelja in zaporedne številke zahteve. Pogodba shrani rok za oddajo (`deadline`) in nato sproži dogodek:

   ```
   TrustOracleRequested(requestId, subject)
   ```

   Ta dogodek služi kot edini mehanizem obveščanja decentraliziranega omrežja orakljev, da je treba izvesti nov izračun zaupanja. Obenem funkcija klicatelju tudi vrne `requestId`, na podlagi katerega lahko spremlja stanje in kasneje pridobi končni rezultat.

3. **Orakelj zazna novo zahtevo in začne proces izračuna**
   Vsak orakelj neprestano posluša za nove dogodke, zapisane v verigi blokov (angl. *event logs*). Ko zazna dogodek `TrustOracleRequested`, preveri, ali mora obdelati podani `requestId`. Če je orakelj nastavljen za tovrstne izračune, začne postopek ocenjevanja. Najprej pridobi vse potrebne podatke iz plasti znanja: semantične lastnosti akterja preko SPARQL poizvedb strežniku Fuseki ter pripadajoča preverljiva dokazila iz baze VC. Orakelj tako zagotovi, da bo izračun temeljil na najnovejših, verodostojnih in digitalno podpisanih podatkih. Šele ko so vsi

podatki zbrani in preverjeni, orakelj preide na sam izračun zaupanja, kjer uporabi pravila ocenjevalca.

4. **Orakelj osveži podatke v plasti znanja**
   Pred izračunom zaupanja mora orakelj pridobiti najnovejše podatke iz dveh ločenih virov:

   - semantične lastnosti akterja iz ontologije prek SPARQL poizvedb strežniku Fuseki,
   - veljavna preverljiva dokazila (VC), ki jih orakelj prebere iz lokalne baze dokazil.

   Pridobivanje ontoloških podatkov poteka prek SPARQL končne točke, ki vrne lastnosti subjekta (npr. točnost dostav, licenčne statuse, GMP skladnost). Preverljiva dokazila se preverijo z validacijo digitalnega podpisa izdaje. S tem orakelj zagotovi, da izračun temelji na najnovejših in verodostojnih podatkih.

5. **Izvedba izračuna glede na pravila ocenjevalca**
   Ko ima orakelj na voljo vse relevantne podatke, izvede izračun zaupanja. Pri tem uporabi pravila, ki si jih bomo v nadaljevanju pogledali na testnih scenarijih. Rezultat tega koraka je numerična ocena in binarna odločitev, ali akter izpolnjuje zahtevane pogoje. Poleg tega orakelj pripravi tudi metapodatke, kot so:

   - čas izračuna (`asOf`),
   - zgoščena vrednost pravil (`policyHash`),
   - zgoščena vrednost uporabljenega VC (`credentialHash`).

6. **Orakelj ustvari poročilo in ga podpiše**
   Orakelj pripravi končno poročilo v JSON obliki, ki vsebuje ključne informacije o izračunu zaupanja: identifikator subjekta, odločitev, oceno, zastavice in pripadajoče povzetke. Preden ga pošlje agregatorju, mora orakelj poročilo kriptografsko podpisati. Podpis se izvede z uporabo

metode `sign_message`, ki je del knjižnice web3.py. Ta temelji na Ethereumovi shemi EIP-191. Najprej se pripravi deterministična kanonična oblika JSON zapisa, ta pa se nato podpiše z zasebnim ključem oraklja. Podpis omogoča agregatorju, da preveri, ali je poročilo prišlo od zaupanja vrednega oraklja.

7. **Agregator sprejme poročila in izvede preverjanje**
   Agregator deluje kot zbirno vozlišče, ki prejema poročila posameznih orakljev prek HTTP vmesnika. Pred prejemom poročila izvede naslednja preverjanja:

   - ali podpis pripada dovoljenemu oraklju,
   - ali poročilo ni podvojeno,
   - ali se zgoščene vrednosti pravil in dokazil ujemajo z lokalnimi podatki.

   Vsako veljavno poročilo agregator takoj zapiše v pametno pogodbo z uporabo funkcije:

   ```
   recordOracleSubmission(requestId, evaluatorHash, report,
   credentialHash)
   ```

   Na ta način je posamezna ocena oraklja shranjena na verigi blokov, neodvisno od končnega konsenza.

8. **Agregator izvede konsenz in zapiše končni rezultat**
   Ko agregator prejme dovolj veljavnih poročil (dosežen kvorum), izvede konsenz nad rezultati. Pri tem kombinira odločitev, oceno in dodatne zastavice, nato pa pripravi končno poročilo. Končni rezultat se zapiše v pametno pogodbo z uporabo funkcije:

   ```
   fulfillTrustReport(requestId, report)
   ```

   Pametna pogodba preveri, ali je agregator pooblaščen, ali je `requestId` veljaven in ali zahteva ni pretekla. Če so vsi pogoji izpolnjeni, pogodba zapiše konsenzni rezultat v verigo blokov in sproži dogodek

`TrustOracleFulfilled`. Pogodba preveri identiteto klica, ujemanje ID in iztek roka, preden zapiše končni rezultat v:

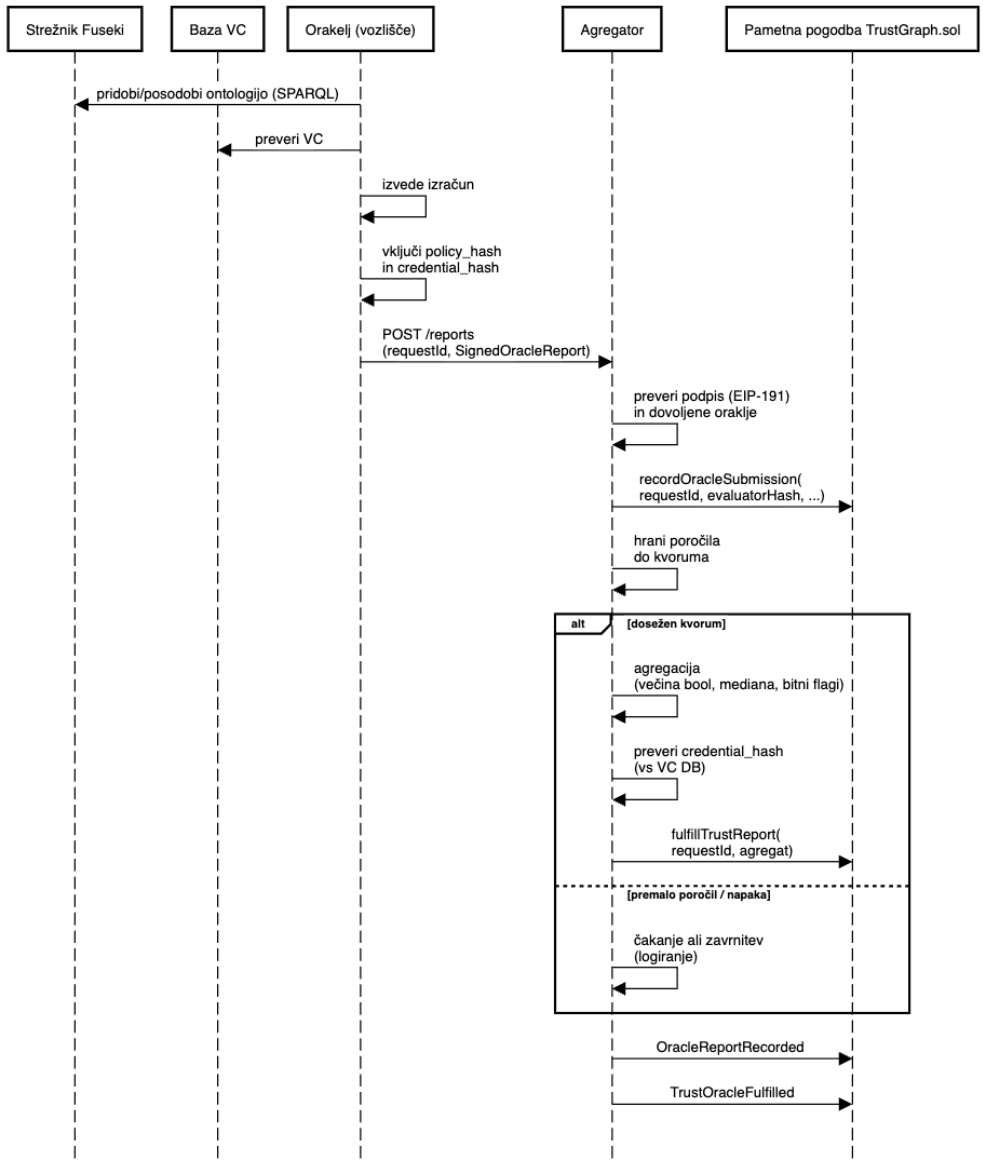
```
subjectMetrics[subject]
```

in sprožen je dogodek `TrustOracleFulfilled`, ki zaključi postopek.

Ker je celoten postopek sestavljen iz več medsebojno odvisnih korakov, se v naslednjih podpoglavjih osredotočimo na bolj podroben pregled posameznih delov. Najprej pogledamo notranje delovanje omrežja orakljev in agregacije rezultatov, nato pa še na branje podatkov iz registra zaupanja.

3.3.2 Agregiranje rezultatov v omrežju orakljev

Na sliki 3.3 je prikazan podroben potek obdelave poročil znotraj decentraliziranega omrežja orakljev (DON). Diagram prikazuje fazo po tem, ko oraklji prejmejo zahtevo za izračun zaupanja, in se osredotoča na izvajanje izračuna, podpisovanje poročil ter postopek agregacije v agregatorju. Ta proces je ključen za zagotavljanje verodostojnih rezultatov, saj združi poročila več neodvisnih orakljev v en sam, konsenzni izračun.



Slika 3.3: Potek agregiranja rezultatov v decentraliziranem omrežju orakljev

V nadaljevanju so opisani vsi ključni koraki, prikazani v diagramu.

1. **Zajem podatkov iz plasti znanja**
   Orakelj pred izvedbo izračuna pridobi aktualne podatke iz dveh virov:

   - ontološki podatki prek strežnika Fuseki (SPARQL poizvedbe ali lokalni OWL),

- preverljiva dokazila (VC), ki jih orakelj preveri glede veljavnosti in morebitnega preklica.

Ti podatki predstavljajo vhodne metrike, ki se uporabijo pri izračunu zaupanja.

2. **Izvedba lokalnega izračuna zaupanja**
   Orakelj izvede hibridni algoritem ocenjevanja, ki združuje preverjanje pravil ter statistične metrike. V tej fazi orakelj pripravi tudi oba ključna povzetka:

   - `policy_hash`, ki predstavlja zgoščeno vrednost pravil akterja,
   - `credential_hash`, ki označuje VC dokazilo uporabljeno pri izračunu.

3. **Pošiljanje podpisanega poročila agregatorju**
   Orakelj oblikuje strukturirano poročilo, ga serializira v kanonični JSON zapis in digitalno podpiše z metodo `sign_message` (EIP-191). Podpisano poročilo nato pošlje agregatorju prek zahteve HTTP (`POST /reports`), skupaj z identifikatorjem zahteve. Da agregator poročilo sprejme, mora orakelj poslati podatke v standardizirani obliki `SignedOracleReport`. Ta vsebuje dva dela:

   - `OracleReport` – dejanski rezultat izračuna,
   - `node_id` in `signature` – identiteto oraklja in kriptografski podpis poročila.

   Struktura `OracleReport` mora vsebovati naslednja polja:

   - `subject` – 32-bajtni identifikator subjekta (zgoščena vrednost DID),
   - `decision` – končna odločitev (bool),
   - `score` – številčna ocena zaupanja v odstotkih,
   - `flags` – bitna opozorilna polja,
   - `as_of` – čas izračuna.

Pred podpisom se poročilo pretvori v kanonično JSON obliko s stabilnim urejanjem ključev. Podpis se izvede z metodo `sign_message` (EIP-191) iz knjižnice `web3.py`. Agregator poročilo sprejme le, če je podpis veljaven, naslov `node_id` pripada dovoljenemu oraklju, poročilo ni podvojeno in `policy_hash` ter `credential_hash` se ujemata z lokalnimi podatki agregatorja. Standardizirana struktura omogoča, da lahko vsako poročilo neodvisno preverimo in da se rezultati več orakljev združijo v konsenzni izračun, ki se zapiše v pametno pogodbo.

4. **Preverjanje podpisov in veljavnosti poročil**
   Agregator ob prejemu poročila preveri:

   - ali podpis pripada dovoljenemu oraklju,
   - ali je poročilo unikatno glede na kombinacijo `request_id` in `node_id`,
   - ali se zgoščene vrednosti pravil in dokazil ujemajo z njegovimi lokalnimi podatki.

   Veljavna poročila agregator takoj zapiše v pametno pogodbo s funkcijo `recordOracleSubmission`.

5. **Doseganje kvoruma poročil**
   Agregator hrani prejeta poročila in spremlja, ali je dosežen kvorum (minimalno število poročil, potrebnih za izvedbo konsenza). Če kvorum ni dosežen, agregator čaka in nadaljuje zbiranje poročil dokler le ta ni dosežen ali do izteka časa čakanja (`ttl`).

6. **Agregacija rezultatov znotraj DON**
   Ko je kvorum dosežen, agregator izvede agregacijo. Poleg odločitve in ocene agregator združi tudi `flags`, ki predstavljajo bitna opozorilna polja. Vsak bit ima posebej določen pomen, ki označuje posebne okoliščine ali tveganja, ki so se pojavila med izračunom:

   - FLAG_NO_DATA (bit 0) – orakelj ni našel nobenih vhodnih podatkov za subjekt (npr. subjekt v ontologiji ne obstaja ali nima

nobenih lastnosti).

- FLAG_LOW_SCORE (bit 1) – verjetnostna ocena zaupanja je padla pod minimalni prag.
- FLAG_DISAGREEMENT (bit 2) – različni deli orakljevega notranjega izračuna so podali neskladne odločitve.
- FLAG_VC_REVOKED (bit 3) – preverljivo dokazilo (VC), uporabljeno pri izračunu, je označeno kot preklicano.

Ti biti se lahko nastavijo v orakljih funkcijah za izračun. Agregator pri združevanju uporabi *bitno večino*: vsak bit v končnem rezultatu je nastavljen, če ga ima vsaj polovica oddanih poročil. Zastavice tako predstavljajo povzetek opozoril, ki jih je zaznalo celotno omrežje orakljev.

7. **Zapis konsenznega rezultata v pametno pogodbo**
   Končni agregirani rezultat se v verigo blokov zapiše s funkcijo:

   ```
   fulfillTrustReport(requestId, report)
   ```

   Pametna pogodba preveri identiteto klicatelja, veljavnost identifikatorja zahteve in rok izvedbe. Ob uspešnem zapisu sproži dogodek `TrustOracleFulfilled`, ki drugim komponentam signalizira, da je nova ocena na voljo.

Agregator povezuje izračune več orakljev v enoten rezultat, pametna pogodba pa poskrbi, da je končni izračun trajno in preverljivo zapisan v verigi blokov. V naslednjem podpoglavju si bomo ogledali, kako akterji v sistemu pridobijo te rezultate in kako poteka branje podatkov iz registra zaupanja.

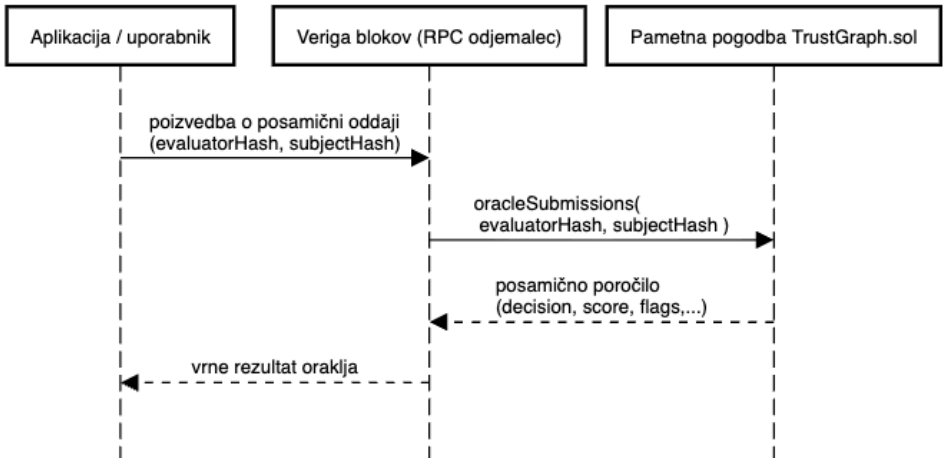
3.3.3 Branje rezultatov zaupanja

Po zaključenem izračunu in zapisu rezultatov v pametno pogodbo lahko akterji iz sistema pridobijo podatke o zaupanju na dva načina: (i) kot posame-

zne oddaje orakljev in (ii) kot agregiran, konsenzni rezultat omrežja orakljev (DON).

Branje posamičnih izračunov orakljev

Pametna pogodba `TrustGraph.sol` hrani posamične rezultate vsakega oraklja v podatkovni strukturi `oracleSubmissions[evaluator][subject]`. Ti podatki predstavljajo neagregirane rezultate, ki jih je posamezen orakelj izračunal za dani subjekt. Slika 3.4 prikazuje potek branja posamičnih oddaj.



Slika 3.4: Branje posamične oddaje oraklja iz registra zaupanja

Branje posamičnih oddaj je koristno za različne namene. Če je potrebno preveriti, kako je določen orakelj ocenil subjekt, ali pa analizirati morebitna neskladja med oraklji, lahko akterji neposredno dostopajo do teh podatkov. Do teh podatkov dostopamo z direktnim klicem funkcije za branje iz javnega slovarja:

```
oracleSubmissions(evaluatorHash, subject)
```

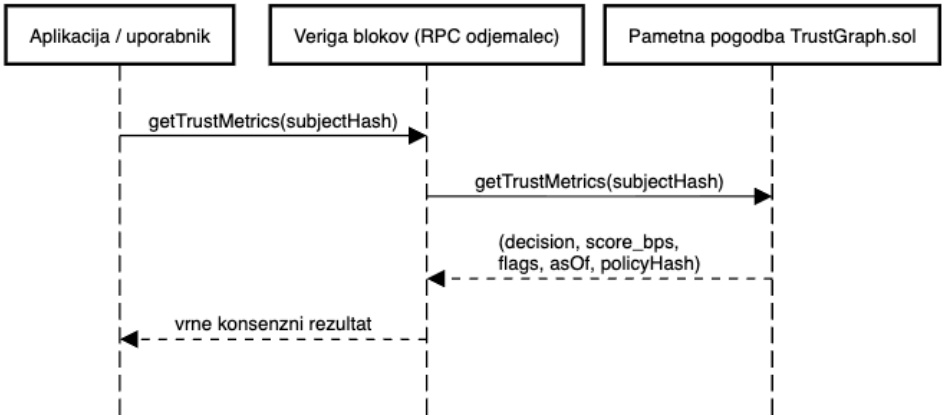
Rezultat vključuje:

- binarno odločitev,
- numerično oceno,

- zastavice (flags),
- čas izračuna,
- zgoščene vrednosti pravil in dokazil,
- ETH naslov oraklja.

Branje agregiranega (konsenznega) rezultata

Konsenzni rezultat, ki ga zapiše agregator, predstavlja končno in uradno odločitev omrežja orakljev.



Slika 3.5: Branje konsenznega rezultata ocenjevanja iz pametne pogodbe

Ta rezultat je v pametni pogodbi zapisan v strukturi:

```
subjectMetrics[subject]
```

Kot vidimo na 3.5, lahko do rezultatov dostopamo prek javne funkcije:

```
getTrustMetrics(subject)
```

Ta funkcija vrne:

- **odločitev** (`decision`) – končni izračun zaupanja,
- **oceno** (`score_bps`) – numerična vrednost v osnovnih točkah,

- **zastavice** (`flags`) – bitna opozorila, ki so bila prisotna v večini oddaj,
- **čas** (`asOf`) – čas izračuna konsenza.

Konsenzni rezultat je tisti, ki ga uporabi večina akterjev v sistemu, saj predstavlja stabilen in preverjen izračun celotnega omrežja orakljev.

Poglavje 4

Evalvacija

4.1 Predstavitev scenarijev delovanja

4.1.1 Eksperimentalno okolje in konfiguracija sistema

Preden predstavimo konkretne scenarije uporabe, najprej opišemo, kako je postavljen eksperimentalni sistem. Vse komponente zaganjamo z orodjem `Docker`, kar nam zagotavlja ponovljivo okolje in jasno ločitev med posameznimi storitvami. S tem zmanjšamo odvisnost od lokalne konfiguracije in omogočimo, da sistem testiramo kakor, da bi bile vse komponente že nameščene v oblaku.

Vsebniki in omrežje

Sistem sestavlja več vsebnikov Docker, ki so povezani v skupno virtualno omrežje in delujejo z orodjem `Docker Compose`. V sekciji 4.1.2 so opisani posamezni vsebniki in načini ocenjevanja zaupanja za vsak orakelj.

Veriga blokov Prvi vsebnik vsebuje testno Ethereum omrežje s pomočjo orodja Anvil. Na njem namestimo pametno pogodbo `TrustGraph.sol`. Na omrežju takoj dobimo tudi 10 prednastavljenih računov z velikimi količinami testnih ETH kovancev, ki jih oraklji in agregator uporabljajo za plačevanje

transakcijskih stroškov. Zato prve račune dodelimo agregatorju in orakljem. Potrebujemo tudi en račun za namestitev pametne pogodbe dodelimo le tega regulatorju EMA, kateri bo imel potem tudi pravico do sprožanja novih izračunov zaupanja.

Baza znanja V vsebniku Fuseki je naložena domenska ontologija. Ta je dostopna preko SPARQL končne točke, ki jo oraklji uporabljajo za pridobivanje semantičnih lastnosti akterjev. V eksperimentalnem okolju uporabljamo ontologijo, ki ga vsi oraklji delijo. Celotna ontologija, uporabljena za scenarije, je na voljo v prilogi A.

Oraklji Za evalvacijo smo pripravili tri neodvisne oraklje, ki izvajajo svoje politike izračuna zaupanja. Vsak orakelj teče v svojem vsebniku Docker in je konfiguriran z ločeno datoteko, ki določa pravila ocenjevalca, nabor vhodnih podatkov ter težo posameznih kriterijev. Oraklji so implementirani v Pythonu in uporabljajo knjižnice za dostop do verige blokov (web3.py), baze znanja (rdflib, SPARQLWrapper) ter za kriptografske operacije. V sekciji 4.1.2 so podrobneje predstavljeni algoritmi izračuna zaupanja za vsak orakelj.

Agregator Zbiranje poročil posameznih orakljev teče v vsebniku agregatorja. Ta preverja njihove podpise in objavi končno odločitev v pametni pogodbi na verigi. Tudi agregator je implementiran v Pythonu in uporablja podobne knjižnice kot oraklji.

Odjemalska aplikacija , ki v našem primeru nastopa kot ukazna vrstica oziroma skripta, s katero sprožimo zahtevo za izračun zaupanja in kasneje preberemo rezultat z verige. V realnem primeru bi bil to lahko npr. spletni vmesnik ali integracija v obstoječi ERP sistem akterja.

Kontejnerji si delijo notranje Docker omrežje, zato med seboj komunicirajo preko domen DNS (`fuseki:3030`, `ethereum-node:8545`).

Agregator pri združevanju rezultatov ne pozna podrobnosti posameznih politik. Vsako poročilo obravnava kot podpisano izjavo oraklja, ki vsebuje identifikator subjekta, numerično oceno zaupanja, diskretno odločitev (npr. *zaupanja vreden* ali *nezaupanja vreden*) ter morebitne zastavice. Na osnovi konfiguriranega praga in števila prejetih poročil izračuna končno odločitev, ki jo zapiše v pametno pogodbo.

Telemetrijski podatki Poleg ontologije in preverljivih poverilnic sistem uporablja tudi agregirane telemetrijske metrike za izbrane transporterje. V eksperimentalnem okolju so te metrike zapisane v JSON datoteki v naslednji obliki:

```
{
  "http://example.org/trust#DHL": {
    "tempDeviation": 0.02,
    "lateDeliveries": 0.01,
    "alerts": 0
  },
  "http://example.org/trust#MedLogix": {
    "tempDeviation": 0.03,
    "lateDeliveries": 0.02,
    "alerts": 0
  },
  "http://example.org/trust#UPS": {
    "tempDeviation": 0.04,
    "lateDeliveries": 0.03,
    "alerts": 1
  },
  "http://example.org/trust#AcmeTransport": {
    "tempDeviation": 0.08,
    "lateDeliveries": 0.05,
    "alerts": 3
```

```
  }
}
```

V prototipu so vrednosti zapisane statično in služijo kot simulacija. V realnem okolju bi enak format predstavljal projekcijo podatkov iz zunanjih sistemov (npr. transportnega informacijskega sistema, IoT senzorjev povezanih na verigo, itn.), ki bi jih oraklji periodično brali prek API-jev ali sporočilnih vodil in na njihovi podlagi sproti posodabljali oceno zaupanja.

4.1.2 Algoritmi izračuna zaupanja v orakljih

V poglavju 2.2 smo predstavili različne pristope k upravljanju zaupanja v razpršenih sistemih: dokazne modele, priporočilne modele, porazdeljeno ocenjevanje ter dinamično posodabljanje zaupanja. Ti koncepti tvorijo teoretično podlago za zasnovo naših orakljev. V nadaljevanju pokažemo, kako vsak orakelj uporabi drugačen pogled na zaupanje.

- **Orakelj A** uporablja hibridni pristop, ki kombinira dokazne elemente (licence, certifikati) z dinamično metriko, podobno priporočilnim in porazdeljenim modelom.

- **Orakelj B** je izrazito *dokazni* – odloča skoraj izključno na podlagi preverljivih poverilnic, podobno kot hierarhični in PGP-sistemi iz podpoglavja o dokaznih modelih.

- **Orakelj C** je *telemetrijsko usmerjen* in se naslanja na dinamično posodabljanje zaupanja preko operativnih metrik, kar je skladno z modeli, ki večjo težo dajejo nedavnim interakcijam.

Čeprav so v prototipu algoritmi implementirani v isti kodni bazi, jih v nadaljevanju obravnavamo kot tri samostojne oraklje, od katerih ima vsak svoj lastni algoritem izračuna zaupanja.

Skupna struktura izračuna

Ne glede na specifičen pogled vsak orakelj za dani subjekt izračuna:

1. deterministični del (pravila iz politik),
2. verjetnostni del (številska verjetnostna ocena),
3. kombinirano odločitev.

Deterministični del Deterministični del temelji na politikah, ki so zapisane v konfiguracijskih datotekah (`policy.json`). V njih so za posamezne tipe subjektov (proizvajalec, distributer, transporter) definirani kriteriji in pragovi, na primer:

- `hasDeliveryPunctuality` $\geq 0{,}99$,
- `hasTempViolationRate` $\leq 0{,}05$,
- `hasAuditScore` $\geq 0{,}90$,
- `hasGDPVC` $=$ `true`.

Če subjekt za vse zahtevane kriterije zadošča pogojem, deterministični del vrne odločitev *PASS*, sicer *FAIL*. Ta del je najbližje *dokaznim modelom zaupanja*, kjer se odločitve sprejemajo na podlagi preverljivih dokazov in jasno določenih pragov.

Verjetnostni del Verjetnostni del iste kriterije pretvori v številsko verjetnostno oceno v intervalu $[0, 1]$, ki jo orakelj kasneje pretvori v osnovne točke (angl. *basis points*, 0–10000). Za vsak kriterij se vodi Beta posterior, ki se posodablja po principu eksponentno uteženega drsečega povprečja (EWMA). S tem se približamo obnašanju modelov iz podpoglavij o priporočilnih modelih in dinamičnem posodabljanju zaupanja.

Pri prvem branju ontologije se kriterij inicializira na osnovi trenutne vrednosti x in normalizirane zaželenosti $s_0 \in [0, 1]$ (višja vrednost pomeni bolj

zaželen izid). Parametra porazdelitve Beta sta:

$$\alpha = 1 + s_0 \cdot \mathit{obs\_scale}, \qquad \beta = 1 + (1 - s_0) \cdot \mathit{obs\_scale},$$

kjer je v implementaciji uporabljena lestvica $\mathit{obs\_scale} = 9$. Za »popolno« izpolnjen pogoj ($s_0 \approx 1$) dobimo pričakovano vrednost Beta porazdelitve $\mathbb{E}[X] \approx 0{,}91$, kar predstavlja visoko, a ne absolutno zaupanje.

Pri novih opazovanjih posterior posodobimo z uporabo EWMA faktorja $\gamma \approx 0{,}2$, tako da nove informacije hitreje vplivajo na verjetnostno oceno, starejše pa postopoma izgubljajo težo. To je konceptualno podobno formuli za dinamično posodabljanje zaupanja v podpoglavju o amortizacijskih faktorjih, kjer nove interakcije s časom prevladajo nad starimi.

Kombinirana odločitev Za posamezen subjekt se verjetnostna ocena izračuna kot uteženo povprečje srednjih vrednosti Beta posteriorjev aktivnih kriterijev. Uteži so zapisane v polju `_weights` v politiki in se normalizirajo tako, da zadošča:

$$\sum_i w_i = 1, \qquad w_i \geq 0.$$

Vsak orakelj uporablja svoj prag *verjetnostne ocene*, *prob_threshold*, ki ga izražamo na lestvici 0–1 (v implementaciji pa v osnovnih točkah). Kombinirana odločitev ima obliko:

$$\mathit{combined} = \mathit{deterministic}\ \text{OR}\ (\mathit{prob\_score} \geq \mathit{prob\_threshold}),$$

kjer je *deterministic* deterministična odločitev (*PASS*/*FAIL*), *prob_score* pa izračunana verjetnostna ocena. Na ta način se trda pragovna pravila (dokazni pogled) kombinirajo z mehko, številsko oceno, ki je bližje priporočilnim in porazdeljenim modelom zaupanja.

V nadaljevanju opišemo konkretne konfiguracije in primere za tri oraklje, ki utelešajo različne pristope iz poglavja 2.2.

Orakelj A (hibridni pogled)

Orakelj A uporablja hibridni pogled, ki združuje regulatorne kriterije, kakovost delovanja in informacije iz preverljivih poverilnic. S tem v praksi kombi-

nira dokazni model (digitalna dokazila, licence) z dinamičnim ocenjevanjem in uteženjem kriterijev preko Beta posteriorjev. Njegov prag za verjetnostno oceno je nastavljen na:

$$prob\_threshold^{(\mathrm{A})} = 0{,}75.$$

Kriteriji in uteži Za posamezne tipe subjektov uporablja naslednje kriterije in uteži:

- **Transporter:**
  - `hasDeliveryPunctuality` $\geq 0{,}99$ (utež 0,7),
  - `hasTempViolationRate` $\leq 0{,}05$ (utež 0,3).
- **Distributor:**
  - `hasLicense` = `true` (utež 0,4),
  - `hasGDPVC` = `true` (utež 0,5).
- **Manufacturer:**
  - `hasAuditScore` $\geq 0{,}90$ (utež 0,6).

Primer: MedLogix (distributer) Za distributerja MedLogix v trenutni ontologiji velja `license=true` in `GDPVC=true`. Deterministični del zato vrne *PASS*. Oba kriterija imata visoko zaželenost, zato se Beta posteriorja inicializirata s srednjo vrednostjo približno 0,91. Po normalizaciji uteži (približno 0,44 in 0,56) dobimo verjetnostno oceno:

$$prob\_score \approx 0{,}91 \geq 0{,}75.$$

Kombinirana odločitev je:

$$combined^{(\mathrm{A,MedLogix})} = PASS.$$

Primer: SkyFreight (transporter) Za transporterja SkyFreight sta zabeleženi vrednosti `punctuality` = 0,90 in `tempViolationRate` = 0,08. Deterministični pogoji niso izpolnjeni, ker 0,90 < 0,99 in 0,08 > 0,05, zato deterministični del vrne *FAIL*. Tudi normalizirana zaželenost s_0 za oba kriterija je nizka, kar vodi v nizko srednjo vrednost Beta posteriorja in verjetnostno oceno *prob_score* < 0,75. Končna odločitev oraklja je:

$$combined^{(\mathrm{A,SkyFreight})} = FAIL.$$

Orakelj B (dokazni, VC-centričen pogled)

Orakelj B je zasnovan tako, da v ospredje postavlja preverljive poverilnice. Konceptualno je najbližje dokaznim modelom zaupanja iz poglavja 2.2, kjer imata veriga potrdil in kriptografska dokazila ključno vlogo pri inicializaciji zaupanja. Njegov prag za verjetnostno oceno je strožji:

$$prob\_threshold^{(\mathrm{B})} = 0{,}8.$$

Kriteriji in uteži. Glavne kombinacije kriterijev so:

- **Distributor:**
  - `hasGDPVC` = `true` (utež 0,6),
  - `hasLicense` = `true` (utež 0,3),

  kar po normalizaciji daje približno 0,67 in 0,33.
- **Manufacturer:**
  - `hasAuditScore` $\geq$ 0,92 (utež 0,4).
- **Transporter:**
  - `hasRecallRate` $\leq$ 0,02 (utež 0,5).

Ključna značilnost je, da brez ustreznih preverljivih poverilnic odločitev nagiba k *FAIL*, tudi če so druge operativne metrike razmeroma dobre, kar odraža močan poudarek na formalnih dokazih in skladnosti.

Primer: MedLogix (distributer) Ker ima MedLogix veljavne poverilnice in licenco, deterministični del vrne *PASS*. Za oba kriterija dobimo srednjo vrednost Beta posteriorja približno 0,91, uteži so po normalizaciji 0,67 in 0,33, zato:

$$prob\_score \approx 0{,}91 \geq 0{,}8,$$

in kombinirana odločitev ostane:

$$combined^{(\mathrm{B,MedLogix})} = PASS.$$

Primer: HealthChain (transporter) Za transporterja HealthChain je v bazi znanja zabeležen `recallRate` = 0,015, kar deterministično zadošča pogoju `hasRecallRate` $\leq$ 0,02 in daje *PASS*. Pri verjetnostnem delu pa je zaželenost pri vrednosti blizu zgornje meje nizka (npr. $s_0 \approx 0{,}25$), kar vodi v srednjo vrednost Beta posteriorja približno 0,30 in:

$$prob\_score \approx 0{,}30 < 0{,}8.$$

Kombinirana odločitev je zato:

$$combined^{(\mathrm{B,HealthChain})} = FAIL,$$

kar ilustrira strožji, dokazni pristop: deterministični *PASS* sam po sebi ni zadosten brez visoke verjetnostne ocene.

Orakelj C (telemetrija-prvi pogled)

Orakelj C uporablja telemetrijo transporta (časovne serije, agregirane metrike) kot primarni vir informacij. Konceptualno se približa porazdeljenim in dinamičnim modelom zaupanja iz poglavja 2.2, kjer se zaupanje gradi na osnovi kumulativnih izkušenj in se sproti prilagaja novim dogodkom. Njegov prag za verjetnostno oceno je:

$$prob\_threshold^{(\mathrm{C})} = 0{,}7.$$

Kriteriji in uteži Za proizvajalce in distributerje uporablja naslednje kriterije:

- **Manufacturer:**
  - `hasTempDeviationScore` $\leq 0{,}10$ (utež 0,5),
  - `hasGDPVC` = `true` (utež 0,4).
- **Distributor:**
  - `hasDeliveryPunctuality` $\geq 0{,}95$ (utež 0,5).

Pri transporterjih ta orakelj v trenutni konfiguraciji ne izračunava ocene, saj zanje ni definiranih kriterijev; v takem primeru subjekt v tem pogledu ni ocenjen.

Primer: BioPharm (proizvajalec) Za proizvajalca BioPharm sta zabeležena `tempDev` = 0,08 in `GDPVC=true`. Oba pogoja sta deterministično izpolnjena (*PASS*), zaželenost je visoka in oba kriterija dobita srednjo vrednost Beta posteriorja približno 0,91. Verjetnostna ocena je zato:

$$prob\_score \approx 0{,}91 \geq 0{,}7,$$

kombinirana odločitev pa:

$$combined^{(\mathrm{C,BioPharm})} = PASS.$$

Primer: CanaryLabs (proizvajalec) Za proizvajalca CanaryLabs sta zabeležena `tempDev` = 0,12 in `GDPVC=false`. Deterministični del zato vrne *FAIL*. Ker sta temperaturna odstopanja prevelika in ni poverilnice o skladnosti, je tudi verjetnostna ocena nizka ($prob\_score \ll 0{,}7$). Kombinirana odločitev je:

$$combined^{(\mathrm{C,CanaryLabs})} = FAIL.$$

Takšna predstavitev treh orakljev neposredno gradi na modelih iz poglavja 2.2: Orakelj A predstavlja hibridni semantičen in dinamično podprt

pristop, Orakelj B predstavlja strogo dokazno-kriptografski pogled, Orakelj C pa dinamično, na meritvah temeljeno ocenjevanje. V scenarijih, ki sledijo, bomo za izbranega subjekta pokazali, kako različni algoritmi privedejo do različnih, a razložljivih odločitev o zaupanju.

4.1.3 Agregacija poročil orakljev

V scenarijih, predstavljenih v nadaljevanju, vedno nastopi enak vzorec: za določenega akterja (npr. transportno podjetje ali distributerja) pametna pogodba `TrustGraph.sol` sproži zahtevo po poročilu o zaupanju, oraklji A, B in C izračunajo lastne ocene in jih pošljejo agregatorju, ta pa iz treh poročil izpelje enotno odločitev, ki jo zapiše v verigo blokov.

V opisu scenarijev bomo tabelarično pokazali, kako so posamezne ocene orakljev A, B in C videti pred agregacijo, ter kako je iz njih izpeljana enotna odločitev, ki je na voljo ostalim akterjem v dobavni verigi.

Pravila agregacije

Za dane tri (ali več) veljavnih poročil agregator uporabi preprosta deterministična pravila:

Skupni subjekt in politika Najprej preveri, da:

- vsa poročila veljajo za istega subjekta (isti zgoščeni identifikator),
- vsa poročila uporabljajo enak povzetek politike (`policy_hash`),
- povzetek poverilnic (`credential_hash`) ni v nasprotju z lokalno shrambo poverilnic (če ta obstaja).

Če katero od teh preverjanj pade, agregator poročil ne združi in zahteva v scenariju velja za neuspešno.

Diskretna odločitev (da/ne) Vsak orakelj poda diskretno odločitev, ali je subjekt zaupanja vreden ali ne. Agregator uporabi preprosto večinsko pravilo:

$$\text{odločitev} = \begin{cases} \text{true}, & \text{če vsaj dva od treh orakljev poročata } \textit{true}, \\ \text{false}, & \text{sicer.} \end{cases}$$

V scenarijih to pomeni, da bo subjekt označen kot zaupanja vreden, če se vsaj dva od treh pogledov (hibridni, dokazni, telemetrijski) strinjata, da so pogoji izpolnjeni.

Številčna ocena zaupanja Vsako poročilo vsebuje številčno oceno zaupanja v razponu [0, 10000]. Agregator v trenutni verziji uporablja kar povprečje ocen vseh orakljev.

Povprečje je končna številčna ocena zaupanja, ki se zapiše v pametno pogodbo in jo v scenarijih prikazujemo kot *agregirano* vrednost.

Zastavice (flags) Oraklji z zastavicami označijo posebna stanja, npr. pomanjkanje podatkov, nizko oceno ali uporabo preklicanih poverilnic. Agregator za vsak posamezen bit zastavice preveri, ali ga nastavi vsaj polovica orakljev. Če je tako, je ta bit nastavljen tudi v skupnem rezultatu. V scenarijih to pomeni, da se opozorila, na katera opozori večina orakljev, prenesejo tudi v končno oceno, opozorila posameznega "osamelca" pa lahko ostanejo samo v njegovem individualnem poročilu.

Zapis agregirane odločitve na verigo

Ko je agregacija uspešna, agregator za dani `request_id` izvede klic `fulfillTrustReport` v pametni pogodbi `TrustGraph.sol`. V verigo blokov se zapiše:

- identifikator subjekta (zgoščena identiteta),
- agregirana diskretna odločitev (zaupanja vreden da/ne),
- agregirana številčna ocena zaupanja,

- agregirane zastavice (večinska opozorila),
- časovni žig in povzetek politike.

V scenarijih, ki sledijo, bomo zato vedno prikazali dva nivoja:

1. *posamična poročila* orakljev A, B in C (njihove odločitve, ocene in zastavice),
2. *agregirano odločitev*, ki jo agregator zapiše na verigo in jo ostali akterji uporabljajo kot referenčno oceno zaupanja za danega subjekta.

Tako je jasno razvidno, kako se različni algoritmi (hibridni, dokazni, telemetrijski) zlivajo v eno, soglašano oceno, ki je dosegljiva vsem udeležencem dobavne verige.

4.1.4 Scenarij 1: Ocena zaupanja transporterja DHL

V prvem scenariju prikažemo celoten potek ocene zaupanja za konkretnega akterja v dobavni verigi: transportno podjetje `DHL`, ki skrbi za prevoz zdravil med proizvajalci, distributerji in lekarnami. Namen scenarija je pokazati, kako trije različni pogledi (Orakelj A, B in C) vodijo do deloma različnih rezultatov in kako agregator iz njih izpelje enotno, na verigi zapisano odločitev.

Opis izhodišča

Za subjekt `DHL` v trenutni konfiguraciji veljajo naslednja dejstva:

- v ontologiji je označen kot *transporter*,
- za njega obstaja veljavna preverljiva poverilnica skladnosti (VC), kar je razvidno iz neničelnega povzetka poverilnic (`credential_hash`),
- poverilnica je shranjena v skupnem repozitoriju VC na strežniku, do katerega imajo dostop vsi oraklji,
- telemetrijske metrike kažejo visoko pravočasnost dostav in sprejemljiva temperaturna odstopanja v hladni verigi.

Na tej osnovi:

- Orakelj A (hibridni model) kombinira ontologijo, politike in VC ter pri `DHL` zazna nekaj slabših kazalnikov (zato vrne precej nižjo številčno oceno kot preostala oraklja, odločitev pa ostane negativna).
- Orakelj B (dokazni, VC model) se nasloni skoraj izključno na prisotnost veljavne poverilnice (ki je dostopna vsem orakljem) in `DHL` oceni zelo visoko.
- Orakelj C (telemetrija) uporablja predvsem telemetrijo in kombinacijo kazalnikov točnosti ter temperature in vrne pozitivno odločitev z visoko, a nekoliko nižjo oceno kot Orakelj B.

Potek izvedbe scenarija

Scenarij se izvede v naslednjih korakih:

1. **Sprožitev zahteve za poročilo.** Regulator ali drug pooblaščen akter za transporterja `DHL` sproži zahtevo za poročilo o zaupanju. V prototipu to izvedemo z ukazom, ki prek skripte pošlje transakcijo `requestTrustReport` pametni pogodbi `TrustGraph.sol`. Pogodba pri tem ustvari nov identifikator zahteve `request_id` in izda dogodek `TrustOracleRequested`.
2. **Izračun poročil v orakljih.** Oraklji A, B in C spremljajo dogodke pametne pogodbe. Ko prejmejo dogodek za nov `request_id` in subjekt `DHL`, osvežijo ontologijo, naložijo VC iz skupnega repozitorija in telemetrijo ter izvedejo svoje algoritme:
   - Orakelj A (hibridni) uporabi politike in semantične podatke ter za `DHL` izračuna negativno odločitev z nizko oceno.
   - Orakelj B (VC-centričen) preveri veljavnost poverilnice in subjekt oceni zelo visoko, brez opozoril.

- Orakelj C (telemetrija-prvi) na podlagi telemetrijskih metrik izračuna pozitivno odločitev in visoko oceno, ki odraža dobro operativno delovanje.

Vsak orakelj pripravi podpisano poročilo `SignedOracleReport`.

3. **Pošiljanje poročil agregatorju.** Oraklji pošljejo svoja podpisana poročila agregatorju preko HTTP vmesnika `/reports`. Agregator preveri podpise in identitete vozlišč ter poročila začasno shrani pod isti `request_id`.

4. **Agregacija rezultatov.** Ko agregator za dani `request_id` prejme poročila vseh treh orakljev, uporabi pravila agregacije iz podpoglavja 4.1.3: večinsko glasovanje za diskretno odločitev, povprečje za številčno oceno ter večinsko pravilo za zastavice.

5. **Zapis končne odločitve na verigo.** Agregator pokliče funkcijo `fulfillTrustReport` v pametni pogodbi in za `DHL` zapiše končno odločitev in številčno oceno zaupanja, ki sta od takrat naprej vidni vsem udeležencem sistema.

Dejanski rezultati orakljev in agregatorja

Tabela 4.1 prikazuje dejanske rezultate poročil orakljev A, B in C ter agregatorja za subjekt `DHL`. Vrednosti so izražene v osnovnih točkah (0–10000).

Tabela 4.1: Rezultati orakljev A, B in C ter agregatorja za scenarij 1 (transporter DHL).

Vir	Tip algoritma	Odločitev	Številčna ocena	Zastavice
Orakelj A	hibridni	*FAIL*	2382	0x00
Orakelj B	dokazni (VC)	*PASS*	9500	0x00
Orakelj C	telemetrija	*PASS*	8879	0x00
Agregator	agregirano	*PASS*	6920	0x00

Interpretacija posameznih poročil:

- **Orakelj A** vrne negativno odločitev (*FAIL*) z nizko oceno 2382 in brez zastavic (`0x00`). Hibridni pogled na podlagi politik in semantičnih podatkov subjekt ocenjuje previdno, vendar iz same vrednosti ne izpelje dodatnega opozorila.

- **Orakelj B** vrne pozitivno odločitev (*PASS*) z zelo visoko oceno 9500 in brez zastavic (`0x00`). Ker ima `DHL` veljavno preverljivo poverilnico v skupnem repozitoriju VC, VC-centričen algoritem oceni, da so formalni pogoji za zaupanje izpolnjeni.

- **Orakelj C** vrne pozitivno odločitev (*PASS*) z visoko oceno 8879 in brez zastavic. Telemetrijske metrike (pravočasne dostave, stabilna temperatura) kažejo dobro operativno delovanje, zato telemetrijsko usmerjen pogled subjekt oceni kot zaupanja vreden.

Agregator iz teh treh poročil izvede:

- **Diskretna odločitev.** Dva od treh orakljev (B in C) poročata *PASS*, eden (A) poroča *FAIL*. Po večinskem pravilu je končna odločitev *PASS* – subjekt `DHL` je v agregiranem pogledu ocenjen kot zaupanja vreden.

- **Številčna ocena.** Ocene treh orakljev so 2382, 8879 in 9500. Aritmetična sredina teh treh vrednosti je približno 6920, zato agregator zapiše končno oceno zaupanja 6920/10000.

- **Zastavice.** Noben orakelj ne nastavi opozorilnih zastavic, zato agregator po večinskem pravilu ohrani vrednost `0x00`. V tem scenariju končni rezultat ne vsebuje globalnih opozoril in predstavlja "čist" pozitiven zapis.

- **Politike in poverilnice.** Vsa tri poročila uporabljajo enak `credential_hash`, kar pomeni, da se sklicujejo na isto preverljivo poverilnico iz skupnega repozitorija VC. Agregator pri tem preveri, da poverilnica v lokalni shrambi ni označena kot preklicana.

Za ostale akterje v dobavni verigi je rezultat scenarija naslednji: ob poizvedbi nad `TrustGraph.sol` za subjekt `DHL` dobijo informacijo, da je transporter trenutno označen kot zaupanja vreden (*PASS*) z agregirano številčno oceno zaupanja približno 6920/10000 in brez globalnih opozoril. Če želijo razumeti razloge za razhajanje med pogledi, lahko pregledajo posamične on-chain zapise orakljev A, B in C in vidijo, da hibridni pogled Oraklja A subjekt ocenjuje previdneje, medtem ko dokazni in telemetrijski pogled ocenjujeta, da je transporter glede na preverljive poverilnice in operativne kazalnike dovolj zaupanja vreden.

4.1.5 Scenarij 2: Poslabšanje zaupanja po incidentih transporterja DHL

V drugem scenariju nadaljujemo primer transporterja `DHL` iz scenarija 4.1.4, vendar predpostavimo, da se v naslednjem obdobju zgodi več incidentov v dostavni verigi. Namen scenarija je pokazati, kako sistem dinamično prilagodi oceno zaupanja na podlagi novih podatkov in kako semantični ter telemetrijski signali lahko pretehtajo formalna dokazila (VC). Pri tem posebej poudarimo, da bi v realnem okolju ti podatki prihajali iz zunanjih sistemov, do katerih ima vsak orakelj svoj, ne nujno enak dostop.

Spremembe v telemetriji in zunanjih virih

Simuliramo, da se je v opazovanem obdobju povečalo število poznih dostav in odstopanj v senzorskih meritvah. V prototipu to predstavimo kot spremembo zapisa v datoteki z metrikami telemetrije:

```
"http://example.org/trust#DHL": {
  "tempDeviation": 0.12,
  "lateDeliveries": 0.12,
  "alerts": 2
},
```

V ontologiji in repozitoriju VC subjekt `DHL` ostane enak kot v scenariju 1: še vedno ima veljavno preverljivo poverilnico skladnosti in status transporterja. Spremeni se torej le telemetrija.

V realnem sistemu tak zapis ne bi bil lokalna JSON datoteka, temveč projekcija zunanjih podatkov:

- meritve iz senzorjev IoT (npr. temperatura, vlaga),
- zapisi iz transportnega informacijskega sistema (TMS) o zamudah,
- opozorila iz nadzornih sistemov ali sistemov za kakovost.

Vsak orakelj bi bil konfiguriran z lastnimi adapterji do takih virov. Nekaterim orakljem so ti podatki ključni drugi jih namerno ignorirajo ali jim dajejo zelo majhno težo. V prototipu te razlike modeliramo z različnimi algoritmi orakljev A, B in C nad istim simuliranim telemetrijskim virom.

Novi izračuni orakljev

Na podlagi spremenjenih podatkov oraklji ponovno izvedejo svoje algoritme in pripravijo nova podpisana poročila. Rezultati so predstavljeni v tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Rezultati orakljev A, B in C ter agregatorja za scenarij 2 (transporter DHL).

Vir	Tip algoritma	Odločitev	Številčna ocena	Zastavice
Orakelj A	hibridni	*FAIL*	2382	0x02
Orakelj B	dokazni (VC)	*PASS*	9500	0x00
Orakelj C	telemetrija	*FAIL*	6920	0x02
Agregator	agregirano	*FAIL*	6267	0x02

Interpretacija posameznih poročil:

- **Orakelj A** (hibridni model) ostane negativen (*FAIL*) z nizko oceno 2382. Zastavica `0x02` označuje, da je ocena pod notranjim pragom (*nizka ocena*). V realnem okolju bi ta orakelj poleg ontologije in VC

bral tudi izbran nabor zunanjih podatkov (npr. regulatorne incidente, povzetke revizij, agregirane metrike kakovosti) in jih semantično povezal v končno oceno.

- **Orakelj B** (dokazni, VC model) se opira predvsem na preverljivo poverilnico, ki je še vedno veljavna. Odločitev ostane pozitivna (*PASS*) z zelo visoko oceno 9500 in brez zastavic (`0x00`). V realnem scenariju bi ta orakelj tipično bral samo iz infrastrukture za digitalna dokazila (npr. veriga blokov z VC, revokacijski registri) in ne bi bil neposredno povezan z operativno telemetrijo.

- **Orakelj C** (telemetrija) neposredno zazna poslabšanje operativnih metrik. Pri novih vrednostih `lateDeliveries` = 0,12 in `tempDeviation` = 0,12 so *točnost* in *temperaturna stabilnost* le še približno 0,88, število alarmov pa se poveča na 2. Po vgrajeni formuli za oceno

$$\text{base\_score} = 0{,}6 \cdot 0{,}88 + 0{,}3 \cdot 0{,}88 - 0{,}05 \cdot 2 \approx 0{,}692,$$

kar daje številčno oceno 6920/10000. Ker je ocena pod pragom in je število alarmov ≥ 2, orakelj C spremeni odločitev v *FAIL* in nastavi zastavico `0x02` (nizka ocena). V realnem sistemu bi ta orakelj poslušal neposredno tokove telemetrije in iz njih sproti gradil oceno zaupanja.

Agregirana odločitev po incidentih

Agregator v tem scenariju združi poročila tako kot v scenariju 4.1.4: uporabi večinsko glasovanje za diskretno odločitev, povprečje za številčno oceno ter večinsko pravilo za zastavice.

- **Diskretna odločitev.** Orakelj A in C poročata *FAIL*, Orakelj B poroča *PASS*. Dva od treh orakljev sta negativna, zato je agregirana odločitev *FAIL*. Z vidika sistema je `DHL` po incidentih označen kot nezaupanja vreden.

- **Številčna ocena.** Ocene treh orakljev so 2382, 9500 in 6920. Aritmetična sredina je približno 6267, kar je nova agregirana številčna ocena zaupanja:

$$\frac{2382 + 9500 + 6920}{3} \approx 6267.$$

  Ocena je bistveno nižja kot v prvem scenariju (kjer je znašala približno 6920), kar odraža vpliv poslabšanih operativnih metrik.

- **Zastavice** Oraklja A in C nastavljata zastavico `0x02` (*nizka ocena*), Orakelj B pa zastavic ne nastavlja. Ker ima ta bit nastavljena večina orakljev, agregator v končnem rezultatu prav tako nastavi `0x02`. Agregirani zapis tako ne le označi subjekt kot nezaupanja vreden, temveč tudi razloži razlog: nizka številčna ocena, pod pragom sprejemljive ravni.

- **Politike in poverilnice** Vsa tri poročila uporabljajo enako zgoščeno vrednost poverilnic `credential_hash`, kar pomeni, da se še vedno sklicujejo na isto veljavno preverljivo poverilnico. Agregator pri tem preveri, da poverilnica ni označena kot preklicana. To pomeni, da je sprememba ocene iz *PASS* (scenarij 1) v *FAIL* (scenarij 2) posledica izključno poslabšanja operativnih metrik in zunanjih podatkov, ne pa spremembe formalnih dokazil.

Za ostale akterje v dobavni verigi je rezultat scenarija naslednji: ob poizvedbi nad `TrustGraph.sol` za subjekt `DHL` dobijo informacijo, da je transporter po novih incidentih označen kot nezaupanja vreden (*FAIL*) z agregirano številčno oceno zaupanja približno 6267/10000 in z zastavico `0x02`, ki označuje nizko oceno. Primerjava scenarijev 4.1.4 in 4.1.5 jasno pokaže, da je sistem dinamično prilagodil oceno zaupanja na podlagi novih podatkov, pri čemer so semantični in telemetrijski signali pretehtali formalna dokazila, ki jih je predstavljala preverljiva poverilnica.

4.2 Varnostna analiza sistema

V tem poglavju obravnavamo varnostni vidik ključnega dela razvitega sistema – decentraliziranega omrežja orakljev (DON) in pametne pogodbe. Prav ti dve komponenti skupaj izvajata proces izračuna zaupanja, pripravljata poročila, preverjata njihove podpise in na koncu zapišeta agregirane odločitve v nespremenljivo podatkovno strukturo na verigi.

Ostali deli arhitekture, kot so podatkovna baza preverljivih poverilnic, ontologija v strežniku Fuseki ali lokalni telemetrični viri podatkov, niso predmet podrobne varnostne analize v tem poglavju. Te komponente obravnavamo kot zunanje storitve, ki imajo svoje mehanizme za zagotavljanje integritete, razpoložljivosti in zanesljivosti. Varnostno pomembne so predvsem v toliko, kolikor lahko s svojimi podatki vplivajo na vhodne informacije za oraklje, ne vplivajo pa neposredno na zapisovanje ali branje rezultatov na verigi blokov.

Osrednji del analize zato posvečamo mehanizmom, ki odločajo o tem, komu system zaupa pri izračunu in zapisu rezultatov, ter kako se podatki premikajo med posameznimi komponentami. Ključni poudarek je na dveh vidikih: prvič, na zaščiti pametne pogodbe pred nepooblaščenimi vpisi ali manipulacijami, in drugič, na zagotovilih, da lahko agregator prepozna veljavne prispevke orakljev, preveri njihove podpise in zavrne kakršne koli nepravilne ali ponarejene podatke. Tok podatkov med oraklji in agregatorjem je zato ena izmed osrednjih točk varnostne presoje, saj se prav tam zgodi največji del logike, ki odloča, katera poročila bodo na koncu vplivala na stanje sistema.

V nadaljevanju najprej opišemo metodologijo in model napadalca, ki ga uporabljamo v analizi, nato pa sistematično pregledamo grožnje, ki zadevajo pametno pogodbo in decentralizirano omrežje orakljev, ter prikažemo obstoječe in predlagane mehanizme za njihovo ublažitev.

4.2.1 Cilji varnostne analize

Prvi cilj varnostne analize je konceptualen: želimo jasno opredeliti, katere varnostne lastnosti mora imeti sistem, ki združuje verigo blokov, pametne pogodbe in decentralizirano omrežje orakljev. Pri takem sistemu mora biti zagotovljeno, da so odločitve o zaupanju, zapisane na verigi, pravilne, preverljive in odporne na manipulacije, ter da jih lahko drugi akterji neodvisno preverijo. Sistem mora vzdržati tudi primere nepoštenih ali kompromitiranih orakljev, napake infrastrukture in poskuse vplivanja na agregirane rezultate.

Drugi cilj je praktičen in izhaja iz konkretne implementacije prototipa. Pregledati moramo, katere od teh ključnih lastnosti so že ustrezno podprte in kje še obstajajo vrzeli, ki bi jih bilo treba zapolniti za namestitev v produkcijsko okolje. Pri tem se osredotočamo na integriteto podatkov, zapisano v pametni pogodbi, na avtentikacijo orakljev in agregatorja, na preverljivost posameznih poročil ter na razpoložljivost mehanizma za izračun zaupanja, tudi kadar pride do izpada ali nepravilnega delovanja posameznih komponent.

Varnostna analiza se tako osredotoča na del sistema, kjer se sprejemajo in zapisujejo odločitve o zaupanju. Posebej nas zanima, ali je potek podatkov med oraklji, agregatorjem in pametno pogodbo zaščiten pred napačnimi podpisi, ponarejenimi identitetami, spreminjanjem vsebine poročil, napadi zavrnitve storitve in drugimi oblikami poskusov vplivanja na rezultat. Ker so prav ti podatki podlaga za nadaljnje odločitve v dobavni verigi, mora biti jedro sistema načrtovano tako, da nepravilne ali zlonamerne posege zazna in zavrne ter omogoča preverljivo delovanje.

4.2.2 Pregled arhitekture DON in pametne pogodbe

Za potrebe varnostne analize na kratko povzamemo del arhitekture, ki je ključen za mehanizem zaupanja. Pametna pogodba `TrustGraph.sol`, ki teče na testnem Ethereum omrežju, hrani agregirane odločitve o zaupanju za posamezne subjekte ter posamične prispevke orakljev, vezane na identifikatorje

zahtev `requestId`. Agregator deluje kot edini pooblaščeni zapisovalec teh rezultatov in ima zato lasten naslov ter zasebni ključ v omrežju. Klice na pametno pogodbo `TrustGraph.sol` pošilja prek varnega klica RPC (HTTPS) do vozlišča verige blokov, pri čemer je identiteta klicatelja na ravni Ethereum protokola kriptografsko potrjena s podpisom transakcije.

Funkcije pametne pogodbe, ki sprejemajo rezultate, so zaščitene z vlogo oziroma modifikatorjem `onlyEvaluator`, kar pomeni, da jih lahko kliče le z zasebnim ključem, katerega lastnik je agregator. Klici z drugih naslovov povzročijo zavrnitev transakcije (v pametnih pogodbah se kliče funkcija `revert`). Za spremembe nastavitev, kot so menjava agregatorja ali dodeljevanje novih vlog, je predvideno upravljanje z vlogami in potrjevanjem z več podpisi(angl. *multi-sig*). To preprečuje, da bi en sam zasebni ključ samovoljno spremenil pravila delovanja sistema.

Na verigo se nikoli ne pošiljajo surovi vhodni podatki. Zapisujejo se le zgoščene vrednosti (povzetki politike, preverljivega dokazila in ontoloških podatkov), agregirana ocena ter opozorilne zastavice. Pametna pogodba tako deluje kot kriptografsko zavarovana osrednja plast, ki zagotavlja integriteto rezultatov, ne da bi hranila osebne ali poslovno občutljive podatke.

Oraklji spremljajo dogodke `TrustOracleRequested`, pridobijo vhodne podatke iz plasti znanja ter izračunajo svojo oceno zaupanja. Ko je izračun opravljen, orakelj pripravi podpisano poročilo `SignedOracleReport` in ga posreduje agregatorju prek klica HTTP `/reports`. Vsak orakelj ima lasten par javnega in zasebnega ključa, ki ga uporablja za digitalno podpisovanje poročil s shemo ECDSA `secp256k1`. Pred podpisom se celotno poročilo pretvori v JSON predstavitev, kjer sta vrstni red ključev in oblika serializacije vnaprej določena. Ta pristop zagotavlja, da ima identičen podatkovni objekt vedno enako binarno predstavitev in s tem tudi enoličen kriptografski podpis, kar je bistveno za preverljivost.

Agregator ob prejemu poročila najprej izvede matematično obnovo javnega ključa iz podpisa (t. i. ECDSA *public key recovery*) in iz njega izpelje Ethereum naslov pošiljatelja. Na ta način preveri, ali podpis res ustreza po-

datkom v poročilu in ali naslov pripada oraklju, ki je na seznamu dovoljenih vozlišč. Če se podpis ne ujema ali če naslov ni dovoljen, agregator poročilo zavrne. Tako sistem ne temelji na zaupanju v omrežno povezavo, temveč na kriptografski verifikaciji vsake posamične oddaje.

Pri branju iz verige blokov pametna pogodba ponuja standardne funkcije tipa `view` in `pure`. Prek njih lahko katerikoli odjemalec brez plačila za izvajanje (`gas`) dostopa do trenutnih in zgodovinskih rezultatov ocenjevanja. Dodatni podatki so na voljo tudi prek dnevnikov dogodkov, ki jih objavi pogodba ob zapisovanju posamičnih prispevkov in končnih agregiranih rezultatov. Ker se na verigi hranijo le zgoščene vrednosti in psevdonimni identifikatorji, branje podatkov ne razkriva nobenih surovih informacij o subjektih ali njihovih lastnostih.

Takšen podatkovni tok določa glavne meje zaupanja in razkriva ključne točke, kjer je sistem potencialno ranljiv: pri klicih pametne pogodbe (kdo lahko sproži izračun in kdo lahko objavi rezultat), na povezavi med pametno pogodbo in oraklji (pravilna interpretacija identitete in politike) ter na povezavi med oraklji in agregatorjem (preverjanje pristnosti pošiljateljev, zaščita pred ponarejenimi podpisi, preverjanje preverljivih dokazil ter zaščita pred napadi ponovnega predvajanja). V nadaljevanju zato ločeno obravnavamo grožnje za pametno pogodbo `TrustGraph.sol` in grožnje za decentralizirano omrežje orakljev, ter pokažemo, kateri mehanizmi so že implementirani in kje bi bilo treba zasnovo dodatno utrditi pri prehodu v produkcijsko okolje.

4.2.3 Metodologija analize in model napadalca

Varnostno analizo izvedemo po načelih formalnega modeliranja groženj, kot jih predlagajo smernice OWASP in Microsoftovi standardi za decentralizirane sisteme. Osrednji okvir, ki ga uporabimo, je model STRIDE, ki razvršča varnostne grožnje v šest razredov glede na vrsto kršitve: lažno predstavljanje identitete (Spoofing), spreminjanje podatkov (Tampering), zanikanje sodelovanja (Repudiation), razkritje informacij (Information disclosure), zavrnitev storitve (Denial of service) ter povečanje privilegijev (Elevation of privilege).

STRIDE je primeren za naš sistem, ker se osredotoča na integriteto, avtentičnost in dostopnost podatkov — lastnosti, ki so v mehanizmu zaupanja ključne, saj neposredno vplivajo na pravilnost izračunov in na zanesljivost registra zaupanja v pametni pogodbi.

Pri analizi ne razčlenjujemo le posameznih komponent, temveč tudi meje med njimi. V sistemu so te meje izrazite: pametna pogodba predstavlja kriptografsko zaščiteno točko trajnega dnevnika, oraklji izvajajo izračune zunaj verige in so zato izpostavljeni manipulacijam, agregator pa deluje kot povezovalni element med izračuni in verigo blokov. STRIDE zato uporabimo kot okvir skozi celoten tok podatkov. Na grožnje se osredotočamo tam, kjer so povezave najšibkejše: pri podpisovanju poročil, pri prenosu rezultatov v agregator, pri preverjanju upravičenosti klicev pametne pogodbe ter pri mehanizmih, ki določajo, kdo lahko objavi končno oceno na verigi.

Čeprav je STRIDE široko uporabljen model, se je treba zavedati njegovih omejitev. Ne obravnava vprašanj gospodarskih spodbud, semantičnih napadov ali zlorab na ravni ontologije, zato te grožnje obravnavamo ločeno kot dopolnilno analizo.

Pri določanju tipa napadalca predpostavimo več ravni zmogljivosti. Prvi scenarij predstavlja zunanjega napadalca, ki ima enaka dovoljenja kot tipični uporabniki verige blokov: lahko kliče javne funkcije pametne pogodbe, spremlja dogodke in poskuša sprožiti izračune ali preobremeniti pogodbo. Drugi scenarij predvideva škodoželjnega oraklja. Tak orakelj lahko odda napačno poročilo, manipulira z vhodnimi podatki ali poskuša ponarediti podpis. Ker uporabljamo digitalne podpise ECDSA nad deterministično JSON predstavitvijo, tak napadalec ne more ponarediti avtentičnosti, lahko pa poskuša vplivati na izračun s prirejenimi podatki iz ontologije ali preverljivih dokazil.

Tretji scenarij predvideva napadalca, ki cilja na spremembo agregiranja. Ta bi lahko poskušal sprejeti lažna poročila, zlorabiti svoj položaj pri zapisovanju rezultatov ali poskušal reproducirati stare podpise. Ker agregator rekonstruira naslov pošiljatelja iz digitalnega podpisa in preverja časovni žig ter identifikator izvajanja, je zaščiten pred ponarejenimi sporočili in pona-

vljanjem že obdelanih poročil. Zadnja kategorija so napadi zavrnitve storitve, kjer napadalec poskuša preobremeniti oraklje ali agregator z velikim številom zahtev in tako zmanjšati razpoložljivost izračunov.

Tak model napadalca nam omogoča, da jasno opredelimo, katere komponente se morajo zanašati na kriptografske zaščite (podpisi, zgoščene vrednosti, preverjanje naslovov), katere so zaščitene z logiko pametne pogodbe (vloge, omejitve klicev) ter kje sistem zahteva dodatne arhitekturne ukrepe za produkcijsko okolje, kot so redundančni agregatorji, nadzor nad ključi ter mehanizmi zaščite pred preobremenitvijo. STRIDE tako ponuja ogrodje, ki ga v nadaljevanju uporabimo za razvrščanje groženj in vrednotenje implementiranih protiukrepov.

4.2.4 Analiza groženj za pametno pogodbo

Pametna pogodba `TrustGraph.sol` predstavlja edini vir resnice sistema na verigi blokov, saj hrani končne odločitve o zaupanju in posamične prispevke orakljev. Kot smo objasnili v prejšnjem podpoglavju, je pomembno, da sprejema le veljavne agregirane rezultate, pravilno povezuje prispevke z identifikatorji zahtev `requestId` in zavrača nepooblaščene spremembe stanj. V tabeli 4.3 je zbran pregled glavnih razredov groženj (po modelu STRIDE), tipičnih protiukrepov ter oblik testnega pokrivanja.

Tabela 4.3: Povzetek glavnih groženj in protiukrepov za pametno pogodbo `TrustGraph.sol`.

Grožnja	Protiukrepi	Testno pokritje
Nepooblaščeni klici funkcij za zapis rezultatov	Vloga `EVALUATOR` oziroma modifikator `onlyEvaluator`, ki omeji klice na naslov(e) agregatorja	Enotski testi klicev z nedovoljenih naslovov, ki pričakujejo `revert`
Neveljavne spremembe stanja odločitev o zaupanju	Preverjanje parametrov in invarianti stanja (ujemanje `requestId`, monotoni časovni žigi, veljavne zastavice)	Fuzzing in regresijski testi zaporednih klicev, ki preverjajo, da pogodba ne ostane v nelogičnem stanju
Preobremenitev pogodbe z velikim številom zahtev ali dragimi klici	Omejitve, kdo lahko sproži nove zahteve, ter preverjanje velikosti in kompleksnosti zapisov	Merjenje porabe plina in testi mejnih primerov za funkcije `requestTrustReport` in `fulfillTrustReport`
Prevelika količina podatkov o subjektih na verigi	Shranjevanje le zgoščenih identifikatorjev (hash VC, hash politike, hash ontologije) in agregiranih ocen	Pregled sheme stanja in testi za nove različice, ki preverjajo, da se na verigo ne dodajajo surovi identifikatorji ali PII
Zloraba upravljavskih oziroma administrativnih vlog	Vloge in večpodpisno upravljanje nad kritičnimi konfiguracijskimi funkcijami (npr. zamenjava agregatorja)	Enotski testi dodeljevanja, rotacije in preklica vlog ter zaščite privilegiranih funkcij

Kot prikazuje tabela 4.3, je prvi sklop groženj povezan z nepooblaščenimi klici funkcij, ki spreminjajo stanje grafa zaupanja (angl. spoofing). V implementaciji funkcije za zapis rezultatov klice omejujemo z vlogo `EVALUATOR` oziroma modifikatorjem `onlyEvaluator`, tako da jih lahko kliče le agregator oziroma izrecno pooblaščeni naslovi. Enotski Foundry testi simulirajo klice z drugih naslovov in preverjajo, da pogodba takšne poskuse zavrne z `revert`.

Drugi sklop groženj se nanaša na integriteto stanja pametne pogodbe (angl. tampering). Čeprav veriga blokov zagotavlja nespremenljivost zgodovine transakcij, to samo po sebi ne prepreči, da pametna pogodba zaradi neustrezno preverjenih parametrov ali pomanjkljivih logičnih pogojev vnese v svoje stanje podatke, ki so med seboj nekonsistentni. Do takšnih razmer lahko pride denimo takrat, ko se nov rezultat napačno poveže z drugim subjektom, ali ko se časovni žig izračuna v preteklost. To iz vidika semantike predstavlja nelogično stanje. Zato so v implementaciji funkcij uvedeni preverjevalni mehanizmi, ki zagotavljajo ohranjanje osnovnih stanjskih invarint (angl. state invariants). Med njih spadajo: zahteva, da se vsak novi zapis nanaša na isti identifikator subjekta kot začetni zahtevek, da je časovni žig (`asOf`) monoton in nikoli ne nazaduje ter da so meje dovoljenih vrednosti (npr. razpon ocene) ustrezno nadzorovane. Za dodatno zagotovitev pravilnosti smo izvedli kombinacijo enotskih in regresijskih testov. Enotski testi preverjajo posamezne robne primere. Fuzzing testi pa avtomatsko generirajo veliko število naključnih kombinacij parametrov (različni `requestId`, časovni žigi, zastavice in ocene). S tem preverimo, ali bi katera od kombinacij lahko pripeljala pogodbo v nelogično stanje ali sprožila neželene stranske učinke. Regresijski testi pa zagotavljajo, da popravki logike ne uvajajo novih nepravilnosti in da se znane invariante v kasnejših posodobitvah ohranjajo.

Tretji sklop se nanaša na napade zavrnitve storitve (DoS). Ker so nekatere funkcije pametne pogodbe javno dostopne, lahko velik del zahtev za izračun zaupanja ali nepravilno konfigurirani paketni klici povzročijo, da postane uporaba pogodbe ekonomsko neupravičena. Pri prehodu v verigo bi bilo treba omejiti, kdo lahko sproži `requestTrustReport`, uvesti pragove

za velikost paketov ter spremljati porabo stroškov verige blokov pri tipičnih scenarijih, da se pravočasno zazna degradacija.

Četrti sklop pokriva razkritje informacij (angl. information disclosure). Pametna pogodba shranjuje le zgoščene identifikatorje subjektov in politik, agregirano številčno oceno zaupanja ter zastavice, kar sledi načelu minimizacije podatkov. Pri nadaljnjem razvoju je pomembno ohraniti isto filozofijo tudi pri razširitvah sheme: novi podatki naj bodo vedno agregirani ali zgoščeni, enotski testi pa naj preverjajo, da pogodba ne začne nenamerno shranjevati podrobnih metrik ali neposrednih identifikatorjev podjetij in pacientov.

Zadnji sklop se nanaša na zlorabo privilegijev (angl. elevation of privilege). V produkcijskem okolju pričakujemo upravljavske funkcije za posodobitev konfiguracije ali migracijo stanja (npr. zamenjava agregatorja, posodobitev parametrov politik). Take funkcije je treba zaščititi z uveljavljenimi vzorci, kot so vloge in večpodpisno upravljanje, ter podpreti z enotskimi testi, ki preverjajo pravilno dodeljevanje, rotacijo in preklic vlog ter varnostne meje med njimi.

4.2.5 Analiza groženj za decentralizirano omrežje orakljev

Mreža orakljev in agregator skupaj tvorita decentralizirano omrežje, ki je odgovorno za izračun in agregacijo ocen zaupanja. Pretok podatkov poteka tako, da pametna pogodba izda dogodek `TrustOracleRequested` za dani `requestId` in subjekt, oraklji preberejo dogodek, iz zunanjih podatkov izračunajo oceno zaupanja in pripravijo podpisano poročilo, agregator pa sprejme poročila prek vmesnika HTTP `/reports`, preveri podpise, preveri priložene poverilnice, izvede agregacijo in rezultat zapiše v pametno pogodbo. Tabela 4.4 povzema glavne grožnje po modelu STRIDE, tipične protiukrepe ter predvideno testno pokritje na ravni orakljev in agregatorja.

Tabela 4.4: Povzetek glavnih groženj in protiukrepov za mrežo orakljev in agregator.

Grožnja	**Protiukrepi**	**Testno pokritje**
Lažni orakelj pošilja poročila agregatorju	Kriptografsko preverjanje podpisov (ECDSA `recover`) in seznam dovoljenih naslovov orakljev	Integracijski test, ki na `/reports` pošlje napačno podpisan zahtevek ali zahtevek z neznanega naslova in pričakuje napako
Spreminjanje vsebine poročil med prenosom ali v agregatorju	Podpis kanonične JSON predstavitve, preverjanje hashov in zavrnitev pri neskladju	Enotski testi deterministične serializacije ter preverjanja podpisov in hashov
Orakelj zanika, da je oddal določeno poročilo	Shranjevanje podpisanih poročil oziroma njihovih hashov ter deterministična obnova naslova iz podpisa	Testi obnove naslova iz podpisa in ujemanja z zapisanim `node_id` ter revizijske sledi
Prekomerno logiranje identitet subjektov ali poverilnic	Redakcija logov (hashi namesto URI-jev) in uporaba psevdonimnih identifikatorjev	Enotski testi nad vzorčnimi logi, ki preverjajo, da se občutljivi podatki ne pojavijo v izpisu
Preobremenitev orakljev ali agregatorja z zahtevki	Omejitve na nivoju omrežja (rate limiting, požarni zid), kvote in redundanca vozlišč	Obremenitveni testi HTTP vmesnika ter spremljanje odzivnega časa in števila zahtevkov
Kompromitiran agregator zlorabi svojo vlogo pri zapisovanju rezultatov	Več agregatorjev ali delna agregacija na verigi, ločeno upravljanje konfiguracije in jasna omejitev pooblastil	Simulacijski testi različnih konfiguracij kvora in scenarijev kompromitiranih vozlišč

Prva skupina groženj za DON je povezana z istovetnostjo orakljev (spoofing). Agregator pri prejemu poročila kriptografsko obnovi naslov iz podpisa in ga preveri proti konfiguriranemu seznamu dovoljenih vozlišč; poročila z neznanih naslovov ali napačnimi podpisi zavrne. Ker podpis vključuje tudi nonce oziroma *run-id* in časovni žig, lahko agregator zazna in zavrne ponovno predvajanje starega sporočila in s tem prepreči replay napade. Integracijski testi za HTTP vmesnik preverijo, da so spremenjeni ali napačno podpisani payloadi zavrnjeni z ustrezno napako.

Pri tamperingu ščitimo predvsem integriteto vsebine poročil. Ker je podpisan kanonični JSON celotnega poročila, agregator zazna vsako spremembo vsebine med prenosom ali vmesnim shranjevanjem. Za produkcijsko okolje je smiselno dodati revizijsko sled (na primer zapis hashov sprejetih poročil), kar omogoča naknadno preverjanje skladnosti med prejetimi poročili in on-chain zapisi. Enotski testi pri tem preverijo, da serializacija poročila v kanonično obliko vedno vrne enak rezultat in da vsaka sprememba vsebine povzroči neuspeh preverjanja podpisa.

Grožnja repudiacije je pomembna z vidika transparentnosti: orakelj bi lahko poskušal zanikati, da je oddal negativno poročilo za določenega partnerja. S podpisanimi poročili in deterministično obnovo naslova iz podpisa lahko vedno pokažemo, kateri ključ je poročilo podpisal. Če agregator dodatno hrani hash sprejetih poročil, je revizijska sled za potrebe kasnejših sporov ali regulatornih pregledov relativno preprosto dosegljiva.

Poseben del zasnove DON je tudi preverjanje preverljivih poverilnic (VC), ki spremljajo poročila. Vsak orakelj poleg ocene zaupanja priloži VC, ki dokazuje njegovo pooblastilo ali lastnosti subjekta; agregator pred sprejemom poročila preveri podpis VC, status preklica, časovno veljavnost in skladnost sheme z vnaprej definirano politiko. Poročila z neveljavnimi ali preklicanimi poverilnicami so zavrnjena in se nikoli ne zapišejo na verigo, kar zmanjša tveganje, da bi se na grafe zaupanja oprli ponarejeni ali zastareli dokazi.

Napadi zavrnitve storitve (DoS) ciljajo na razpoložljivost omrežja. Ker v prototipu omejevanje hitrosti ni povsod implementirano, so oraklji in agre-

gator teoretično dovzetni za preobremenitev z veliko količino zahtev. V produkcijski rabi bi morali definirati kvote na nivoju omrežja (API prehodi, požarni zidovi), dodati health-checke ter zagotoviti redundanco vozlišč, tako da izpad posameznega oraklja ali agregatorja ne onemogoči sistema in da se promet enakomerno porazdeli.

Informacijsko razkritje v DON se tipično zgodi skozi dnevnike. Ker oraklji in agregator redno logirajo stanje in dogodke, obstaja nevarnost, da bi v logih ostali neposredni identifikatorji subjektov ali poverilnic. Zato je smiselno vpeljati redakcijo logov (na primer izpis le skrajšanega hash-a namesto celotnega URI-ja) in z enotskimi testi preverjati, da vzorčni logi ne vsebujejo občutljivih podatkov. S tem dopolnimo načelo minimizacije podatkov, ki ga že upoštevamo pri zapisih na verigo.

Zadnji sklop groženj se nanaša na privilegije agregatorja. Trenutni model predvideva en osrednji agregator, ki ima pooblastilo za zapis agregiranih odločitev v pametno pogodbo. Če bi bil ta agregator kompromitiran, bi lahko v imenu legitimnih orakljev pošiljal napačne podatke ali spreminjal rezultat agregacije, preden se ta zapiše na verigo. Pri razširitvi v produkcijo bi bilo smiselno razmisliti o več agregatorjih, ki bi morali doseči soglasje, ali o prenosu dela agregacijske logike v pametno pogodbo samo, tako da posamezno vozlišče ne bi moglo samostojno manipulirati z rezultati. Simulacije različnih konfiguracij kvora in scenarijev kompromitiranih vozlišč lahko pomagajo oceniti, kako odporen bi bil tak sistem na zajetje ali okvaro posameznih komponent.

4.2.6 Povzetek tveganj in omejitve prototipa

V analizi smo se osredotočili na del sistema, ki deluje na verigi blokov in v mreži orakljev. Implementacija že vključuje več ključnih varnostnih mehanizmov: podpisana poročila orakljev, preverjanje naslovov v agregatorju, uporabo nonce in časovnih žigov za zaščito pred replay napadi, osnovno preverjanje preverljivih poverilnic, shranjevanje le zgoščenih identifikatorjev in agregiranih ocen na verigi ter jasno ločitev med on-chain in off-chain logiko.

Kljub temu za uporabo v produkcijskem okolju ostaja odprtih več pomembnih vprašanj: registracija in upravljanje identitet orakljev ter agregatorjev na nivoju pametne pogodbe, varno upravljanje z zasebnimi ključi (shramba, rotacija, odziv ob kompromitaciji), odpornost na napade zavrnitve storitve v DON (redundantni oraklji, več agregatorjev, mehanizmi soglasja) ter dodatne invariante in obsežnejše testiranje pametne pogodbe za preprečevanje nelogičnih stanj. Varnostna analiza tako ne služi le kot opis trenutnega stanja, temveč tudi kot usmeritev, katera področja bi bilo treba prioritetno nadgraditi pri prenosu rešitve v realno, produkcijsko okolje.

4.3 Razprava

Poglavje 5

Zaključek in nadaljnje delo

5.1 Povzetek prispevkov

5.2 Nadaljnje raziskave

Dodatek A

OWL ontologija dobavne verige

Listing A.1: OWL ontologija za model zaupanja v farmacevtski verigi

```
<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns="http://example.org/trust#"
     xml:base="http://example.org/trust"
     xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
     xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax
         -ns#"
     xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"
     xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
     xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
     xmlns:trust="http://example.org/trust#">
  <owl:Ontology rdf:about="http://example.org/trust"/>
  <owl:AnnotationProperty rdf:about="http://example.org
      /trust#trustedPartner"/>
  <owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
      trust#hasAuditScore">
    <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
        #Actor"/>
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#float"/>
```

```
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasDID">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
    #Actor"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
    XMLSchema#string"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasDeliveryDelayRate">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
    #Distributor"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
    XMLSchema#float"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasDeliveryPunctuality">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
    #Transporter"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
    XMLSchema#float"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasGDPVC">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
    #Distributor"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
    #Transporter"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
    XMLSchema#boolean"/>
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasGMP">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #Manufacturer"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#boolean"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasIssuedCertifications">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #RegulatoryAuthority"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#integer"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasJurisdictionLevel">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #RegulatoryAuthority"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#string"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasLicense">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #Actor"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#boolean"/>
</owl:DatatypeProperty>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasPrescriptionComplianceRate">
  <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
```

```
      #Pharmacy" />
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#float" />
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasRecallRate">
    <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #Transporter" />
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#float" />
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasTempDeviationScore">
    <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #Manufacturer" />
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#float" />
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:about="http://example.org/
    trust#hasTempViolationRate">
    <rdfs:domain rdf:resource="http://example.org/trust
      #Transporter" />
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/
      XMLSchema#float" />
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#Actor"
    />
  <owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
    Distributor">
    <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
      trust#Actor" />
```

```
</owl:Class>
<owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
    Manufacturer">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
      trust#Actor"/>
</owl:Class>
<owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
    Pharmacy">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
      trust#Actor"/>
</owl:Class>
<owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
    RegulatoryAuthority">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
      trust#Actor"/>
</owl:Class>
<owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
    Transporter">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
      trust#Actor"/>
</owl:Class>
<owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
    TrustedDistributor">
  <owl:equivalentClass>
    <owl:Class>
      <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Restriction>
          <owl:onProperty rdf:resource="http://
              example.org/trust#hasDeliveryDelayRate"/
              >
          <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
```

```
                www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
            </owl:Restriction>
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://
                  example.org/trust#hasLicense"/>
              <owl:hasValue rdf:datatype="http://www.w3.
                  org/2001/XMLSchema#boolean">true</
                  owl:hasValue>
            </owl:Restriction>
          </owl:intersectionOf>
        </owl:Class>
      </owl:equivalentClass>
      <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
          trust#Distributor"/>
    </owl:Class>
    <owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
        TrustedManufacturer">
      <owl:equivalentClass>
        <owl:Class>
          <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://
                  example.org/trust#hasAuditScore"/>
              <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
                  www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
            </owl:Restriction>
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://
                  example.org/trust#hasGMP"/>
              <owl:hasValue rdf:datatype="http://www.w3.
                  org/2001/XMLSchema#boolean">true</
```

```
                owl:hasValue>
            </owl:Restriction>
          </owl:intersectionOf>
        </owl:Class>
      </owl:equivalentClass>
      <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
          trust#Manufacturer"/>
    </owl:Class>
    <owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
        TrustedPharmacy">
      <owl:equivalentClass>
        <owl:Class>
          <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://
                  example.org/trust#
                  hasPrescriptionComplianceRate"/>
              <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
                  www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
            </owl:Restriction>
            <owl:Restriction>
              <owl:onProperty rdf:resource="http://
                  example.org/trust#hasLicense"/>
              <owl:hasValue rdf:datatype="http://www.w3.
                  org/2001/XMLSchema#boolean">true</
                  owl:hasValue>
            </owl:Restriction>
          </owl:intersectionOf>
        </owl:Class>
      </owl:equivalentClass>
      <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
```

```
        trust#Pharmacy"/>
  </owl:Class>
  <owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
      TrustedRegulatoryAuthority">
    <owl:equivalentClass>
      <owl:Class>
        <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="http://
                example.org/trust#
                hasIssuedCertifications"/>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
                www.w3.org/2001/XMLSchema#integer"/>
          </owl:Restriction>
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="http://
                example.org/trust#hasJurisdictionLevel"/
                >
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
                www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
          </owl:Restriction>
        </owl:intersectionOf>
      </owl:Class>
    </owl:equivalentClass>
    <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
        trust#RegulatoryAuthority"/>
  </owl:Class>
  <owl:Class rdf:about="http://example.org/trust#
      TrustedTransporter">
    <owl:equivalentClass>
      <owl:Class>
```

```
        <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="http://
                example.org/trust#hasDeliveryPunctuality
                "/>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
                www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
          </owl:Restriction>
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="http://
                example.org/trust#hasTempViolationRate"/
                >
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="http://
                www.w3.org/2001/XMLSchema#float"/>
          </owl:Restriction>
        </owl:intersectionOf>
      </owl:Class>
    </owl:equivalentClass>
    <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.org/
        trust#Transporter"/>
  </owl:Class>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#BioPharm">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Manufacturer"/>
    <hasAuditScore rdf:datatype="http://www.w3.org
        /2001/XMLSchema#float">0.9</hasAuditScore>
    <hasDID>did:key:z6MkbioPharm987654321cdefg</hasDID>
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGDPVC>
    <hasGMP rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
```

```
        XMLSchema#boolean">true</hasGMP>
    <hasTempDeviationScore rdf:datatype="http://www.w3.
        org/2001/XMLSchema#float">0.08</
        hasTempDeviationScore>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#CanaryLabs">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Manufacturer"/>
    <hasAuditScore rdf:datatype="http://www.w3.org
        /2001/XMLSchema#float">0.81</hasAuditScore>
    <hasDID>did:key:z6Mkcanarylabs13579bdfhjlnp</hasDID
        >
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">false</hasGDPVC>
    <hasGMP rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGMP>
    <hasTempDeviationScore rdf:datatype="http://www.w3.
        org/2001/XMLSchema#float">0.12</
        hasTempDeviationScore>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#DHL">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Transporter"/>
    <hasDID>
        did:key:z6MkuruPZNP71MGVetJzof487d83iKXJgwK87Z1rDiAD9q6s
        </hasDID>
    <hasDeliveryPunctuality rdf:datatype="http://www.w3
        .org/2001/XMLSchema#decimal">0.94</
        hasDeliveryPunctuality>
```

```
    <hasTempViolationRate rdf:datatype="http://www.w3.
        org/2001/XMLSchema#float">0.02</
        hasTempViolationRate>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#EMA">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        RegulatoryAuthority"/>
    <hasDID>
        did:key:z6Mko5EueZnoZDAJVNMokNDLyPEsrwbrm4xobPjgqtDc6gur
        </hasDID>
    <hasIssuedCertifications rdf:datatype="http://www.
        w3.org/2001/XMLSchema#integer">32</
        hasIssuedCertifications>
    <hasJurisdictionLevel>global</hasJurisdictionLevel>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#EuroLogistics">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Distributor"/>
    <hasDID>
        did:key:z6MkmZ92uLrYfjM96ijWEQgv5FspCVAZwRjNwqw5zULcCxih
        </hasDID>
    <hasDeliveryDelayRate rdf:datatype="http://www.w3.
        org/2001/XMLSchema#float">0.07</
        hasDeliveryDelayRate>
    <hasLicense rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasLicense>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#GreenPharmacy">
```

```
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Pharmacy"/>
    <hasDID>did:key:z6Mkgreenpharm2468acegjlqs</hasDID>
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGDPVC>
    <hasLicense rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasLicense>
    <hasPrescriptionComplianceRate rdf:datatype="http:
        //www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.94</
        hasPrescriptionComplianceRate>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#HealthChain">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Transporter"/>
    <hasDID>did:key:z6Mkhealthchain123456789abc</hasDID
        >
    <hasDeliveryPunctuality rdf:datatype="http://www.w3
        .org/2001/XMLSchema#float">0.97</
        hasDeliveryPunctuality>
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGDPVC>
    <hasRecallRate rdf:datatype="http://www.w3.org
        /2001/XMLSchema#float">0.015</hasRecallRate>
    <hasTempViolationRate rdf:datatype="http://www.w3.
        org/2001/XMLSchema#float">0.03</
        hasTempViolationRate>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#MedLogix">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
```

```
        Distributor"/>
    <hasDID>did:key:z6Mkmedlogix123456789abcde</hasDID>
    <hasDeliveryPunctuality rdf:datatype="http://www.w3
        .org/2001/XMLSchema#float">0.93</
        hasDeliveryPunctuality>
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGDPVC>
    <hasLicense rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasLicense>
    <trustedPartner rdf:resource="http://example.org/
        trust#HealthChain"/>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#MediPlus">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Pharmacy"/>
    <hasDID>
        did:key:z6MknrnXRoJwuj4LWF9rTpvH9WbEdXMbdHPRHdRiP1FraA9k
        </hasDID>
    <hasLicense rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasLicense>
    <hasPrescriptionComplianceRate rdf:datatype="http:
        //www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.93</
        hasPrescriptionComplianceRate>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#Novartis">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Manufacturer"/>
    <hasAuditScore rdf:datatype="http://www.w3.org
        /2001/XMLSchema#float">0.82</hasAuditScore>
```

```
    <hasDID>
        did:key:z6MkqTxBfq3bDT1MHGZdGxyvjt3cJkZJsq1ZD3zyZsAEY77q
        </hasDID>
    <hasGMP rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGMP>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#Pfizer">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Manufacturer"/>
    <hasAuditScore rdf:datatype="http://www.w3.org
        /2001/XMLSchema#float">0.92</hasAuditScore>
    <hasDID>
        did:key:z6MkqYUPZM9zRaA3YxZPh1RJLLDUrrV39Hpa7vLRRkvkxpZM
        </hasDID>
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGDPVC>
    <hasGMP rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">true</hasGMP>
  </owl:NamedIndividual>
  <owl:NamedIndividual rdf:about="http://example.org/
      trust#SkyFreight">
    <rdf:type rdf:resource="http://example.org/trust#
        Transporter"/>
    <hasDID>did:key:z6Mkskyfreight112233445566</hasDID>
    <hasDeliveryPunctuality rdf:datatype="http://www.w3
        .org/2001/XMLSchema#float">0.9</
        hasDeliveryPunctuality>
    <hasGDPVC rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema#boolean">false</hasGDPVC>
    <hasRecallRate rdf:datatype="http://www.w3.org
```

```
        /2001/XMLSchema#float">0.035</hasRecallRate>
    <hasTempViolationRate rdf:datatype="http://www.w3.
        org/2001/XMLSchema#float">0.08</
        hasTempViolationRate>
  </owl:NamedIndividual>
</rdf:RDF>
```

Dodatek B

Izvlečki kode pametnih pogodb

Literatura

[1] S. Holtmanns, Trust modeling and management: From social trust to digital trust, in: Computer Security, Privacy and Politics: Current Issues, Challenges and Solutions, IGI Global, 2008. doi:10.4018/978-1-59904-804-8.ch013.

[2] T. Grandison, M. Sloman, A survey of trust in internet applications, IEEE Communications Surveys & Tutorials 3 (4) (2000) 2–16.

[3] S. D. Boon, J. G. Holmes, The dynamics of interpersonal trust: Resolving uncertainty in the face of risk, Cooperation and Prosocial Behavior (1991) 167–182.

[4] D. Gambetta, Trust: Making and breaking cooperative relations, Basil Blackwell, 1988.

[5] R. C. Mayer, J. H. Davis, F. D. Schoorman, An integrative model of organizational trust, Academy of Management Review 20 (3) (1995) 709–734.

[6] D. E. Denning, A new paradigm for trusted systems, Proceedings of the 1993 New Security Paradigms Workshop (1993) 36–41.

[7] D. H. McKnight, N. L. Chervany, Trust and distrust definitions: One bite at a time, Trust in Cyber-societies 2246 (2001) 27–54.

[8] S. Karthik, R. Shankar, N. Arunkumar, Ontology-based trust model for pervasive computing environments, Journal of Ambient Intel-

ligence and Humanized Computing 8 (2017) 557–568. doi:10.1007/s12652-016-0442-y.

[9] M. Uddin, K. Salah, R. Jayaraman, S. Pesic, S. Ellahham, Blockchain for drug traceability: Architectures and open challenges, Health informatics journal 27 (2) (2021) 14604582211011228.

[10] H. Kayhan, Ensuring trust in pharmaceutical supply chains by data protection by design approach to blockchains, Blockchain in Healthcare Today 5 (2022) 10–30953.

[11] H. Li, M. Singhal, Trust management in distributed systems, Computer 40 (2) (2007) 45–53. doi:10.1109/MC.2007.76.

[12] R. Housley, W. Ford, W. Polk, D. Solo, Rfc2459: Internet x. 509 public key infrastructure certificate and crl profile (1999).

[13] M. Elkins, D. Del Torto, R. Levien, T. Roessler, Mime security with openpgp, Tech. rep. (2001).

[14] S. K. Panda, S. C. Satapathy, Drug traceability and transparency in medical supply chain using blockchain for easing the process and creating trust between stakeholders and consumers, Personal and Ubiquitous Computing 28 (1) (2024) 75–91.

[15] W. H. Organization, et al., A study on the public health and socioeconomic impact of substandard and falsified medical products: executive summary (2017).

[16] Council of European Union, Directive 2011/62/eu of the european parliament and of the council of 8 june 2011 amending directive 2001/83/ec on the community code relating to medicinal products for human use, as regards the prevention of the entry into the legal supply chain of falsified medicinal products text with eea relevance (2011).
URL https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/62/oj/eng

[17] Council of European Union, Commission delegated regulation (eu) 2016/161 of 2 october 2015 supplementing directive 2001/83/ec of the european parliament and of the council by laying down detailed rules for the safety features appearing on the packaging of medicinal products for human use (text with eea relevance) (2015).
URL `https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2016/161/oj/eng`

[18] U.S. Food and Drug Administration, Drug supply chain security act (dscsa) (2017).
URL `https://www.fda.gov/Drugs/DrugSafety/DrugIntegrityandSupplyChainSecurity/DrugSupplyChainSecurityAct/ucm382022.htm`

[19] W. H. Organization, et al., WHO global surveillance and monitoring system for substandard and falsified medical products (2017).

[20] S. Nakamoto, Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system, Available at SSRN 3440802 (2008).

[21] M. Crosby, P. Pattanayak, S. Verma, V. Kalyanaraman, et al., Blockchain technology: Beyond bitcoin, Applied innovation 2 (6-10) (2016) 71.

[22] E. Androulaki, A. Barger, V. Bortnikov, C. Cachin, K. Christidis, A. De Caro, D. Enyeart, C. Ferris, G. Laventman, Y. Manevich, et al., Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains, in: Proceedings of the thirteenth EuroSys conference, 2018, pp. 1–15.

[23] G. Wood, et al., Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger, Ethereum project yellow paper 151 (2014) (2014) 1–32.

[24] G. Caldarelli, Understanding the blockchain oracle problem: A call for action, Information 11 (11) (2020) 509.

[25] G. Caldarelli, Overview of blockchain oracle research, Future Internet 14 (6) (2022) 175.

[26] J. Adler, R. Berryhill, A. Veneris, Z. Poulos, N. Veira, A. Kastania, Astraea: A decentralized blockchain oracle, in: 2018 IEEE international conference on internet of things (IThings) and IEEE green computing and communications (GreenCom) and IEEE cyber, physical and social computing (CPSCom) and IEEE smart data (SmartData), IEEE, 2018, pp. 1145–1152.

[27] P. Kochovski, S. Gec, V. Stankovski, M. Bajec, P. D. Drobintsev, Trust management in a blockchain based fog computing platform with trustless smart oracles, Future Generation Computer Systems 101 (2019) 747–759.

[28] D. Reed, M. Sporny, D. Longley, C. Allen, R. Grant, M. Sabadello, J. Holt, Decentralized identifiers (dids) v1. 0, Draft Community Group Report (2020).

[29] M. Sporny, D. Longley, D. Chadwick, et al., Verifiable credentials data model 2.0, W3C Recommendation (2025).
URL `https://www.w3.org/TR/vc-data-model-2.0/`

[30] C. Mazzocca, A. Acar, S. Uluagac, R. Montanari, P. Bellavista, M. Conti, A survey on decentralized identifiers and verifiable credentials, IEEE Communications Surveys & Tutorials (2025).

[31] O. Lassila, J. Hendler, T. Berners-Lee, The semantic web, Scientific american 284 (5) (2001) 34–43.

[32] R. Cyganiak, P. Reynolds, Rdf 1.1 concepts and abstract syntax, W3C Recommendation, (pridobljeno 10. 11. 2025) (2014).
URL `https://www.w3.org/TR/rdf11-concepts/`

[33] W. W. W. Consortium, et al., Owl 2 web ontology language document overview (2012).

[34] C. Boettiger, rdflib: A high level wrapper around the redland package for common rdf applications (2018). doi:10.5281/zenodo.1098478. URL https://doi.org/10.5281/zenodo.1098478

[35] J. D. Nally, Good manufacturing practices for pharmaceuticals, CRC Press, 2016.