

ULOGA AMBALAŽE U ZAŠTITI JAJA OD DINAMIČKIH OPTEREĆENJA TIJEKOM CESTOVNOGA TRANSPORTA

THE ROLE OF PACKAGING IN THE PROTECTION OF EGGS FROM DYNAMIC LOADS DURING ROAD TRANSPORT

V. Dam, S. Plietić, A. Galić

Pregledni znanstveni članak - Review scientific paper
 Primljeno - Received: 28. siječanj - January 2026
 Revidirano - Revised: 27. ožujak - March 2026
 Prihvaćeno - Accepted: 7. svibanj - May 2026
<https://doi.org/10.33128/k.68.1.2>
 UDK 637.435:656.13

SAŽETAK

Ovo istraživanje bavi se analizom utjecaja dinamičkih opterećenja na ambalažu za jaja tijekom cestovnoga transporta u urbanim uvjetima. Za potrebe istraživanja mjeren je vertikalni pomak okvira (šasije) distribucijskoga kamiona prilikom prelaska preko cestovnih uspornika, s ciljem utvrđivanja njegova utjecaja na transportiranu robu. Također je analizirana i mehanička otpornost triju vrsta kutija za jaja (kartonske kutije, kutije od polistirena i kutije od ekspanziranoga polistirena) na vertikalna tlačna opterećenja koja se javljaju tijekom transporta.

Pomaci okvira vozila izazvani prolaskom preko uspornika rezultirali su skokovitim pomacima tereta u tovarnome prostoru, pri čemu su najveći vertikalni pomaci iznosili +209 mm i -167 mm. Takvi dinamički uvjeti povećavaju rizik od oštećenja osjetljivoga tereta poput jaja. Najveću otpornost na vertikalna tlačna opterećenja pokazale su kartonske kutije (prosječno 541,99 N), dok su kutije od ekspanziranoga polistirena i neekspanziranoga polistirena pokazale 6,16 %, odnosno 24,07 % manju otpornost.

Rezultati pokazuju da su uvjeti transporta, kao i konstrukcija i mehanička svojstva ambalaže, ključni za zaštitu jaja tijekom transporta. Kartonske kutije, zahvaljujući svojoj unutarnjoj strukturi, efikasno raspodjeljuju sile i time omogućuju bolju zaštitu proizvoda.

Ključne riječi: kamion, uspornik, vibracije, ambalaža, jaja

UVOD

Cestovni prijevoz najčešći je i najprihvatljiviji način distribucije poljoprivredno-prehrambenih proizvoda. Unatoč svojoj praktičnosti, cestovni transport sa sobom nosi i određene rizike, koji mogu negativno utjecati na kvalitetu proizvoda. Među najznačajnijim rizicima ističu se dinamička mehanička opterećenja, osobito ona uzrokovana vibracijama i manevarskim stresovima, koja se javljaju tijekom giba-

nja vozila. Soleimani i Ahmadi (2015.), kao i Lamb i Rouillard (2021.) navode da su glavni uzroci pojave dinamičkih opterećenja u cestovnome transportu stanje prometnica (uključujući neravnine, udarne jame, usporike i slično), udaljenosti od izvora do cilja transporta, karakteristike prijevoznoga sredstva te brzina transporta. Na učestalost i intenzitet ovih opterećenja dodatno utječe i ponašanje vozača tijekom vožnje, čija su odgovornost određivanje brzine, prethodno, kočnja i promjene smjera gibanja. Pored

Vladimir Dam, PhD student, Prof. Dr. Sc. Stjepan Plietić, e-mail: spliestic@agr.hr, (ORCID: 0009-0009-4733-6285), Assoc. Prof. Ante Galić, e-mail: agalic@agr.hr, (ORCID: 0000-0003-3655-4171), University of Zagreb, Faculty of Agriculture, Svetošimunska cesta 25, 10000 Zagreb, Croatia.

navedenoga, učestalost pojave dinamičkih opterećenja ovisi o tome koliko je dotično vozilo elastično i koliki teret može podnijeti. Ranathunga i sur. (2010.), Astrauskas i sur. (2020.) te Ardian i sur. (2025.) ističu da su sva tijela koja posjeduju masu i elastičnost podložna negativnomu djelovanju vibracija. Isti autori navode da se sile tijekom gibanja vozila vibracije prenose preko pneumatika i dalje na osovine i okvir vozila dok ne dođu do teretnoga dijela gdje se prenose na teret. Do pojave vibracija dolazi uslijed aktivacije sustava opruge i prigušenja, pri čemu masa vozila u kombinaciji s ovjesom (opruge i amortizeri) čini dinamički sustav. Svako vozilo, uključujući kamione i prikolice, ima specifičnu kombinaciju opružnih masa, koje djeluju u međusobnoj sprezi, a obuhvaćaju pneumatik, podvozje i podnicu te sustav ovjesa.

Oštećenja transportirane robe najčešće se javljaju kao posljedica dinamičkoga odziva sustava vozilo-ambalaža-proizvod, pri čemu vibracije imaju ključnu ulogu. Kada je učestalost vibracija transportnoga prostora kamiona blizu prirodne frekvencije transportiranoga pakiranja, sustav počinje pokazivati stanje rezonancije, što rezultira znatnim povećanjem vibracijskih sila koje se s podvozja preko podnice prenose na proizvod. Posljedice vibracijskih opterećenja tijekom transporta mogu uključivati zamor materijala, mehanička oštećenja, oštećenje uslijed trenja (struganja), porast statičkoga naboja, neželjeno gibanje proizvoda u transportno-tovarnome prostoru, odvajanje faza i propuštanje tekućina.

Osim vibracijskih opterećenja, na kvalitetu proizvoda tijekom transporta i manipulacije utječu i druge mehaničke sile. Među njima se izdvajaju vodoravne dinamičke sile, koje nastaju zbog promjena brzine ili smjera gibanja vozila (ubrzavanja, kočenja i skretanja), kao i vertikalne dinamičke sile koje se javljaju pri vertikalnomu pomaku robe i padovima robe tijekom transporta i manipulacije. Uz dinamička opterećenja, na proizvod dodatno djeluju i statičke sile, prvenstveno vertikalne statičke sile koje nastaju etažnim slaganjem robe, te vodoravne statičke sile uzrokovane hvatanjem, stezanjem i držanjem robe transportno-manipulativnim uređajima tijekom utovara i istovara. Djelovanje navedenih sila, pojedinačno ili u kombinaciji, može povećati rizik od mehaničkih oštećenja proizvoda, osobito kod osjetljivih proizvoda poput jaja. Galić i sur. (2016.) navode da do najvećega stupnja oštećenja jaja dolazi upravo tijekom transporta, i to značajno više negoli u bilo kojem drugom koraku prerade i distribucije. Posljedično, dapače i kratkotrajno izlaganje nepovoljnim

transportnim uvjetima može rezultirati lomom ljuske ili pojavom mikrooštećenja, koja nisu odmah vidljiva, ali negativno utječu na kakvoću i tržišnu vrijednost jaja. Stoga je potrebno prepoznati i razumjeti potencijalne rizike transporta kako bi se odabrala adekvatna ambalaža, uvela nova ili poboljšala postojeća ambalažna rješenja za pakiranje jaja.

Osnovna uloga ambalaže jest zaštita jaja tijekom rukovanja, skladištenja i transporta. Upotrijebljeni ambalažni materijal predstavlja barijeru između upakiranih poljoprivredno-prehrambenih proizvoda i fizikalnih, kemijskih i bioloških čimbenika koji mogu uzrokovati njihovo kvarenje. U tu svrhu, do sada je najčešće korištena kartonska ili ambalaža od polistirena i ekspaniranoga polistirena. Bitan zadatak ambalaže za jaja jest također pružanje zaštite unutrašnjosti jaja ograničavanjem izmjene plinova kroz opnu i ljusku. Specifičan oblik kutija osigurava da se u svako udubljenje (ležište) smjesti pojedinačno jaje, čime se ono osigurava od mogućih oštećenja sprječavajući kontakt s drugim jajima. Ovakva struktura dodatno štiti jaja jer ublažava djelovanje mehaničkih i dinamičkih opterećenja koja se javljaju tijekom transporta i skladištenja, čime se smanjuje njihov izravan utjecaj na ljusku jaja.

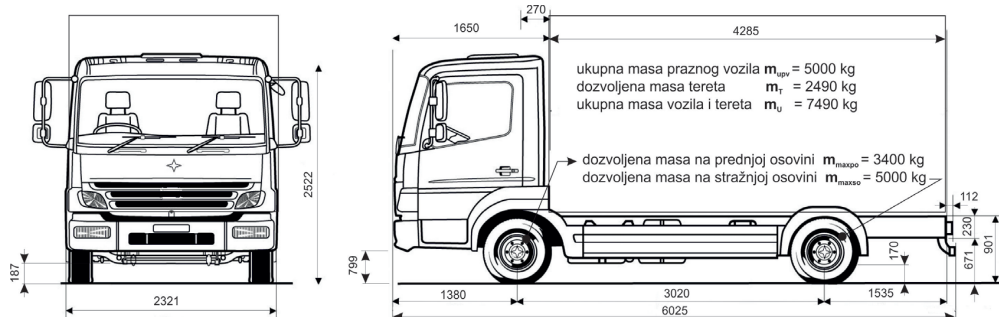
Böröcz i Molnár (2020.) navode da pojedine vrste ambalaže mogu tijekom transporta pojačavati vibracije od dna do vrha transportno-manipulativne jedinice, a korištenje takve neodgovarajuće ambalaže također može značajnu smanjiti kvalitetu upakiranih proizvoda. Autori navode da krutost, oblik i materijal same ambalaže također igraju ključnu ulogu. Manje kruta ambalaža ili ambalaža koja nije u potpunosti ispunjena može djelovati kao sustav opruga i masa, što dovodi do rezonancije i pojačavanja vibracija na određenim frekvencijama, koje su tipične za cestovni prijevoz. U tome se slučaju amplituda vibracija dramatično povećavaju od sloja do sloja. Gornji paketi, koji imaju najviše slobode gibanja, doživljavaju najintenzivnije vibracije, a time i dinamička opterećenja. Zbog neodgovarajućih uvjeta transporta, pored gubitaka jaja, može doći i do smanjenja njihove kvalitete. Berardinelli i sur. (2003.) su sukladno tome utvrdili značajnu povezanost učestalosti vibracija s smanjenjem Haughovih jedinica te smanjenjem kvalitete žumanjaka i bjelanjaka.

Cilj je ovoga rada utvrditi opasnost od loma jaja u cestovnome transportu analizirajući ponašanje vozila pri prelasku preko uspornika i analizirajući zaštitnu sposobnost najzastupljenijih vrsta kutija za jaja u Republici Hrvatskoj.

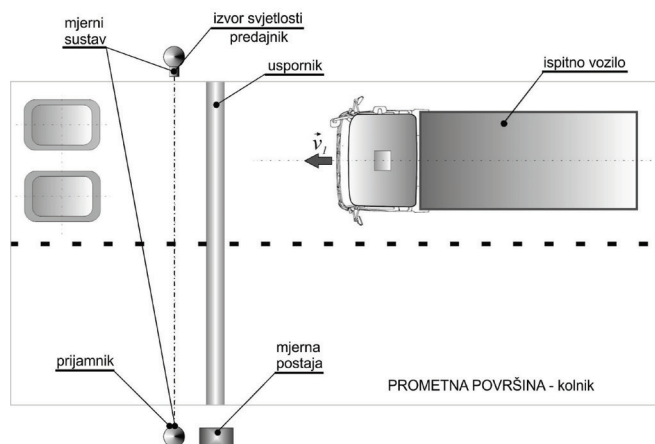
MATERIJALI I METODE

U istraživanjima su provedena mjerenja pomaka okvira (šasije) transportnoga vozila pri prelasku preko uspornika te je provedena analiza otpornosti na vertikalne tlačne sile (smjer osi z) triju vrsta kutija za 10 jaja napravljenih od kartona – recikliranoga papira (KK), polistirena (PS) i ekspaniranoga polistirena (EPS). Mjerenja pomaka okvira transportnoga vozila provedena su pri prijevozu i distribuciji ambalažiranih kokošjih jaja u gradskim uvjetima (grad Zagreb). Pravilnikom o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama (NN 92/2019) definirani su

pojmovi umjetnih izbočina i uzdignutih ploha i utvrđene njihove minimalne i maksimalne dimenzije, kao i brzine gibanja vozila preko njih. Na području grada Zagreba postoji desetak konstrukcija i izvedbeno različitih oblika uspornika. Ispitivanja su provedena na uspornicima za brzinu od 30 km/h i manju, visine 75 mm i širine 350 mm, koji se prostiru cijelom širinom kolnika. Ispitno vozilo bio je distribucijski kamion zatvorenoga transportno-tovarnog prostora, nosivosti 2490 kg, ukupne dopuštene mase vozila i tereta od 7490 kg, ukupne duljine 6025 mm, s međuosovinskim razmakom od 3020 mm (slika 1).



Slika 1. Dimenzije i mase distribucijskoga kamiona
Figure 1 Truck masses and dimensions



Slika 2. Metoda mjerenja
Figure 2 Method of measurement

Brzina vozila s teretom pri prelasku preko uspornika bila je 10 km/h (2,78 m/s). Vertikalni pomak vozila pri prelasku preko uspornika određen je primjenom beskontaktna optičke metode mjerenja, pri čemu se s pomoću svjetlosnoga predajnika i prijamnika registrira promjena položaja vozila u odnosu na referentnu mjernu os. Metoda mjerenja pomaka vozila prikazana je na slici 2.

Prikaz promjene sila u različitim uvjetima vožnje, na ravnoj površini, pri prijelazu prednje osovine preko uspornika te pri prijelazu stražnje osovine preko uspornika, prikazan je na slici 3. Iz priloženoga je vidljivo da utjecaj kombinacije brzine, nagiba, sile inercije i gravitacije može uzrokovati vertikalni skok (odvajanje) tereta od podloge, što povećava rizik od oštećenja i nameće potrebu za pravilnim osiguravanjem osjetljive robe u pokretu.

Dinamika gibanja vozila prilikom prelaska preko uspornika prikazana je na slici 4., pružajući uvid u složene sile koje djeluju na vozilo u kratkome intervalu. Profil uspornika, s naznačenim dimenzijama, definira putanju vertikalnoga pomaka kotača, dok je gibanje kotača opisano formulom

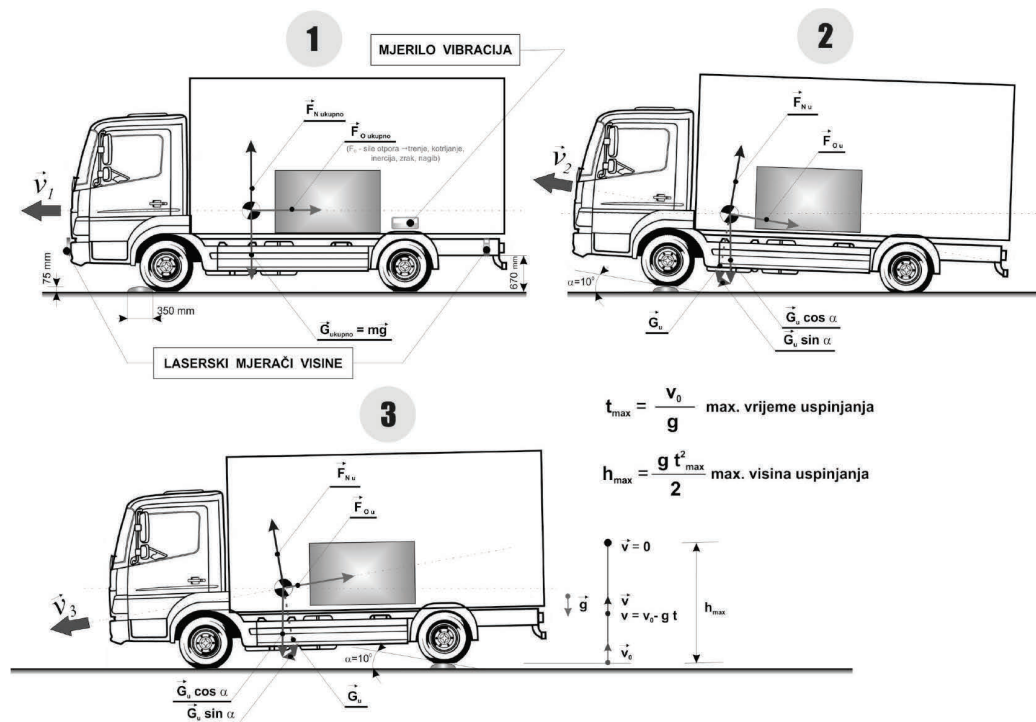
$$y(t) = Y \sin \omega t,$$

gdje su

- $y(t)$ – elongacija (m),
- Y – amplituda (m),
- ω – kružna ili kutna frekvencija (rad/s),
- t – vrijeme (s).

Početni vertikalni pomak kotača izaziva sile u sustavu ovjesa, koje se zatim prenose na okvir vozila (šasiju), uzrokujući njezine oscilacije. Ovaj prijenos sila i vibracija, kao i njihovo pojačavanje od prednje prema stražnjoj osovini, ključni su za razumijevanje dinamike vozila.

Istraživanja otpornosti kutija za jaja na vertikalne tlačne sile provedena su simulacijom transportnih uvjeta. Pri mjerenju vertikalnih tlačnih sila korišten je dinamometar HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, Njemačka) s kapacitetom od 1000 N, pojačalo signala HBM DMC 9012 A i osobno računalo (Galić i sur. 2018.). Mehanička svojstva kutija analizirana su pod kontinuiranim opterećenjem po cijeloj površini poklopca kutija. Analize su provedene na punim kutijama. Za analizu su korištena jaja hibrida kokoši Isa Brown iz slobodnoga uzgoja nabavljena od lokalnoga proizvođača. Prije analize provedeno je sortiranje jaja te su odabrana ona ujednačene veličine razreda L. Odabrana jaja su pregledana, a ona s pukotinama, greškama na



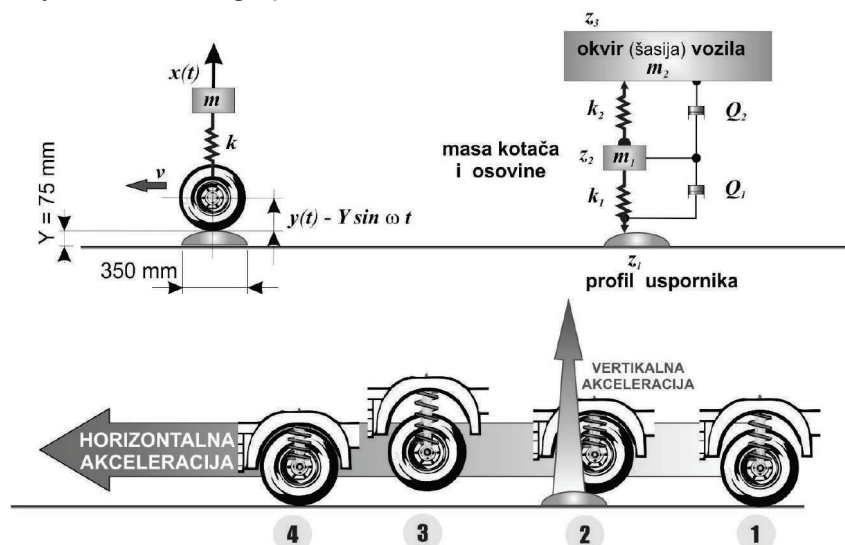
Slika 3. Statika i dinamika gibanja vozila
Figure 3 Statics and truck movement dynamics

ljusci i deformiranim oblikom su eliminirana. Kutije su opterećene vertikalnom tlačnom silom (smjer osi z) sve dok nije došlo do prvoga pucanja ljuske jaja u kutiji. Za svaki tip kutije analize su obavljene u trideset ponavljanja.

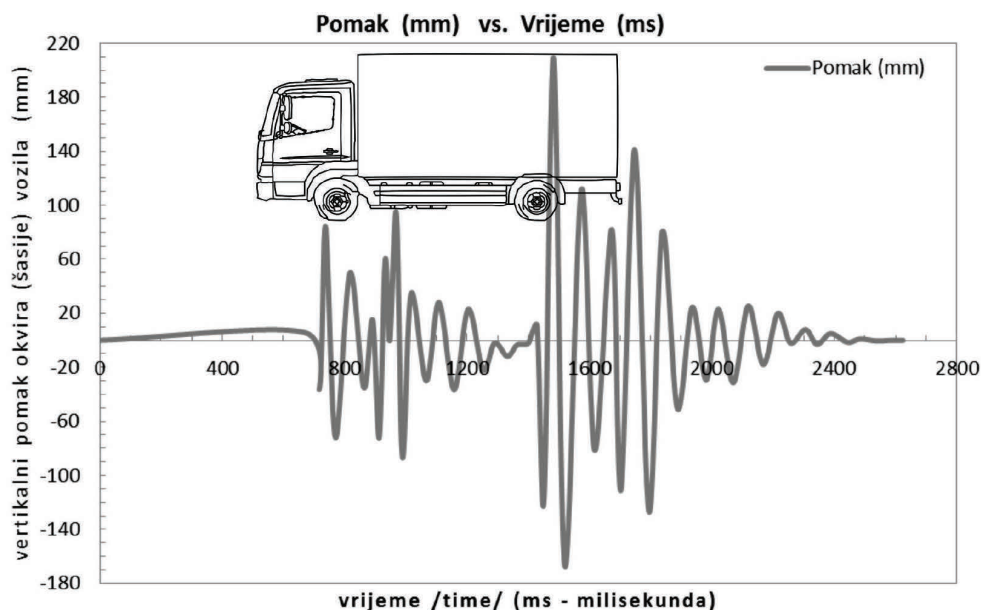
REZULTATI I RASPRAVA

Uslijed gibanja distribucijskoga kamiona preko uspornika došlo je do vertikalnog pomaka okvira

(šasijs) vozila, što je rezultiralo i skokovitim poma-
kom i klizanjem ambalažnih jedinica u transportno-
tovarnome prostoru vozila. Maksimalan vertikalni
pomak prednje osovine iznosio je +84 mm, dok
je minimalan vertikalni pomak iznosio -87 mm.
Maksimalan vertikalni pomak stražnje osovine
iznosio je +209 mm, dok je minimalan vertikalni
pomak iznosio -167 mm. Trajanje oscilacija pri na-
vedenoj brzini bilo je 2584 ms (milisekunde), to jest
2,58 sekunda.



Slika 4. Dinamika i kinematika gibanja vozila
Figure 4 Truck movement dynamics and kinematics



Slika 5. Vertikalni pomak okvira (šasijs)
Figure 5 Vertical shifting of the truck frame (chassis)

Kada prednja osovina kamiona naiđe na uspornik, dolazi do nagloga vertikalnog pomaka. Ovaj pomak uzrokuje početnu vibraciju, koja se prenosi kroz okvir vozila. Iako sustav ovjesa prednje osovine djelomično apsorbira tu vibraciju, dio energije se ipak prenosi dalje. Kada stražnja osovina naiđe na uspornik, ona doživljava sličan, ali često jači, vertikalni pomak. Međutim, vibracije koje su već prisutne u okviru vozila zbog prelaska prednje osovine sada se dodaju vibracijama koje nastaju na stražnjoj osovini. Zbog toga dolazi do povećanja amplitude vibracija na stražnjoj osovini. Kako stražnja osovina obično nosi veći dio tereta, tako pojačane vibracije na stražnjoj osovini imaju veći utjecaj na teret u tovarnome prostoru. Veća amplituda vibracija znači jače udarce i pomake, što povećava rizik od oštećenja osjetljivoga tereta. Zabilježeni pomaci od +209 mm i -167 mm, u kombinaciji s oscilacijama koje traju 2,58 sekunda, stvaraju uvjete za skokovite pomake i klizanje ambalažnih jedinica, što može rezultirati značajnim oštećenjem jaja. Ovi podatci ukazuju na to da dapače i standardizirano pakiranje i slaganje na palete ne mogu u potpunosti kompenzirati dinamičke sile koje se javljaju tijekom transporta. Stoga je ključno implementirati mjere za smanjenje pomaka okvira vozila, kao što su poboljšanje sustava ovjesa vozila i optimizacija ruta transporta, kako bi se izbjegli uspornici i neravne površine te korištenje dodatnih materijala za ublažavanje udaraca unutar transportnih kutija. Ovi podatci naglašavaju potrebu za sveobuhvatnim pristupom u optimizaciji transporta jaja, koji obuhvaća ne samo pakiranje i slaganje, već i tehničke karakteristike vozila i uvjete na cestama.

Iako Seydim i Dawson (1999.) navode da se zaštitne funkcije različitih vrste kutija za jaja značajno ne razlikuju tijekom uobičajenoga transporta, ovo istraživanje pokazuje da su konstrukcija ambalaže i odabir materijala ključni za učinkovitu zaštitu proizvoda od vertikalnih opterećenja (Tablica 1.).

Istraživanja su pokazala da su uslijed vertikalnoga tlačnog kontinuiranog opterećenja za lom jaja kod kartonskih kutija potrebne veće sile negoli kod kutija od polistirena i ekspaniranoga polistirena. Sile potrebne za lom kod kartonskih kutija iznosile su u prosjeku 541,99 N, dok su kod kutija od ekspaniranoga polistirena te sile bile 6,16 % manje, a kod polistirenskih kutija 24,07 % manje. Razlog tomu jest sama konstrukcija kartonskih kutija, koja omogućuje da se vertikalne sile prenose putem njezine unutarnje strukture, i na taj se način smanjuje njihov izravan utjecaj na jaja. Kutije od ekspaniranoga polistirena nisu toliko mehanički otporne kao kartonske. Njihova je prednost to što nisu toliko lomljive kao kutije od neekspaniranoga polistirena te se mogu blago deformirati, čime djelomično apsorbiraju udarce i opterećenja.

Na osnovi dobivenih rezultata, kartonske su kutije zbog svoje konstrukcije najpovoljnije za etažno slaganje punih kutija i neutraliziranje vertikalnih sila. Iako slične konstrukcije kao kartonske kutije, kutije od polistirena su zbog svojih mehaničkih svojstava, to jest pucanja i deformacija pod djelovanjem sila, pokazale najmanju zaštitnu sposobnost.

U kontekstu sve većih zahtjeva glede sigurnosti hrane i smanjenja gubitaka u logistici, rezultati ovoga istraživanja ukazuju na potrebu optimizacije ambalaže, konstrukcije vozila i cestovne infrastrukture u svrhu zaštite osjetljive robe.

ZAKLJUČCI

Provedena istraživanja jasno su pokazala kako dinamički uvjeti transporta, posebno tijekom prelaska vozila preko uspornika, imaju značajan utjecaj na sigurnost osjetljivih proizvoda poput kokošjih jaja. Mjerenja pomaka šasije vozila ukazala su na znatne vertikalne oscilacije koje rezultiraju skokovitim pomacima i klizanjem paletiziranih ambalažnih jedinica unutar tovarnoga prostora ako teret nije

Tablica 1. Vertikalne sile pri kojima je došlo do loma jaja u kutijama

Table 1 Vertical forces at which egg breakage occurred in packaging

Vrsta kutije	Srednja vrijednost (N)	min. (N)	maks. (N)	Sd
KK	541,99	513,17	564,37	17,87
EPS	508,59	479,49	539,17	21,22
PS	411,50	379,88	437,16	19,76

*Prikazani rezultati predstavljaju srednju vrijednost trideset mjerenja

kvalitetno osiguran. Analiza otpornosti različitih vrsta ambalaže pokazala je da kartonske kutije posjeduju optimalan omjer mehaničke otpornosti i funkcionalnosti u distribucijskim uvjetima, dok izbor lošije otporne ambalaže povećava rizik od gubitaka tijekom transporta. Na temelju rezultata istraživanja može se zaključiti da učinkovita zaštita jaja tijekom distribucije zahtijeva integriran pristup, koji uključuje:

- pravilnu selekciju ambalaže prema njenim mehaničkim svojstvima
- optimizaciju tehničkih karakteristika vozila (posebno ovjesa)
- te planiranje transportnih ruta uz izbjegavanje prometnih prepreka koje izazivaju nagle promjene dinamike gibanja

LITERATURA

1. Ardian A.R.R., Handayani D., Marzuki A. (2025.): A Review: Vibration Caused by Transportation. *Engineering Proceedings*. 84(1): 42. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084042>
2. Astrauskas T, Januševičius T, Grubliauskas R. (2020.): Vehicle speed influence on ground-borne vibrations caused by road transport when passing vertical traffic calming measures. *Promet – Traffic & Transportation*, 32(2): 247-253.
3. Berardinelli A., Donati V., Giunchi A., Guarnieri A., Ragni L. (2003.): Effects of sinusoidal vibration on quality indices of shell eggs. *Biosystems Engineering*, 86(3): 347–353.
4. Böröcz P, Molnár B. (2020.): Measurement and Analysis of Vibration Levels in Stacked Small Package Shipments in Delivery Vans as a Function of Free Movement Space. *Applied Sciences*. 10(21): 7821. <https://doi.org/10.3390/app10217821>
5. Galic A, Pliestic S, Filipovic D, Kovacev I, Copek K, Janjecic Z, Bedekovic D. (2018.): Mechanical properties of ten-egg boxes made of different materials. *J Food Sci Technol*. 55(4): 1325-1330. doi: 10.1007/s13197-018-3043-z.
6. Galić A., Pliestić S., Filipović D., Kovačev I., Čopek K., Bedeković D., Šic Žlabur J. (2016.). Utjecaj kvalitete ljuske na lom jaja u cestovnom transport. *Zbornik radova 51. hrvatskog i 11. međunarodnog simpozija agronoma*. Zagreb. 460-464.
7. Lamb M.J., Rouillard V. (2021.) : On the parameters that influence road vehicles vibration levels. *Packag Technol Sci*. 34, 525–540. <https://doi.org/10.1002/pts.2592>
8. Seydim A. C., Dawson P.L., (1999.): Packaging effects on shell egg breakage rates during simulated transportation. *Poult Sci*. 78(1): 148-51. doi: 10.1093/ps/78.1.148. PMID: 10023763.
9. Pravilnik o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama NN 92/2019
10. Ranathunga C. L., Jayaweera, H. H. E., Suraweera, S. K. K., Wattage, S. C., Ruvinda K. K. D. L., Ariyaratne T. R. (2010.): Vibration Effects in Vehicular Road Transportation. *Proceedings of the Technical Sessions*, 26: 9-16
11. Soleimani B., Ahmadi, E. (2015.): Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension system and travel speeds, *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 8(1), 26-32, <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.08.002>.

SUMMARY

This study analyzes the effects of dynamic loads on egg packs during road transport under urban conditions. For the purposes of the study, the vertical displacement of the frame (chassis) of a distribution truck was measured while crossing speed bumps to determine its impact on the transported goods. In addition, the mechanical resistance of three types of egg packaging (cardboard boxes, polystyrene boxes, and expanded polystyrene boxes) to vertical compressive loads was analyzed. The displacements of the chassis caused by driving over bumps led to sudden movements of the load in the vehicle's cargo area, with maximum vertical displacements of +209 mm and -167 mm. Such dynamic conditions increase the risk of damage to sensitive goods such as eggs. Cardboard boxes showed the highest resistance to vertical compressive forces (541.99 N on average), while expanded and non-expanded polystyrene boxes showed a 6.16% and 24.07% lower resistance respectively. The results show that the transport conditions as well as the design and mechanical properties of the packaging are decisive for the protection of the eggs during transport. Thanks to their internal structure, the cartons distribute the forces efficiently and thus offer better product protection.

Keywords: truck, speed bump, packaging, vibration, eggs