

Primljen / Received: 8.5.2018.

Ispravljen / Corrected: 9.8.2018.

Prihvaćen / Accepted: 25.4.2019.

Dostupno online / Available online: 10.12.2020.

Eksplicitno definiranje postupka asfaltiranja kolnika - temeljni preduvjet za poboljšanje kvalitete

Autori:

¹Doc.dr.sc. **Mauricio Pradena**, dipl.ing.građ.mpradena@udec.cl

Autor za korespondenciju

²Doc.dr.sc. **Seirgei Miller**, dipl.ing.građ.s.r.miller@utwente.nl³Dr.sc. **Guido Staub**, dipl.ing.građ.gstaub@udec.cl⁴Mr.sc. **Marcos Díaz**, dipl.ing.građ.mdiaz@utem.cl³**Francisco Contreras**, dipl.ing.građ.franciscontrera@udec.cl¹Sveučilište Concepción, Čile, Odjel za građevinarstvo²Sveučilište u Twente-u, Nizozemska

Fakultet za organizaciju građenja & inženjerstvo

³Sveučilište Concepción, Čile

Odjel za geodetske i geodetske znanosti

⁴Tehnološko Sveučilište Metropolitana, Čile

Odjel za građevinske znanosti

Stručni rad

Mauricio Pradena, Seirgei Miller, Guido Staub, Marcos Díaz, Francisco Contreras

Eksplicitno definiranje postupka asfaltiranja kolnika - temeljni preduvjet za poboljšanje kvalitete

Cilj ovog rada je jasno definiranje postupka asfaltiranja kolnika i uz njega vezane podatke o temperaturi i zbijenosti asfalta te logističkog procesa, budući da je to temeljni preduvjet za postizanje poboljšanja. U tu svrhu, prikupljeni su podatci o temperaturi asfalta, putanjama kretanja valjaka, zbijenosti asfalta, brzini kretanja finišera te o logističkoj podršci kamionima koji dopremaju asfalt. Rezultati, analize i dobivene povratne informacije upućuju na postojanje konkretnih mogućnosti za poboljšanje, koje uključuju izbjegavanje zaustavljanja finišera tijekom asfaltiranja, ujednačeno zbijanje cijele površine kolnika te izrada strategije za kretanja valjaka.

Ključne riječi:

asfaltni kolnik, kvaliteta asfalta, temperatura asfaltne mješavine, brzina kretanja finišera, valjci za zbijanje asfalta

Professional paper

Mauricio Pradena, Seirgei Miller, Guido Staub, Marcos Díaz, Francisco Contreras

Making the asphalt paving process explicit - A fundamental step for quality improvement

The objective of the paper is to make explicit the paving operations, the related asphalt temperature and density data, and the logistic process, as a fundamental step to identify improvement opportunities. For that, temperature data, roller compactor trajectories, asphalt density, paver speed, and trucks logistics, were collected. The results, analysis, and feedback received, point to specific opportunities for improvement, including avoiding the paver start-stop cycles, uniform compaction of the entire pavement surface, and definition of roller compaction strategy.

Key words:

asphalt pavement, asphalt quality, asphalt mix temperature, paver speed, roller compactors

Fachbericht

Mauricio Pradena, Seirgei Miller, Guido Staub, Marcos Díaz, Francisco Contreras

Explizite Definition des Fahrbahn-Asphaltierungsverfahrens - Grundvoraussetzung für die Qualitätsverbesserung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Prozess der Asphaltierung der Fahrbahn und die damit verbundenen Daten zur Temperatur und Verdichtung von Asphalt sowie zum Logistikprozess klar zu definieren, da dies eine grundlegende Voraussetzung für die Erzielung von Verbesserungen ist. Zu diesem Zweck wurden Daten über die Temperatur des Asphalts, die Bewegungsbahn der Walzen, die Verdichtung des Asphalts, die Geschwindigkeit des Fertigers und die logistische Unterstützung durch die den Asphalt liefernden Lastwagen gesammelt. Die Ergebnisse, Analysen und die erhaltenen Rückmeldungen zeigen, dass konkrete Verbesserungsmöglichkeiten bestehen, darunter das Vermeiden des Anhaltens des Fertigers während des Asphaltierens, die gleichmäßige Verdichtung der gesamten Fahrbahnoberfläche und die Entwicklung einer Strategie für Walzenbewegungen.

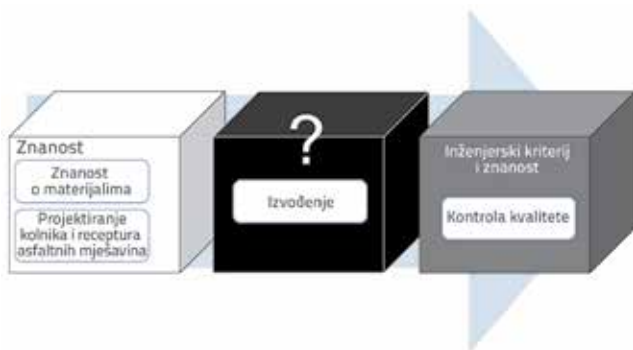
Schlüsselwörter:

Asphaltfahrbahn, Asphaltqualität, Asphaltmischtemperatur, Fertiger-Fahrgeschwindigkeit, Asphaltverdichterwalzen

1. Uvod

1.1. Znanstvene spoznaje o asfaltnim kolnicima

Povijesno gledajući, postupak izgradnje asfaltnih kolnika zasnivao se na tradiciji, umijeću i nizu različitih implicitnih metoda temeljenih na iskustvu, koje su se primjenjivale u graditeljskoj djelatnosti. Kod takvog modela mnoge aktivnosti izgradnje ostaju unutar svojevrzne "crne kutije" (slika 1.), što nije slučaj kad se u projektiranju kolničkih konstrukcija ili asfaltnih mješavina primjenjuje znanstveni pristup. Zapravo, ako se osvrnemo na znanstvene radove objavljene posljednjih desetljeća, možemo primijetiti da broj znanstvenih radova o materijalima i asfaltnim mješavinama značajno nadilazi broj radova koji se odnose na izgradnju asfaltnih kolnika. Ipak, s obzirom na to da ceste općenito, a posebice izgradnja onih s asfaltnim kolnikom, predstavljaju velik trošak za zajednicu, nameće se potreba za sveobuhvatnim znanstvenim pristupom.



Slika 1. Primjena znanosti u različitim fazama izgradnje asfaltnog kolnika

Situaciju dodatno otežavaju zakonski okviri usvojeni u nekoliko država, koji istraživačima onemogućuju pristup stvarnim građevinskim projektima. Međutim, unatoč tim preprekama, u protekla tri desetljeća napravljeno je nekoliko studija o asfaltnim kolnicima, i to dijelom kao odgovor na razvoj novih tehnologija, kao što su infracrvena termografija i globalni položajni sustavi (GPS). U tim studijama težište se stavlja na dva ključna faktora: promjenu temperature asfaltne mješavine tijekom ugradnje i neujednačenost postupka zbijanja.

1.2. Promjena temperature asfaltne mješavine tijekom izgradnje kolnika

Read [1] je upozorio na problem s promjenom temperature koristeći se infracrvenom termografijom. Otad je napravljeno nekoliko studija koje su pokazale raspon temperature tijekom pojedinih faza izgradnje kolnika, kao i utjecaj promjene temperature na svojstva asfaltnih slojeva u pogledu zbijenosti, pojave šupljina i drugih svojstava [2-5]. Prethodne studije o utjecaju hlađenja asfaltnih mješavina tijekom zbijanja [6] naglašavaju potrebu za provođenjem zbijanja u okviru "idealnog

raspona mogućnosti", tj. u okviru odgovarajućeg temperaturnog raspona pri kojem se željeni stupanj zbijenosti može postići jednostavno i s manjim brojem prelazaka valjcima. Kako bi pružili podršku izvođačima radova tijekom postupka zbijanja, istraživači su isprva razvili ručne i tablične izračune koji su se oslanjali na toplinsku vodljivost i prijenos topline kroz asfaltno slojeve kako je to opisano u [7], s ciljem predviđanja hlađenja asfaltnog sloja tijekom zbijanja. Prve računalne programe (PaveCool, CalCool i MultiCool) za predviđanje promjene temperature asfalta tijekom ugradnje osmislili su autori u radovima [8, 9].

1.3. Varijabilnost postupka zbijanja asfaltnih slojeva kolničke konstrukcije

Prijašnja istraživanja usmjerena na određivanje varijabilnosti postupaka zbijanja uglavnom su se provodila bez primjene novih tehnologija [10-12]. Ta su istraživanja pokazala kako zbijanje nije ujednačeno po cijeloj površini kolnika, što upućuje na kompleksnost postupka zbijanja. Kako bi pomogli izvođačima, umanjili kompleksnost samog zbijanja te razradili metodološki orijentiranije strategije zbijanja, nekolicina istraživača analizirala je mogućnost primjene GPS-a u svrhu automatizacije postupka zbijanja [13-19]. U svojim su radovima naglašavali važnost prikladne upotrebe GPS tehnologije za praćenje i vođenje postupka zbijanja, a tada je razvijeno i nekoliko prototipova GPS-a. U kasnijim istraživanjima više se usmjeravalo na razvoj integriranih rješenja koja se nisu ograničavala isključivo na postupak zbijanja, tj. pokušavao se pratiti cjelokupan postupak izvođenja asfaltnih radova [20, 21]. Prvi prototipovi bazirani na GPS-u s vremenom su prerasli u "inteligentne" aplikacije, koje strojarima koji upravljaju valjcima pomažu u obavljanju njihovih zadataka [22-26]. U današnje vrijeme uobičajena je praksa da proizvođači strojeva ugrađuju GPS rješenja u valjke, a također ih opremaju i s nizom senzora za mjerenje površinske temperature asfalta te drugih parametara koji su važni za provedbu postupka zbijanja.

2. Prepreke za usvajanje nove tehnologije

Bez obzira na dostupnost mnogih tehnologija baziranih na GPS sustavu i posebno prilagođene infracrvene termografije, još uvijek se može reći da proces usvajanja tehnologija u sferi izvedbe asfaltnih kolničkih konstrukcija teče nedovoljno brzo. Ta je konstatacija u skladu s rezultatima istraživanja koja pokazuju da se, općenito gledajući, nove tehnologije prilično sporo usvajaju u području građevinarstva [27-29]. Postoji nekoliko argumenata koji idu u prilog toj tezi. Prema nekim autorima, tehnologija ne udovoljava specifičnim zahtjevima građevinske industrije, a i suviše je složena za građevinske radnike koji su uglavnom niskokvalificirani. Na usvajanje naprednih tehnoloških procesa može nepovoljno utjecati i skeptičan stav te otpor strojarima građevinske mehanizacije koji smatraju da se time podcjenjuje njihova stručnost ili da bi uprava mogla primijeniti

tehnologiju za praćenje njihova kretanja te za eventualno sankcioniranje propusta [30]. Bez obzira na probleme koji se susreću u usvajanju novih tehnoloških rješenja, izgleda da proizvođači strojeva i dalje razvijaju nove tehnologije te svoje strojeve opremaju novim sofisticiranim senzorima. Ako se takav trend nastavi, jaz između razvoja tehnologija i kvalificiranosti građevinskih radnika mogao bi se još više produbiti. Kako bi se to spriječilo, veća se pažnja treba posvetiti "ljudskom faktoru". To znači da se u radne postupke i procese asfalterskih grupa svakako treba integrirati tehnologija i, što je još značajnije, kvalitativni i kvantitativni podaci koji se dobivaju pomoću te tehnologije.

2.1. Pristup istraživačke skupine ASPARI

Dok se u prethodno navedenim studijama naglasak stavlja na promjenu temperature ili na problem varijabilnosti postupku zbijanja, znanstvenici iz istraživačke skupine ASPARI (istraživanja i inovacije u području asfaltnih kolnika) koja djeluje pri Sveučilištu u Twenteu u Nizozemskoj usvojili su holistički pristup problemu varijabilnosti pri izgradnji asfaltnih kolnika proučavajući cjeloukupni postupak ugradnje asfalta koji uključuje i antropološki faktor, tj. rad s asfalterskim grupama i njihovim voditeljima.

Treba napomenuti da su promjene u industriji i suradnja s istraživačima zapravo nametnute građevinskoj industriji kao odgovor na slijed događaja koji počinje potkraj devedesetih godina prošlog stoljeća s otkrivanjem velikih prijevara i tajnih dogovora u području građevinarstva [31, 32]. Veliki investitori iz javnog sektora reagirali su na takve nedopuštene radnje mijenjanjem ugovornih odredbi. Naime, jamstva su razdoblja od godine dana produžavana na tri do sedam i deset godina za standardne ugovore, a uveden je i nekoliko tipova integriranih (netradicionalnih) ugovora prema kojima rizike zajednički snose izvođači i javni investitori [33, 34]. Od izvođača se također traži da preuzmu odgovornost za recepture svojih asfaltnih mješavina. Kombinacija promijenjene dinamike tržišta i saznanja da je malo toga poznato o postupku ugradnje asfalta sa znanstvenog gledišta, dovela je do situacije u kojoj je postalo jasno da se hitno trebaju poboljšati primarni postupci izvođača kako bi se osigurala trajnost ugrađenih asfaltnih slojeve unutar zadanih jamstvenih rokova. Istraživači su odgovorili razvijanjem aktivne metodologije koja uključuje suradnju s asfalterskim grupama i njihovim voditeljima u svrhu poboljšanja njihovih primarnih procesa [35]. Takav tzv. antropološki pristup, u sprezi s iterativnim spoznajnim ciklusima učenja [36, 37], omogućio je istraživačima suradnju s asfalterskim grupama i to na razini konkretnih gradilišta. Istraživači su razvili metodologiju poboljšanja kvalitete postupaka (PQi) kako bi operativne radnje postale jasno razumljive, a u tu su svrhu primijenili standardizirane nove tehnologije kao što su GPS, infracrvene kamere, lasere i ostale senzore. Ti se senzori koriste za oblikovanje odgovarajućih vizualnih prikaza koje korisnici mogu razumjeti i logički

protumačiti. Kao što je ranije spomenuto, metodologija PQi uključuje elemente dobivanja povratnih informacija i smislenog učenja, pa tako svi članovi tima građevinskih radnika analiziraju svoj rad na temelju činjeničnih podataka i vizualnih prikaza. Korisnici time uočavaju mogućnosti poboljšanja postupka i donose odluke zajedno sa svojim voditeljima o konkretnim poboljšanjima koja bi se trebala usvojiti. To je svakako odmak od hijerarhijskog pristupa "od vrha prema dnu" koji se tradicionalno primjenjuje u građevinskoj industriji. Zanimljivo je da se podaci dobiveni ovakvom analizom uopće ne koriste za sankcioniranje građevinskih radnika. Podaci ustvari služe kao sredstvo pomoću kojeg se ostvaruje poboljšanje u malim, sustavnim i održivim koracima. Investitori iz javnog sektora također ne koriste tako dobivene podatke za moguće sankcioniranje izvođača.

Ovaj obrnuti pristup "od dna prema vrhu" doveo je do vrlo zanimljivih spoznaja. Kao prvo, znanstveni pristup razjašnjava operativni postupak primjenom novih tehnologija i senzora te odgovarajućih vizualizacija omogućio je provedbu diskusije s asfalterskim grupama o održivim načinima za poboljšanje postupaka, jer su oni u neposrednom kontaktu s tim procesom i odgovorni su za konačnu kvalitetu kolnika [38]. Čini se da su pristup baziran na operativnoj strategije i petlje povratnih informacija implementirane u metodologiju PQi, doveli do poboljšanja postupka te omogućili njegovo provedbu na održiviji način [39]. Također bi se moglo zaključiti da istraživači, asfalterske grupe, laboratorijsko osoblje i voditelji mogu, u okviru spomenutog postupka, bolje spoznati svu složenost postupka asfaltiranja i njemu svojstvene varijabilnosti. Dakle, primjenom antropološkog pristupa [35], tj. eksplicitnim uključivanjem "ljudskog faktora" u samo istraživanje (razumijevanje izazova i načina učenja asfalterskih grupa), istraživačka skupina ASPARI uspjela je prevladati povijesni otpor građevinske industrije prema usvajanju inovacija i novih tehnologija.

Iako je poboljšanje kvalitete asfaltnih kolnika izazov koji je općenito prisutan, važno je napomenuti da se nizozemsko iskustvo ipak ne može izravno primijeniti na druge projekte, i to zbog razlika u kontekstu. To se između ostalog odnosi na razlike u ugovorima, razinama pristupa novim tehnologijama i iskustvima u primjeni tih tehnologija, zatim na razlike u strukturama upravljanja i, što je zapravo najvažnije, na razlike u radnim postupcima i pristupima obavljanju graditeljskih zadataka te u načinu primjene tehnologije.

Može se zapravo reći da Nizozemska posjeduje povoljne uvjete zato što ima prikladno integrirane sustave ugovaranja te pristup financijski prihvatljivim standardnim tehnologijama, a i zato što su građevinski radnici svakodnevnim sudionici u tehnološki naprednom sustavu (npr. kroz korištenje sofisticiranog sustava javnog prijevoza). Stoga je umjesto izravne primjene metodologije PQi potrebna prilagodba te metodologije specifičnim uvjetima rada, a to se provodi u malim, sustavnim i održivim fazama usmjerenima prema poboljšanju procesa.

2.2. Primjena u Čileu

Cilj je ovog rada definirati postupak izrade asfaltnog kolnika na jasan i nedvosmislen način, što predstavlja osnovni korak prema određivanju mogućnosti poboljšanja kvalitete u čileanskim uvjetima. Za te su potrebe osnove metodologije PQi primijenjene na pilot-projekt u Čileu, gdje je ta metodologija prilagođena uvjetima koji se razlikuju od onih u Nizozemskoj. Kao što smo već nagovijestili, za uvjete u Čileu, tj. za čileanski kontekst, karakteristična je mala mogućnost pristupa financijski prihvatljivim tehnologijama te razni ljudski faktori koji proizlaze iz činjenice da su građevinski radnici manje izloženi naprednoj tehnologiji u svakodnevnom životu [40].

Osim toga, otprilike 60 % čileanske izvangradske cestovne mreže nema asfaltni kolnik [41]. U takvoj situaciji ipak prevladava tradicionalni sustav ugovaranja, i to unatoč činjenici što se primjenjuju različiti oblici ugovora za gradnju kolnika. Iako se primjenjuju koncesijski ugovori, ugovori o razini pružanja usluga (koji su uglavnom usmjereni na održavanje cesta), ugovori tipa DBOT (eng. *Design, Build, Operate, and Transfer*) tj. ugovori o projektiranju, građenju, upravljanju i prijenosu i tipa BOT (eng. *Build, Operate, and Transfer*) tj. ugovori o građenju, upravljanju i prijenosu, još se uvijek u čileanskoj praksi gradnje asfaltnih kolnika najviše koristi tip ugovora u kojem izvođači obavljaju građevinske radove iskazane tehničkim specifikacijama. U takvom tipu tradicionalnih ugovora primjenjuje se sustav osiguranja kvalitete s javnim i privatnim tijelima, pri čemu odgovornost za ukupnu kvalitetu izvedene kolničke konstrukcije preuzima Državni laboratorij za autoceste (NHL). Osim toga, za svaki se ugovor imenuje javno nadzorno tijelo kojem pomaže privatna tvrtka te Područni laboratorij za autoceste (RHL).

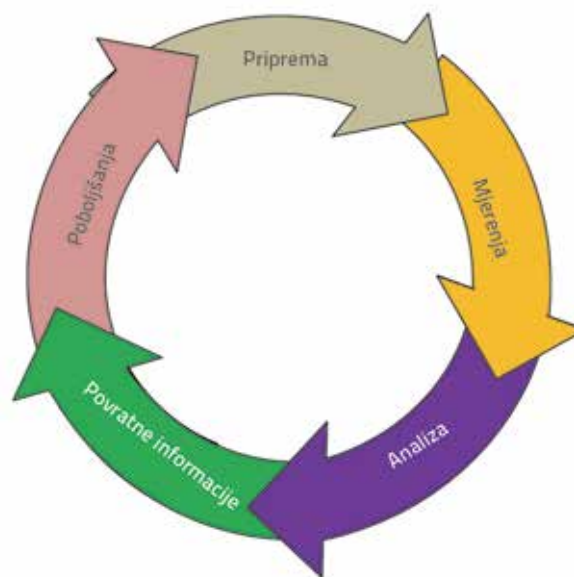
U svojstvu subjekta odgovornog za kvalitetu kolnika izvedenih u Čileu, NHL pruža podršku raznim istraživačkim i inovacijskim projektima i inicijativama kako bi se u što većoj mjeri poboljšala kvaliteta kolničkih konstrukcija u Čileu. NHL također sudjeluje u istraživanju koje se opisuje u ovom radu.

Iako ovdje prikazano istraživanje još uvijek traje, prva faza opisana u ovom radu odnosi se na pilot-projekt "Obnova ceste F-50 Lo Orozco – Quilpue, 3. faza" koji se nalazi u pokrajini Valparaíso. Radi se o tradicionalnom ugovoru, a gradilište je udaljeno 80 km od glavnoga grada Santiaga. Treća faza projekta obuhvaća izgradnju 12 km kolnika s tri asfaltna sloja (nosivi sloj, vezni sloj i habajući sloj) koji se polažu na mehanički zbijeni nosivi sloj.

3. Metodologija

U ovom je istraživanju primijenjena metodologija PQi prilagođena uvjetima koji prevladavaju u Čileu (slika 2.). Ukratko se opisuju sve faze nabrojanih postupaka na slici 2.

Prva faza: *priprema i definicija* – pregled projekta gradilišta, snimanje postojećeg stanja i održavanje pripremnog sastanka s asfaltnom grupom. Na slici 3. prikazan je sastanak s asfaltnom grupom koji se održao 24. travnja 2017. godine, tj. dan prije samih mjerenja. Prethodno su održani koordinacijski sastanci između istraživačkog tima (sastavljenog od autora ovog rada) i osoblja NHL-a, kojeg je predstavljao inženjerski tim sastavljen od Rodriga Uribea, direktora NHL-a za područje asfaltnih kolnika, i Gabriele Muñoz.



Slika 2. Ciklus postupaka za poboljšanje kvalitete, PQi [42]

Druga faza: *prikupljanje podataka* – temperaturni profili, praćenje kretanja svih strojeva koji sudjeluju u asfaltiranju, praćenje vremenskih uvjeta, profiliranje nuklearnim densimetrom te bilježenje svih ostalih važnijih pojava. Prikupljanje podataka o temperaturi, geodetskih podataka i podataka o gustoći prikazano je na slici 4.

Mjerenja su obavljena u dva dana, tj. 25. i 26. travnja 2017. godine. Prvog dana je monitoring proveden na dionici površinskog asfaltnog sloja dužine 290 m, a drugog dana na dionici površinskog asfaltnog sloja dužine 150 m.

Treća faza: *analiza podataka* – analiza svih podataka te pripremanje vizualizacija i animacija.



Slika 3. Sastanak s asfaltnom grupom (lijevo) i instaliranje GPS-a (desno)



Slika 4. Prikupljanje podataka o temperaturi i gustoći (lijevo i u sredini) te prikupljanje geodetskih podataka (desno)

Četvrta faza: *prikupljanje povratnih informacija* – diskusija o svim rezultatima, vizualni prikazi i animacije tijekom sastanka s timom HMA i ostalim osobama koje su izravno sudjelovale u projektu.

Peta faza: *predlaganje poboljšanja* – definiranje poboljšanja radnih metoda i budućih projekata.

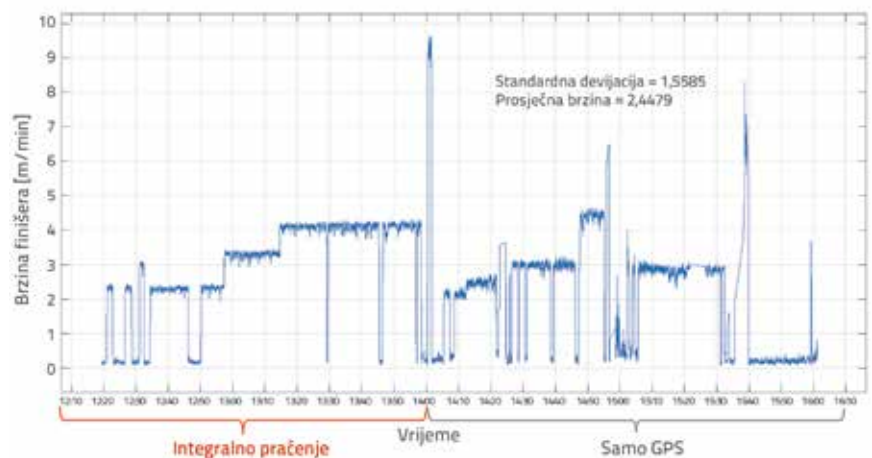
4. Rezultati i analize

4.1. Logistička podrška za dopremu asfalta

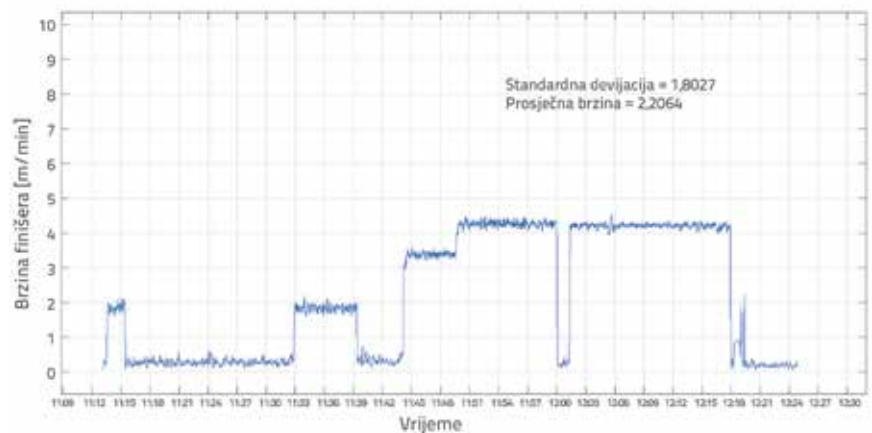
Bilježena su vremena odlaska i dolaska kamiona te je utvrđeno da je koordinacija bila dobra.

4.2. Brzina kretanja finišera

Rezultati dobiveni tijekom dvodnevnog ispitivanja brzine kretanja finišera prikazani su na slikama 5. i 6. Drugoga je dana čitav istraživački tim proveo integralna mjerenja tijekom asfaltiranja 150 m kolnika. Prvog dana istraživački je tim proveo integralna mjerenja na prvih 290 m kolnika. Kao što se vidi na slici 5., na zadnjih 110 m provedena su samo GPS mjerenja. Na obje slike može se uočiti sporo kretanje na samom početku i to zbog zagrijavanja



Slika 5. Brzina kretanja finišera – izmjereno GPS-om, prvi dan mjerenja

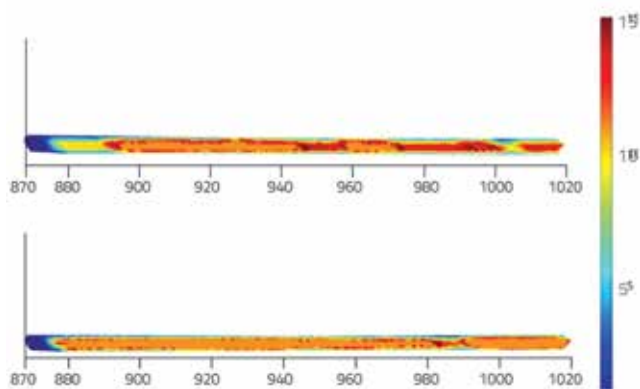


Slika 6. Brzina kretanja finišera – izmjereno GPS-om, drugi dan mjerenja

gredne ravnalice finišera. Prvog dana sporo kretanje uključivalo je i ciklus zaustavljanja finišera otprilike 15 m što može uzrokovati pojavu diskontinuiteta u kolniku. Drugoga dana taj je ciklus iznosio otprilike 20 m, ali su uočene manje promjene u usporedbi s prvim danom. Na slikama 5. i 6. jasno se vidi da je brzina finišera bitno varirala tijekom prvog dana mjerenja. Drugog dana mjerenja varijabilnost nije bila izražena u tolikoj mjeri, ali ta pojava u svakom slučaju može prouzročiti neodgovarajuću kvalitetu kolnika. Kako bi se izbjegla pojava diskontinuiteta, potrebno je zagrijati ravnalicu finišera prije početka samog asfaltiranja.

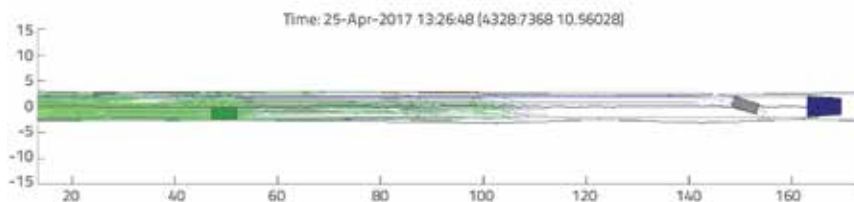
4.3. Prikaz kontura zbijanja (CCP)

Primjer strategija zbijanja koje su primijenjene drugog dana mjerenja, tj. za vrijeme ugradnje nosivog sloja asfaltnog kolnika u dužini od 150 m, prikazan je na slici 7. Na gornjem dijelu slike 7. vidi se broj prelazaka valjka s glatkim čeličnim cilindrima. U donjem dijelu iste slike vidi se broj prelazaka jednog od valjaka s pneumaticima. Zapravo, zbijanje je provedeno pomoću tri valjka s pneumaticima, ali je na ovom pilot-projektu monitoring proveden za samo jednog od njih. Pritom su uočeni zanimljivi trendovi. Iako CCP (eng. *Compaction contour plots* - CCP) prikazi za oba valjka koji se vide na slici 7. upućuju na općenito ujednačeno ponašanje tj. ujednačen rad valjaka, ipak se mogu uočiti određene mogućnosti za smanjenje odstupanja. Maksimalni broj prelazaka iznosio je 14 za oba valjka. Kod valjka s glatkim čeličnim cilindrima, prosječni broj prelazaka iznosio je 9,8 uz standardnu devijaciju od 3,3. Prosječan broj prelazaka valjkom s pneumaticima iznosio je 10,3 uz standardnu devijaciju od 2,3.



Slika 7. Prikaz kontura zbijanja (CCP) za valjak s glatkim čeličnim cilindrima (gornji dio slike) i valjak s pneumaticima (donji dio slike)

Oba CCP prikaza na više načina pokazuju neujednačenost zbijanja. Izgleda da su se strojari s valjcima više kretali po sredini ceste jer je u tom dijelu zabilježen veći broj prelazaka nego na



Slika 8. 2D Animacija za prvi dan mjerenja

rubovima kolnika. Prilikom ugradnje asfalta posebnu pozornost treba obratiti na zbijanje rubova kako tijekom upotrebe, zbog blizine tragova kotača, ne bi došlo do prijevremenog oštećenja kolnika. Na raznim dijelovima analizirane dionice, za oba je valjka zabilježen manji broj prelazaka na rubovima kolnika, a to su zapravo zone u kojima je zbijanje teže provesti. Međutim, CCP prikazi pokazuju nam da postoje tehničke mogućnosti za provedbu poboljšanja. Ustvari, uočene su i zone s većim brojem prelazaka na rubu nego u sredini kolnika. Na CCP prikazu za valjak s glatkim čeličnim cilindrima, to je uočeno na otprilike 960 m na vanjskom rubu te na otprilike 900 m na unutarnjem rubu. S druge strane, CCP prikaz za valjak s pneumaticima pokazuje veći broj prelazaka u prvih 20 m zbijanja te između 920 i 940 m. U oba slučaja to je zabilježeno na unutarnjem rubu prometnog traka.

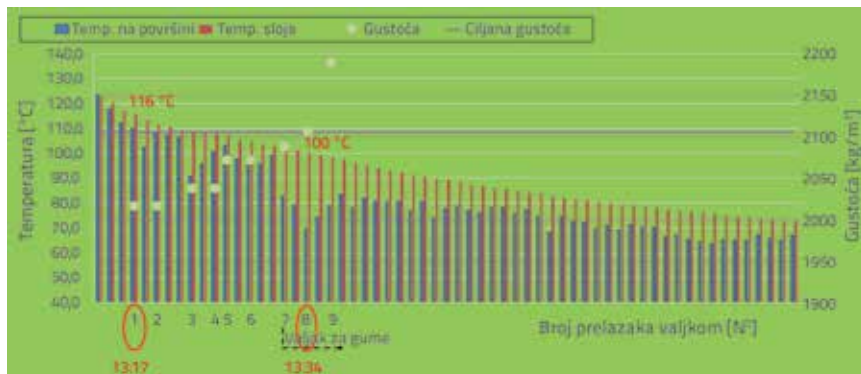
Zbijanje je provedeno u smjeru suprotnom od smjera stacionaže, a očito je da je broj prelazaka kod oba valjka bitno manji na zadnjih 8 m analizirane dionice. Štoviše, kod valjka s glatkim čeličnim cilindrima zabilježeno je smanjenje broja prelazaka 25 m prije kraja dionice. Sva ta odstupanja mogu uočiti i uspješno rješavati sami strojari.

Trendovi uočeni pomoću CCP prikaza potvrđeni su dvodimenzionalnim animacijama koje pokazuju kretanje valjaka, a razvijene su na temelju podataka prikupljenih u sklopu ovog projekta. Slika 8 prikazuje trenutak animacije definirane za prvi dan mjerenja, kada se zbijanje provodilo u smjeru stacionaže.

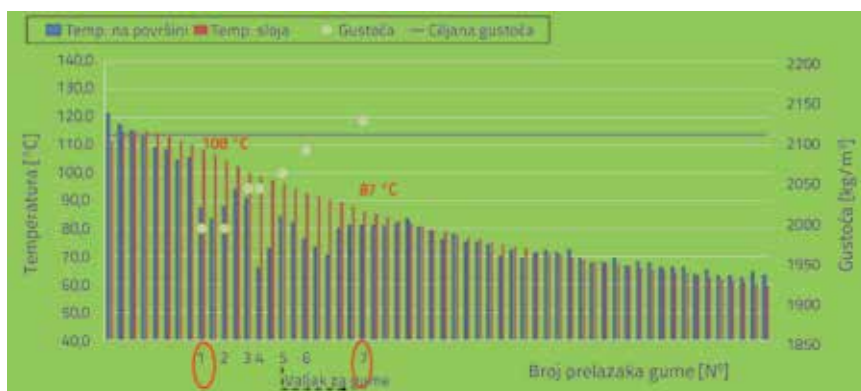
Isti obrazac kretanja zabilježen je kod animacija izvedenih za oba dana mjerenja. Strojari počinju zbijanje na kratkim dionicama (otprilike od 40 do 50 m) i nakon toga povećavaju dionice (otprilike od 80 m) usporedo s povećanjem brzine kretanja finišera. Na animaciji se jasno vidi obrazac zbijanja asfalta za valjak s glatkim čeličnim cilindrima.

4.4. Temperatura asfalta, gustoća određena nuklearnim densimetrom i broj prelazaka valjka

Na terenu su odabrane točke duž kolnika kako bi se omogućilo mjerenje brzine hlađenja asfalta (temperatura na površini i u samom sloju), stupanj zbijenosti te broja prelazaka valjcima. Ta su mjerenja provedena kako bi se vidjelo u kakvom su odnosu. Na slikama 9. i 10. prikazani su primjeri točaka koje su korištene za mjerenje tijekom ta dva dana ispitivanja. U oba je slučaja traženi stupanj zbijenosti (97 % prema Marshallu) postignut vrlo brzo, i to nakon najviše osam prelazaka valjka. Međutim, drugog dana je traženi stupanj zbijenosti postignut pri temperaturi asfaltne



Slika 9. Temperatura asfalta (na površini i sloja), gustoća i broj prelazaka valjcima na km 1520 tijekom prvog dana mjerenja (25. travnja 2017.)



Slika 10. Temperatura asfalta (na površini i sloja), gustoća i broj prelazaka valjcima na km 980 tijekom drugoga dana mjerenja (26. travnja 2017.)

mješavine od 87 °C. To je blizu donje temperaturne granice pri kojoj bi moglo doći do pojave mikropukotina u asfaltnom sloju ako bi se nastavilo sa zbijanjem. Provediva i jednostavna mjera koja se može poduzeti u takvom slučaju podrazumijeva ranije započinjanje s postupkom zbijanja dok je temperatura asfaltna mješavine u željenom rasponu.

I konačno, kao što se moglo očekivati, može se uočiti i razlika između temperature na površini i u samom asfaltnom sloju. Važno je odrediti odnos između tih dviju temperatura, uzimajući u obzir praktičnost mjerenja površinske temperature te činjenicu da bi na tu temperaturu mogli utjecati okolni vremenski uvjeti. Međutim, kako bi se odredili ti odnosi, trebaju se provesti opsežnija mjerenja temperature, jer tu postoji mnogo varijabli.

4.5. Radionica nakon ispitivanja

Eksplicitno uključivanje "ljudskog faktora" (koji je spomenut u poglavlju 1) značajan je element za prevladavanje povijesnog otpora građevinske industrije prema inovacijama i uvođenju novih tehnologija. Stoga se organizacija radnog sastanka s čileanskom asfaltnom skupinom, rasprava između sudionika



Slika 11. Sastanak s asfaltnim timom održan na gradilištu nakon ispitivanja

i prenošenjem povratnih informacija, smatra osnovnim dijelom ovog istraživanja. S obzirom na čileanske okolnosti, a naročito uzimajući u obzir činjenicu da je pilot-projekt proveden u okviru tradicionalnog ugovora, sastanku su nazočili članovi građevinske tvrtke, NHL, javno nadzorno tijelo, privatna tvrtka koja mu je pružala podršku i RHL. Tijekom sastanka naglašeno je da se rezultati mjerenja ne objavljuju u svrhu penalizacije bilo kojeg sudionika.

Tijekom sastanka održanog nakon ispitivanja, članovima asfaltna grupe prezentirane su vizualizacije i animacije (poput onih prikazanih na slikama od 5. do 10.) na njima prihvatljiv način, tako da ih mogu razumjeti i protumačiti. Prvi put ti iskusni članovi asfaltna grupe imali priliku razmotriti radnu strategiju koju sami provode na terenu i rezultate te strategije, i to na nedvosmislen, objektivni i nepristran način. Nakon što su se slegli prvi dojmovi (i tišine koja je uslijedila), oni su polako počeli komentirati svoj način rada, tj. počeli su aktivno sudjelovati i odgovarati na pitanja istraživačkog tima te iskazivati svoja mišljenja o informacijama koje su bile prikazane na vizualizacijama

i animacijama. U tom kontekstu, članovi asfaltna grupe objasnili su razloge zaustavljanja finišera (potpoglavlje 4.2), a vrlo su se iznenadili kada su saznali za niske temperature asfaltnog sloja u trenutku postizanja ciljnog stupnja zbijenosti (potpoglavlje 4.3). Upoznati su i s razlikama između temperatura u asfaltnom sloju i na površini. Najveći odziv uočen je kada su pomoću vizualizacija i animacija prikazane strategije zbijanja (slike 7. i 8.). Voditelj tima brzo je reagirao kad je uočio (nakon što je vidio rezultate) da se treba usvojiti jednoznačna strategija zbijanja asfalta. Odmah je počeo o tome razgovarati s članovima svog tima te su počeli razmatrati način provedbe te strategije na terenu. Kako bi se to konkretiziralo, voditelj gradilišta zatražio je od istraživačkog tima prikazane vizualizacije i animacije.

I, na kraju, mogućnosti poboljšanja spomenute u potpoglavlju 4.1 i 4.4 proizišle su iz interaktivne prirode ove radionice, tj. učenje je bilo rezultat interakcije između sudionika [39]. Važno je naglasiti da se postupak asfaltiranja trebao jasno definirati, što je bilo preduvjet za određivanje mogućnosti poboljšanja, a one su se mogle ostvariti samo mjerenjem, primjenom korisne tehnologije, prikupljanjem konkretnih podataka te obradom i prezentiranjem tih podataka asfalterskoj ekipi na značajan i koristan način, kako je to i prikazano u ovom poglavlju. Dakle, znanost i tehnologija primijenjene su na razini tima, čime su proširena iskustvena saznanja članova asfaltnog tima.

To je od osnovnog značenja jer omogućuje prijelaz implicitnog znanja u eksplicitno znanje. Prema teoriji o učenju kroz jednu petlju i kroz dvije petlje [43], razina učenja kroz jednu petlju podiže se na razinu učenja kroz dvije petlje kada se strategije mijenjaju, i to na način da se u slučaju nastanka slične situacije razmatra korištenje nove strategije građenja [39]. To je u suprotnosti s učenjem kroz jednu petlju, gdje se korisnik tog koncepta i dalje oslanja na postojeće strategije, čak i u slučajevima kada dolazi do učestalih pogrešaka. Ako se ne usvoje operativni postupci i ključni parametri procesa građenja koji su po svojoj prirodi eksplicitni, teško da se može napraviti pomak s koncepta učenja kroz jednu petlju na učenje kroz dvije petlje [39].

Osim toga, refleksivna praksa, poput radionice u okviru koje se dobivaju povratne informacije, omogućuje pomak prema naprijed u Kolbovom modelu iskustvenog učenja [37] koji je prikazan na slici 12. U stvari, tipične faze tog modela prisutne u tradicionalnom postupku građenja ograničene su na "konkretno iskustvo" i "aktivno eksperimentiranje". Međutim, kada se uključi praćenje procesa i refleksivna praksa, kao što je radionica s prenošenjem povratnih informacija, tada se u ciklus iskustvenog učenja mogu dodati faze "refleksivnog promatranja" i "apstraktna konceptualizacija" [37]. Kroz taj proces asfalterska ekipa je usvajala mogućnost poboljšanja kvalitete svojega rada te je počela uočavati da je nova tehnologija korisno sredstvo. Primjenom takvog pristupa moguće je provođenje strukturiranih i sustavnih koraka učenja baziranih na eksplicitnim podacima, pa se tako prevladava povijesni otpor građevinske industrije prema inovacijama i usvajanju novih tehnologija [39].



Slika 12. Kolbov ciklus iskustvenog učenja [37]

U prostorijama NHL-a organizirana je još jedna radionica za veću delegaciju NHL-ovog osoblja koje se bavi osiguranjem kvalitete u postupku građenja asfaltnih kolnika. I tijekom održavanja i

ove radionice postignuta je visoka razina interakcije, pri čemu je osoblje NHL-a utvrdilo valjanost primjene znanosti i tehnologije na korisničkoj razini. Oni su uočili potencijal primjene konkretnih podataka o postupku građenja i dobrog uvida u operativne strategije, što se sve može koristiti u svrhu optimalizacije i podrške njihovim aktivnostima osiguranja kvalitete u ograničenim vremenskim okvirima i na većem broju projekata. Osim toga, oni su zatražili da se to istraživanje proširi i izvan obuhvata ovog pilot projekta. Kako se radi o istraživanju koje je tijekom, mogućnosti za to svakako postoje.

5. Zaključak

Primjenom gotovih standardnih tehnologija, na jasan je način definiran postupak izgradnje asfaltnog kolnika na projektu u Čileu, i to kroz prikupljanje podataka o logističkoj podršci kamionima koji dopremaju asfalt, brzini kretanja finišera, temperaturi hlađenja asfaltnog sloja, stupnju zbijenosti i operativnim strategijama zbijanja. Uz prikupljanje i obradu podataka, izrađeni su i predstavljeni razni dijagrami, vizualizacije i animacije procesa građenja i to na način koji članovima tima građevinskih radnika omogućuje prikladno korištenje tako prezentiranih informacija. Oni su tako mogli razmisliti o svom načinu rada, definirati mogućnosti poboljšanja, u smislu adekvatnog zagrijavanja ravnalice finišera ili smanjenja varijabilnosti prelazaka valjkom primjenom odgovarajuće strategije zbijanja, ili pak ranijeg pokretanja postupka zbijanja kako bi se izbjeglo snižavanje temperature prema donjoj graničnoj vrijednosti. Taj se postupak učenja zapravo odvijao kroz interakciju sudionika sastanka na kojem su prezentirane povratne informacije te u okviru kojeg su članovi asfalterske grupe aktivno sudjelovali u postupku učenja. U tijeku procesa, učenje se odvijalo na više razina, a pojedini članovi asfalterske grupe učili su i doživljavali prikazane informacije svatko na svoj način. Važno je naglasiti da se trebao pokrenuti prvi osnovni korak kako bi se definirale mogućnosti poboljšanja, tj. trebale su se poduzeti mjere da postupak gradnje asfaltnog kolnika postane jasan.

Eksplicitno definiranje procesa građenja u sustavima ugovaranja, poput onog koji se tradicionalno koristi u Čileu, pozitivno doprinosi kontroli izvođačevog postupka, optimizira kontrolu kvalitete koju provodi privatna tvrtka u suradnji s javnim nadzornim tijelom, pomaže u izravnoj kontroli kvalitete koju provodi RHL, te pomaže javnom nadzornom tijelu u obavljanju njegovih funkcija. Dakle, eksplicitnim definiranjem postupka izgradnje asfaltnog kolnika, određivanjem mogućnosti za provedbu poboljšanja te razvijanjem odgovarajućih strategija za poboljšanje kvalitete, pruža se znatna potpora i ostvaruje značajan doprinos NHL-ovim aktivnostima u području osiguranja kvalitete.

Važno je naglasiti ključnu ulogu NHL-a u ovom istraživanju kao nositelja inovacija koje doprinose poboljšanju kvalitete kolničkih konstrukcija. U stvari, NHL nije samo shvatio moguće pogodnosti, već i rizike koje sa sobom nosi eksplicitno definiranje postupka građenja asfaltnih kolnika. NHL-ovo osoblje, koje je

izravno uključeno u projekt, prihvatilo je konstruktivan, a ne penalizirajući pristup, potičući poboljšanje kvalitete kako bi se u konačnici dobile bolje kolničke konstrukcije.

Povoljni uvjeti u Nizozemskoj te uspjeh malih, postupnih, sustavnih i održivih poboljšanja postupaka, omogućio je ASPAR-ijevim istraživačima prikladno razumijevanje uzroka povijesnog otpora izvođača kolničkih konstrukcija prema inovacijama i uvođenju tehnoloških rješenja. To razumijevanje omogućilo im je primjenu pristupa usmjerenog prema korisnicima. Sličan je pristup taj istraživački tim primijenio i u čileanskim uvjetima. Iskustvo prikazano u ovom radu, bazirano na eksplicitnom definiranju postupka izgradnje asfaltnog kolnika, temeljni je korak u provedbi sadašnjih istraživanja o poboljšanju kvalitete u postupcima izvođenja asfaltnih konstrukcija u Čileu.

Kvaliteta kolnika predstavlja uobičajen izazov u različitim vrstama ugovora kojima se regulira izgradnja kolničkih konstrukcija. Iako

su u ovom radu prikazana nizozemska, a naročito čileanska iskustva, metodologija, rezultati i stečena iskustva mogu se generalizirati u smislu primjene u drugim regijama ili državama, ali se pritom u svakom slučaju u obzir trebaju uzeti posebne realnosti i specifičnosti svakog pojedinog konteksta.

Zahvale

Sljedeće osobe i organizacije pružile su hvalevrijedan doprinos u vezi s izradom ovog rada: Consortium Engineering 2030 (projekt: 14ENI2-26905), Čileanski državni laboratorij za autoceste, nizozemska istraživačka skupina ASPARi, Područna agencija za ceste (pokrajina Valparaíso u Čileu), javno nadzorno tijelo za ovaj ugovor (inženjer Juan Muñoz), građevinska tvrtka "Valko" i privatna tvrtka "VFH" koje su pružale podršku javnom nadzornom tijelu.

LITERATURA

- [1] Read, S.A.: Construction Related Temperature Differential Damage in Asphalt Concrete Pavements, University of Washington, Seattle, 1997.
- [2] Brock, J.D., Jakob, H.: Temperature Segregation/Temperature Differential Damage, Technical Paper T-134, 1999.
- [3] Mahoney, J.P., Muench, S.T., Pierce, L.M., Read, S.A., Jakob, H., Moore, R.: Construction-related temperature differentials in asphalt concrete pavement - Identification and assessment, *Construction*, 1712 (2000), pp. 93-100
- [4] Stroup-Gardiner, M., Nixon, J., Das, P.: Automated temperature profiling during hot-mix asphalt construction, *Transport Research Record*, 1900 (2004), pp. 41
- [5] Willoughby, K.A., Mahoney, J.P., Pierce, L.M., Uhlmeyer, J.S., Anderson, K.W.: Construction-related asphalt concrete pavement temperature and density differentials, *Construction*, 1813 (2002), pp. 68-76
- [6] Corlew, J.S., Dickson, P.S.: Methods for calculating temperature profiles of hot-mix asphalt concrete as related to the construction of asphalt pavements, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Technical session, 37, 1968.
- [7] Van Dee, R.: Modelling of the compaction of asphalt layers, Master Thesis, Technical University of Delft, Delft, 1999.
- [8] Chadboum, B.A., Newcomb, D., Voller, V.R., DeSombre, R.A., Luoma, J.A., Timm, D.: An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions, Final Report MN/RC - 1998 - 18, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, 1998.
- [9] Timm, D., Voller, V., Lee, R., Harvey, E., Calcool, J.: A multi-layer asphalt pavement cooling tool for temperature prediction during construction, *The International journal of Pavement Engineering*, 2 (2001), pp. 169 - 185
- [10] Leech, D., Powell, W.D.: Levels of Compaction of dense coated macadam achieved during pavement construction, TRRL laboratory Report No. 619, 1974.
- [11] Leech, D., Selves, N.W.: Modified rolling to improve compaction of dense coated macadam, 1976., pp. 724
- [12] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W.: Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, Second edition, NAPA Research and Education Foundation, 1996.
- [13] Bouvet, D., Froumentin, M., Garcia, G.: A real-time localization system for compactors, *Automation in Construction*, 10 (2001) 4, pp. 417-428
- [14] Froumentin, M.H., Peyret, F.G.: Method of and auxiliary equipment for guiding a compaction machine, 1997.
- [15] Krishnamurthy, B.K., Tserng, H.P., Schmitt, R.L., Russell, J.S., Bahia, H.U., Hanna, A.S.: AutoPave: Towards an automated paving system for asphalt pavement compaction operations, *Automation in Construction*, 8 (1999), pp. 165
- [16] Li, C.C., Oloufa, A.A., Thomas, H.R.: A GIS-based system for tracking pavement compaction, *Automation in Construction*, 5 (1996) 1, pp. 51
- [17] Oloufa, A.: Quality control of asphalt compaction using GPS-based system architecture, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 9 (2002) 1, pp. 29-35
- [18] Pampagnin, L.H., Peyret, F., Garcia, G.: Architecture of a GPS-based guiding system for road compaction, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998.
- [19] Peyret, F., Bestaille, D., Hintzy, G.: High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning *Automation in Construction*, 9 (2000) 3, pp. 299
- [20] Peyret, F., Jurasz, J., Carrel, A., Zekri, E., Gorham, B.: The Computer Integrated Road Construction project, *Automation in Construction* 9 (2000) 5, pp. 447-461
- [21] Peyret, F., Tasky, R.: A traceability system between plant and work site for asphalt pavements, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19 (2004) 1, pp. 54
- [22] Anderegg, R., Kaufmann, K.: Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: Feedback Control Systems in Automatic Compaction and Compaction Control, *Transport Research Record: Journal of the Transport Research Board*, 1868 (2004) 1, pp. 124-134.

- [23] Briaud, J.L., Seo, J.: Intelligent Compaction: Overview and research need. Retrieved from, 2003.
- [24] Camargo, F., Larsen, B., Chadbourn, B., Roberson, R., Siekmeier, J.: Intelligent Compaction: A Minnesota Case History, Paper presented at the 54th Annual University of Minnesota Geotechnical Conference, Minnesota, 2006.
- [25] Horan, B., Ferragut, T.: Intelligent Compaction Strategic Plan, Retrieved from, 2005.
- [26] Starry, D.W.: Recent advances in compaction equipment, including intelligent compaction - Vibratory Rollers. *transport Research Circular*, (Number E-C105), 2006.
- [27] Bowden, S., Dorr, A., Thorpe, T., Anumba, C.: Mobile ICT support for construction process improvement, *Automation in Construction*, 15 (2006) 5, pp. 664-676.
- [28] Panagiotis, M., Tatum, C.B.: Technology Adoption Decisions in Construction Organizations, *Journal of Construction Engineering and Management*, 125 (1999) 5, pp. 330-338.
- [29] Slaughter, E.S.: Models of Construction Innovation, *Journal of Construction Engineering and Management*, 124 (1998) 3, pp. 3226.
- [30] Simons, B.J.A.G.: Towards a more controlled asphalt paving process, (M.Sc. Thesis), University of Twente, Enschede, 2007.
- [31] Ang, G., Groosman, M., Scholten, N.P.M.: Dutch performance-based approach to building regulations and public procurement, *Building Research; Information*, 33 (2005) 2, pp. 3107-119, <https://doi.org/10.1080/0961321042000325345>
- [32] Dorée, A., ter Huerne, H.: Workshop proceedings - Development of Tools and Models for the Improvement of Asphalt Paving Process, Unpublished workshop proceedings. University of Twente, 2005.
- [33] Caerteling, J.S., Halman, J.I.M., Dorée, A.G.: Technology development in road infrastructure: the relevance of governmental championing behaviour, *Research Policy*, 2008.
- [34] Hoezen, M.E.L., Dorée, A.G.: First Dutch competitive dialogue projects: a procurement route caught between competition and collaboration, Paper presented at the 24th Annual ARCOM Conference, Cardiff, UK, 2008.
- [35] Miller, S.R., Dorée, A.G., ter Huerne, H.L.: The asphalt paving process: plans for action research, Paper presented at the 4th Nordic Conference in Construction Economics and Organisation, Luleå, Sweden, 2007.
- [36] Harrison, M., Short, C., Roberts, C.: Reflecting on reflective learning: the case of geography, earth and environmental sciences, *Journal of Geography in Higher Education*, 27 (2003) 2, pp. 3133-152.
- [37] Kolb, D.A.: *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1984.
- [38] Miller, S.R.: *Hot Mix Asphalt Construction - Towards a more professional approach*, (PhD), University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2010.
- [39] Bijleveld, F.: *Professionalising the asphalt construction process: aligning information technologies, operators' knowledge and laboratory practices*. (PhD), University of Twente, Enschede, the Netherlands, 2015.
- [40] *The Economist: Pockets World in Figures*. London: Economist Books, 2017.
- [41] Ministry of Public Works of Chile: *National Road Network: Dimensions and Characteristics* (in Spanish), Santiago, Chile, 2016.
- [42] Bijleveld, F.R., Vasenev, A., Doree, A.G., Hartmann, T.: Aspari is for paving, network to professionalise the paving industry, *ConcepTueel*, 21 (2012), pp.17-21
- [43] Argyris, C., Schon, D.: *Organization learning: A theory of Action perspective*. Reading, Mass: Addison Wesley, ISBN 0-201-00174-8, 1978.