

Pregledni rad DOI: 10.5937/DDD26216N

DIGITALNI SISTEMI ZA KONTROLU BIOSIGURNOSTI I DOBROBITI FARMSKIH ŽIVOTINJA

DIGITAL SYSTEMS FOR BIOSECURITY AND WELFARE CONTROL OF FARM ANIMALS

**Katarina Nenadović^{1*}, Marijana Vučinić¹, Milutin Đorđević¹,
Vladimir Drašković¹, Radislava Teodorović¹, Radovan Marčetić¹,
Darja Fjodorov¹, Dejan Bugarski²**

Kratak sadržaj

Porast svetske populacije do 2050. godine nameće potrebu za značajnim povećanjem proizvodnje hrane, pri čemu stočarski sektor ima ključnu ulogu u obezbeđivanju održive i bezbedne proizvodnje namirnica životinjskog porekla. Savremeni razvoj digitalnih tehnologija, uključujući automatizaciju, precizno stočarstvo (PLF), Internet stvari (IoT) i analizu velikih podataka, omogućava unapređenje produktivnosti, zdravlja i dobrobiti životinja, kao i efikasnije upravljanje resursima. Ove tehnologije doprinose smanjenju troškova rada, optimizaciji proizvodnih procesa i smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu. Integracija naprednih sistema u stočarstvu predstavlja osnovu razvoja „pametne poljoprivrede“, koja omogućava održivu, efikasnu i transparentnu proizvodnju hrane u skladu sa globalnim izazovima.

Ključne reči: biosigurnost, digitalni sistemi, dobrobit životinja, farmske životinje

Abstract

The increase in the world's population until 2050 imposes the need for a significant increase in food production, with the livestock sector playing a key role in ensuring sustainable and safe production of food of animal origin. Contemporary developments in digital technologies, including automation, precision livestock farming (PLF), the Internet of Things (IoT) and big data analytics, enable im-

¹ Dr sci. vet. med. Katarina Nenadović, vanredni profesor; dr sci. vet. med. Marijana Vučinić, redovni profesor; dr sci. vet. med. Milutin Đorđević, redovni profesor; dr sci. vet. med. Vladimir Drašković, docent; dr sci. vet. med. Radislava Teodorović, redovni profesor; dr vet. med. Radovan Marčetić, asistent; dr vet. med. Darja Fjodorov, samostalni stručno tehnički saradnik za rad u laboratorijama, Katedra za zoohigijenu, Univerzitet u Beogradu, Fakultet veterinarske medicine, 11000 Beograd, R. Srbija

² Dr Dejan Bugarski, Naučni institut za veterinarstvo „Novi Sad“, 21000 Novi Sad, R. Srbija

*e-mail kontakt osobe: katarinar@vet.bg.ac.rs

proved productivity, animal health and welfare, as well as more efficient resource management. These technologies contribute to reducing labor costs, optimizing production processes and reducing the negative impact on the environment. The integration of advanced systems in animal husbandry is the basis of the development of "smart agriculture", which enables sustainable, efficient and transparent food production in accordance with global challenges.

Key words: biosecurity, digital systems, animal welfare, farm animals

UVOD

Do 2050. godine svetska populacija će dostići oko 9,8 milijardi ljudi (UNDE-SA, 2017), a proizvodnja hrane moraće da se poveća za približno 70% kako bi se zadovoljile rastuće potrebe za hranom. Stočarski sektor imaće važnu ulogu u zadovoljavanju sve veće globalne potrošnje hrane životinjskog porekla kroz održivu proizvodnju koja promoviše bezbednost hrane, smanjenje siromaštva, unapređenje javnog zdravlja i sigurnost snabdevanja hranom (Tedeschi i sar., 2015). Kako bi se odgovorilo na izazove koje donosi rast svetske populacije i ostvarili Ciljevi održivog razvoja Ujedinjenih nacija, tehnološki napredak i inovacije moraće da imaju ključnu ulogu u transformaciji sektora hrane i poljoprivrede.

Digitalizacija u poljoprivredi i stočarstvu poslednjih godina ima sve značajniju ulogu u unapređenju proizvodnje, zdravlja životinja i sigurnosti hrane. Kako se veličina stada i jata povećava, a metode proizvodnje postaju sve intenzivnije i specijalizovanije, tehnologije automatizovane identifikacije, hranjenja, čišćenja i klanja značajno su se razvile. One omogućavaju poljoprivrednoj industriji da zadrži ili čak poveća profitabilnost lanca proizvodnje hrane. Od automatskih sistema za mužu, koji su uobičajeni na mlečnim farmama u zemljama sa višim prihodima, do automatizovanih sistema za omamljivanje u vodenim kupatilima i sečenje vrata u klanicama živine, automatizacija – koju možemo definisati kao proces koji se odvija brzo i ponavljajuće uz minimalnu direktnu ljudsku intervenciju – predstavlja istovremeno i posledicu i pokretačku snagu savremenog stočarstva (Buller i sar., 2020). Po definiciji, automatizacija predstavlja smanjenje direktne intervencije ljudi (farmera) u svakodnevnom životu životinja na farmi. Za mnoge autore i stručnjake, automatizacija je široko prihvaćena kao način da se farmeri oslobode barem dela ponavljajućeg i često fizički zahtevnog rada u stočarstvu (Lunner-Kolstrup i sar., 2018), čime se doprinosi poboljšanju njihove dobrobiti i smanjenju troškova rada.

Napredna stočarska tehnologija obuhvata širok spektar inovacija, uključujući preciznu poljoprivredu, analizu podataka, genetski inženjering i inteligentne sisteme upravljanja (Subach i Shmeleva, 2022). Ova dostignuća imaju za cilj rešavanje izazova sa kojima se suočava stočarska industrija, kao što su ishrana rastuće globalne populacije, smanjenje uticaja na životnu sredinu i obezbeđivanje dobrobiti životinja. Precizna poljoprivreda u oblasti stočarstva podrazumeva

stratešku primenu informacionih tehnologija, podataka o satelitskom pozicioniranju i senzorskih tehnologija (Confessore i sar., 2022). Ovi alati pomažu poljoprivrednicima da optimizuju upravljanje svojim resursima, od distribucije hrane do praćenja zdravlja životinja, sa ciljem maksimiziranja produktivnosti uz minimiziranje otpada i negativnog uticaja na životnu sredinu. Pojava analitike velikih podataka uvela je novu eru u stočarstvu. Alati za analizu podataka omogućavaju obradu velikih količina informacija prikupljenih iz različitih izvora, kao što su nosivi uređaji za praćenje životinja, senzori za praćenje uslova životne sredine i drugi digitalni sistemi za upravljanje farmama. Automatizovani roboti za mužu u štalamama za mlečne krave kontinuirano prikupljaju pokazatelje zdravstvenog stanja krava, dok precizni sistemi za hranjenje u živinarskim objektima pažljivo prilagođavaju obroke hrane na osnovu detaljnih podataka o rastu jata i zdravstvenim parametrima. Ove tehnologije dodatno podržavaju IoT (Internet stvari) senzori (Neethirajan, 2023), uređaji za daljinsko praćenje zdravlja, sistemi za kontrolu mikroklimе i veterinarske intervencije vođene veštačkom inteligencijom, što zajedno pokreće novu eru poznatu kao „pametna poljoprivreda” ili „Poljoprivreda 4.0”. Ovaj integrisani pristup povećava efikasnost proizvodnje, unapređuje dobrobit životinja, smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu i podstiče razvoj transparentnih lanaca snabdevanja „od farme do trpeze”.

Digitalni uređaji i sistemi za obezbeđenje biosigurnosti i dobrobiti životinja

Stočarski sektor se suočava sa brojnim izazovima, među kojima zarazne bolesti predstavljaju jedno od ključnih ograničenja zbog svog uticaja na morbiditet i mortalitet životinja, gubitke u proizvodnji i povećane troškove povezane sa upravljanjem bolestima (Brown i sar., 2021). Ova ograničenja su često povezana sa neadekvatnim upravljanjem stočarskom proizvodnjom, intenzivnim interakcijama između ljudi, životinja i životne sredine, kao i sa sve većom intenzifikacijom proizvodnje na malim stočarskim farmama. Zbog toga se na farmama u današnje vreme koriste različiti digitalni uređaji i sistemi za biosigurnost, koji pomažu u sprečavanju širenja bolesti, kontroli higijenskih uslova i praćenju zdravlja i dobrobiti životinja.

Intenzivno upravljanje farmskih životinja važno je za zadovoljavanje rastuće potražnje za animalnim proizvodima. Međutim, kompaktni i prenaseljeni uslovi u stočarskim objektima stvaraju izazove za poljoprivrednike u praćenju zdravlja i dobrobiti životinja. Rastući uticaji klimatskih promena dodatno će povećati prijemчивost životinja na bolesti, toplotni stres i druge zdravstvene rizike (Ndue i Pál, 2022). Shodno tome, biće sve veća potreba za brzim identifikovanjem zdravstvenih problema i epidemija bolesti, razumevanjem načina njihovog širenja i sprovođenjem preventivnih mera radi ublažavanja značajne ekonomske štete. Pored toga, rastuća zabrinutost za dobrobit životinja, transparentnost i ekološku održivost zajedno sa navedenim izazovima, dovela je do povećanog interesovanja za digitalizaciju stočarstva primenom PLF tehnologija (digitalne

tehnologije preciznog gajenja domaćih životinja) (Klerkx i sar., 2019). PLF tehnologije primenjuju tehnike procesnog inženjerstva za automatizaciju stočarstva. Ovo omogućava poljoprivrednicima da efikasno prate dobrobit i zdravlje velikih populacija životinja, brzo identifikuju probleme kod pojedinačnih jediniki, pa čak i da predvide moguće probleme analizom prethodnih podataka (Benjamin i Yik, 2019).

Nedavni razvoji PLF tehnologija obuhvataju različite primene, kao što su praćenje ponašanja krava, detekcija vokalizacija (npr. vriskova kod svinja), praćenje kašlja kod različitih životinja radi identifikacije respiratornih bolesti, kao i otkrivanje graviditeta kod goveda na osnovu promena telesne temperature. PLF tehnologije mogu pomoći poljoprivrednicima u praćenju zaraznih bolesti u stočarstvu, čime se povećavaju bezbednost i dostupnost hrane. Njihova primena može doprineti poboljšanju dobrobiti životinja, smanjenju problema u vezi sa bezbednošću hrane i efikasnijem korišćenju resursa (Norton i sar., 2019).

Pametni poljoprivredni sistemi predstavljaju koncept koji kombinuje različite tehnologije u cilju unapređenja i prevazilaženja izazova u stočarskoj proizvodnji. Ovi sistemi obuhvataju primenu senzora, komunikacionih i nadzornih sistema, robotike i veštačke inteligencije (Kopler i sar., 2023).

Pametni poljoprivredni sistemi i PLF predstavljaju dva međusobno povezana koncepta koji koriste napredne tehnologije za optimizaciju upravljanja proizvodnjom svinja, kao i za unapređenje njihove dobrobiti i zdravlja. Ovi koncepti zasnivaju se na primeni tehnologija kao što su Internet stvari, veštačka inteligencija i napredna analiza podataka u realnom vremenu. Iako imaju slične ciljeve, PLF i pametni poljoprivredni sistemi imaju različite oblasti primene. PLF, na primer, koristi širok spektar tehnologija (Schillings i sar., 2021; Schillings i sar., 2023), dok se pametni sistemi najčešće fokusiraju na određene segmente proizvodnje i uglavnom primenjuju sisteme za praćenje zasnovane na veštačkoj inteligenciji (Hasan i sar., 2024).

Glavne prepreke u efikasnom praćenju dobrobiti životinja su tri osnovna elementa: troškovi, pouzdanost i vreme posmatranja. Većina postojećih strategija je definisana kao dugotrajna, zahteva značajnu količinu rada i stoga je skupa (Jorquera-Chavez i sar., 2019). Farmeri često zavise od zapažanja kako bi identifikovali probleme sa zdravljem i dobrobiti životinja. Međutim, brojni komercijalni objekti imaju značajan disbalans između broja farmera i broja životinja. Na primer, na komercijalnoj farmi svinja, odnos farmera i svinja je često 1:300 (Benjamin i Yik, 2019). Čak i najpažljiviji i najveštiji farmer mogu propustiti da primete životinje u kritičnom stanju. Programi revizije treće strane pružaju detaljne procene nege životinja, ali su često skupi i dugotrajni.

Implementacija PLF tehnologija, naime biometrijskih senzora, omogućila bi farmerima da prate dobrobit životinja u realnom vremenu sa tačnošću, objektivnošću i regularnošću. Ovo bi olakšalo rano otkrivanje problema i blagovremenu primenu preventivnih mera kako bi se izbegli ozbiljni problemi. PLF tehnologije pružaju neinvazivno uzorkovanje, omogućavajući poljoprivrednicima i

istraživačima da prikupe tačna merenja koja se mogu koristiti za rešavanje problema dobrobiti životinja (Jorquera-Chavez i sar., 2019). PLF tehnologije imaju potencijal da smanje upotrebu resursa, posebno antibiotika.

IMPLEMENTACIJA TEHNOLOGIJE

1. Identifikacija životinja – RFID i elektronske identifikacione oznake

Uređaj za radiofrekventni identifikator (RFID) jedan je od najčešće korišćenih uređaja za individualnu identifikaciju životinja. Koristi radio talase za prenos podataka između uređaja i oznake, omogućavajući brzu i tačnu identifikaciju svake pojedinačne životinje (Thölke i Wolf, 2022). RFID transponderi mogu biti skriveni u ušnim oznakama, ogrlicama, ubrizgani u vrat ili oralno primenjeni bolusi. Međutim, primena RFID oznaka povezana je sa značajnim nedostacima. Jedan od njih je bol i stres koji mogu nastati prilikom pričvršćivanja oznaka na svinje. Pored toga, RFID oznake se mogu oštetiti ili izgubiti tokom vremena, što ih čini beskorisnim za predviđene svrhe praćenja (Gómez i sar., 2021). Takođe, jedan od glavnih nedostataka RFID tehnologije je njen ograničeni operativni domet do 100m (Curran i Norrby, 2009).

Sa druge strane, kada je reč o biosigurnosti, RFID omogućava preciznu i pouzdanu identifikaciju svake jedinke. Svaka životinja dobija jedinstveni elektronski identifikator, čime se smanjuje mogućnost grešaka u evidenciji (Marić i sar., 2025). Ova tehnologija takođe omogućava praćenje kretanja životinja i njihovih međusobnih kontakata, što je od ključnog značaja u slučaju pojave zaraznih bolesti. U situacijama epidemije, RFID sistemi omogućavaju brzu identifikaciju zaraženih i rizičnih životinja, kao i efikasno sprovođenje mera poput izolacije i karantina. Pored toga, obezbeđuje se potpuna sledljivost proizvoda „od farme do trpeze”, što povećava bezbednost hrane i poverenje potrošača.

Sa aspekta dobrobiti životinja, RFID tehnologija smanjuje potrebu za fizičkim rukovanjem životinjama, čime se smanjuje stres i rizik od povreda. Integracijom sa savremenim sistemima za nadzor, omogućeno je kontinuirano praćenje zdravstvenog stanja, uključujući parametre kao što su aktivnost, unos hrane i telesna temperatura. Ovo omogućava rano otkrivanje bolesti i pravovremenu reakciju (Herlin i sar., 2021). Takođe, RFID omogućava individualizovan pristup ishrani i nezi, jer automatizovani sistemi mogu prepoznati svaku životinju i prilagoditi tretman njenim potrebama. Praćenje reproduktivnog ciklusa dodatno doprinosi boljem upravljanju stadom i unapređenju ukupnog zdravlja životinja.

2. Globalni navigacioni satelitski sistemi (GNSS) i globalni sistem za pozicioniranje (GPS)

Globalni navigacioni satelitski sistemi (GNSS) oslanjaju se na radio signale sa specijalizovanih satelita dostupnih u datom trenutku pozicioniranja. GNSS, kao što je globalni sistem za pozicioniranje (GPS), koristi se više od 30 godina

za praćenje domaćih životinja. Ekolozi su ih koristili za praćenje i nadgledanje bihevioralne ekologije životinja koje se slobodno kreću, ali i za praćenje kretanja krava na pašnjacima (Liao, i sar., 2018). GNSS sistemi najbolje funkcionišu na otvorenom prostoru, gde postoji neometana linija vidljivosti prema satelitima. Međutim, slabljenje radio-signala usled prepreka, kao što su zidovi i objekti, dovodi do slabijih performansi standardnih GNSS prijemnika u zatvorenim prostorima. Ipak, razvoj novih tehnologija koje pojačavaju GNSS signal u zatvorenom prostoru ukazuje na potencijal za unapređenje njegove primene i u takvim uslovima. Jedan od izazova u primeni GNSS tehnologije jeste smanjena tačnost usled slabog signala, kao i pojava grešaka u određivanju položaja, naročito kada su životinje neaktivne, poput krava tokom odmora (Hofstra i sar., 2022).

Sa aspekta biosigurnosti, GPS sistemi omogućavaju precizno praćenje lokacije svake životinje. Na taj način farmeri mogu brzo uočiti neuobičajena kretanja, kao što su bekstvo iz ograđenog prostora ili kontakt sa drugim stadima, što može predstavljati rizik za širenje zaraznih bolesti (McIntosh i sar., 2022). U slučaju pojave bolesti, podaci o kretanju omogućavaju identifikaciju potencijalno zaraženih jedinki i područja koja su bila u kontaktu, što olakšava sprovođenje mera kontrole i sprečavanje daljeg širenja infekcije. Takođe, GPS sistemi doprinose zaštiti od krađe i gubitka životinja, što je posebno značajno u ekstenzivnom uzgoju.

Kada je reč o dobrobiti životinja, GPS ogrlice omogućavaju praćenje njihovog ponašanja i aktivnosti, kao što su kretanje, odmor i ispaša (De Weerd i sar., 2015; McIntosh i sar., 2022). Promene u obrascima ponašanja mogu ukazivati na zdravstvene probleme, stres ili povrede, što omogućava pravovremenu reakciju i intervenciju. Ovi sistemi takođe pomažu u optimizaciji uslova držanja, jer farmeri mogu analizirati kako životinje koriste prostor i resurse, poput pašnjaka i vode. Na osnovu tih podataka moguće je unaprediti organizaciju ispaše i smanjiti pritisak na određene delove zemljišta, čime se poboljšava i životna sredina i kvalitet života životinja.

3. Senzori kvaliteta životne sredine (IoT senzori)

Odgovarajući uslovi životne sredine u smeštaju za stoku su neophodni za obezbeđivanje dobrobiti i produktivnosti životinja (Qi i sar., 2023). Trenutno se pažnja posvećuje faktorima životne sredine, posebno u vezi sa klimatskim promenama, jer povećana temperatura, koncentracije čestica i amonijaka (NH_3) mogu negativno uticati na životinje (Ma i sar., 2023). Glavni faktori koji se razmatraju su temperatura, vlažnost i u nekim slučajevima, brzina vazduha, ali uslovi životne sredine u smeštaju za stoku treba da uključuju i faktore kao što su intenzitet svetlosti, koncentracije gasova i nivoi buke (Provolo i sar., 2025).

Senzori za životnu sredinu na farmama stoke igraju ključnu ulogu u praćenju klimatskih i ekoloških uslova, uključujući temperaturu, vlažnost i kvalitet vazduha. Podaci dobijeni sa ovih senzora olakšavaju održavanje optimalne mikroklimе za dobrobit i zdravlje stoke, smanjujući rizik od toplotnog stresa i drugih problema povezanih sa klimom.

Parametri poput koncentracije štetnih gasova (amonijak, ugljen-dioksid), temperature i vlažnosti vazduha direktno utiču na zdravlje životinja i mogu doprineti razvoju respiratornih i drugih bolesti. Pravovremeno detektovanje odstupanja od optimalnih vrednosti omogućava brzu reakciju, poput ventilacije prostora ili prilagođavanja grejanja i hlađenja, čime se smanjuje rizik od širenja bolesti. Na taj način, IoT sistemi doprinose održavanju stabilnog i bezbednog okruženja u objektima.

Kada je reč o dobrobiti životinja, optimalni mikroklimatski uslovi su od ključnog značaja za njihov rast, produktivnost i opšte zdravstveno stanje. IoT senzori omogućavaju automatsko upravljanje uslovima u objektu, čime se obezbeđuje konstantna temperatura i kvalitet vazduha prilagođen potrebama životinja. Na primer, sprečavanje pregrevanja direktno smanjuje stres kod životinja, dok adekvatna ventilacija smanjuje prisustvo štetnih gasova i poboljšava kvalitet disanja. Toplotni stres remeti homeostazu životinja zbog prekomerne temperature, što rezultira višom telesnom temperaturom od normalne i povećanim respiratornim i srčanim ritmom (Yan i sar., 2021). Ovo stanje utiče na različite fiziološke funkcije, uključujući metabolizam, endokrini sistem, imuni sistem i reprodukciju. Na osnovu istraživanja mnogih autora toplotni stres značajno utiče na metabolizam i imunološku funkciju životinja, što dovodi do pada opšteg zdravlja i produktivnosti (Das i sar., 2016; Yan i sar., 2021). Kontinuirano prikupljanje podataka takođe omogućava analizu i optimizaciju uslova držanja, što dugoročno doprinosi poboljšanju dobrobiti i profitabilnosti farme.

4. Nosivi biosenzori

Nosivi biosenzori predstavljaju naprednu tehnologiju koja omogućava kontinuirano praćenje bihevioralnih parametara životinja u realnom vremenu. Ovi uređaji koji se najčešće postavljaju kao ogrlice, narukvice ili implantati, koriste najsavremenije senzore, uključujući akcelerometre, RFID oznake, GPS prijemnike, mikrofone, žiroskope i magnetometre, kako bi obezbedili neinvazivan uvid u realnom vremenu (Lamanna i sar., 2025). Na taj način doprinose unapređenju dobrobiti životinja, optimizaciji korišćenja resursa i podršci donošenju odluka u upravljanju stočarskom proizvodnjom. Akcelerometri postavljeni na ogrlicama oko vrata široko se koriste za detekciju aktivnosti krava, položaja tela i pokreta glave (Shen i sar., 2021). Senzori za lokalizaciju (zasnovani, na primer, na GPS tehnologiji) često se kombinuju sa akcelerometrima radi praćenja položaja životinja i nadzora prostornog kretanja stada (Cabezas i sar., 2022). Žiroskopi i magnetometri, takođe postavljeni u predelu vrata, pružaju dodatne informacije o ugaonim kretanjima i orijentaciji glave (Li i sar., 2022). Pored toga, vokalizacija životinja može se pratiti pomoću mikrofona pričvršćenih za ogrlicu. Identifikacija krava može se efikasno obaviti upotrebom RFID oznaka integrisanih u ogrlicu (Lamanna i sar., 2025).

Sa aspekta biosigurnosti, nosivi biosenzori omogućavaju rano otkrivanje zdravstvenih problema i potencijalnih zaraznih bolesti. Praćenjem parametara

kao što su telesna temperatura, srčana frekvencija, nivo aktivnosti i unos hrane, moguće je uočiti odstupanja od normalnog stanja još u ranim fazama bolesti (Benaissa i sar., 2023). To omogućava brzu intervenciju, izolaciju obolelih jedinki i sprečavanje širenja infekcija unutar stada. Kontinuirani nadzor smanjuje potrebu za čestim fizičkim pregledima, čime se dodatno smanjuje rizik od prenosa patogena.

U pogledu dobrobiti životinja, biosenzori doprinose boljem razumevanju njihovog ponašanja i potreba. Analiza podataka o kretanju, odmoru i ishrani omogućava pravovremeno prepoznavanje stresa, bola ili nelagodnosti. Hromost kod krava može se detektovati i pomoću podloga sa senzorima pritiska, koje su sposobne da uoče promene u koraku i raspodeli telesne težine, što predstavlja ključne indikatore potencijalnih problema sa papcima (Van Nuffel i sar., 2016). Senzori omogućavaju prenos podataka u realnom vremenu, što farmerima omogućava blagovremenu reakciju i intervenciju kada je to potrebno. Ovakav pristup praćenju ponašanja doprinosi poboljšanju produktivnosti i dobrobiti životinja, kao i efikasnijem donošenju odluka (Liu i sar., 2023). Za ovu svrhu postoji više vrsta senzora, koji su najčešće integrisani u ogrlice, trake za noge ili ušne marke. Pedometri su elektronski uređaji koji se pričvršćuju za nogu krave i beleže njeno kretanje. Sa svakim korakom koji životinja napravi, uređaj povećava brojčani u internom memoriji. Ukupni dnevni broj koraka, zajedno sa identifikacionim kodom krave, prenosi se na prijemnik nakon što se životinja identifikuje putem antene u štali. Takođe, ovi sistemi omogućavaju individualizovan pristup nezi i ishrani, jer se svaka životinja prati zasebno. Time se obezbeđuje optimalan nivo brige i poboljšava ukupno zdravstveno stanje životinja (Lamanna i sar., 2025).

5. Automatski sistemi za hranjenje (AFS)

Hranjenje predstavlja značajno finansijsko opterećenje za farme mlečnih goveda, čineći do 50% ukupnih operativnih troškova, i drugi je najzahtevniji zadatak po utrošku vremena, odmah nakon muže. Automatizacija procesa hranjenja uglavnom podrazumeva primenu automatskih hranilica za koncentrovanu hranu kod krava i svinja, kako bi se nadoknadili nutritivni nedostaci koji se ne mogu u potpunosti obezbediti potpuno mešanim obrocima. Istovremeno, automatski sistemi za ishranu teladi omogućavaju da svaka jedinka dobije precizno odmeren obrok prilagođen svojim nutritivnim potrebama (Lamanna i sar., 2025). Nedavna istraživanja pokazala su da primena ove tehnologije može smanjiti zavisnost od fizičkog rada i povećati fleksibilnost radnog rasporeda (Tangorra i sar., 2020). Takođe, doprinosi povećanju aktivnosti hranjenja kod krava, većem unosu suve materije i podsticanju prirodnog ponašanja u ishrani, obezbeđujući češće i ravnomernije obroke (Pompe i sar., 2007). Primena ovih tehnologija smanjuje vreme potrebno za pripremu i distribuciju hrane, dok istovremeno unapređuje mogućnost praćenja zdravstvenog stanja pojedinačnih krava i teladi. Andretta i sar., (2016) su otkrili da precizno hranjenje tovnih svinja ima uticaj na izlučivanje azota i lizina. Autori su izvestili o smanjenju unosa lizina

za 26% i smanjenju izlučivanja azota za 30%. Precizno hranjenje povećava produktivnost životinja, ima veliki pozitivan efekat na životnu sredinu i poboljšava ekonomsku održivost

Sa aspekta biosigurnosti, AFS sistemi smanjuju potrebu za direktnim kontaktom između ljudi i životinja, čime se umanjuje rizik od unošenja i širenja patogena u objektu. Automatizovana distribucija hrane omogućava kontrolu kvaliteta i količine hrane, čime se sprečava kontaminacija i obezbeđuje zdravstvena ispravnost obroka. Pored toga, precizno doziranje i evidencija unosa hrane omogućavaju rano uočavanje odstupanja u ponašanju životinja, što može biti indikator zdravstvenih problema (Vlaicu i sar., 2024).

U pogledu dobrobiti životinja, automatski sistemi za hranjenje omogućavaju individualizovan pristup ishrani, prilagođen potrebama svake životinje. Redovna i ujednačena dostupnost hrane smanjuje stres, konkurenciju i agresivno ponašanje među jedinkama. Takođe, optimalan unos hrane doprinosi boljem zdravlju, produktivnosti i reproduktivnim performansama. Savremeni AFS sistemi često su povezani sa senzorima i softverom za praćenje, što omogućava kontinuiranu analizu podataka i dodatnu optimizaciju ishran (Vlaicu i sar., 2024).

6. Termalne kamere

Poslednjih decenija, studije su se fokusirale na dobijanje pouzdanih podataka o telesnoj temperaturi bez značajne manipulacije životinjom. Kao rezultat toga, rektalno određivanje telesne temperature kod svinja se sve manje koristi, posebno u intenzivnim sistemima uzgoja. Zhang i sar., (2019) su otkrili da je jedna od najekonomičnijih i najefikasnijih metoda upotreba infracrvene tehnologije, koja omogućava kontinuirano praćenje termičkog biološkog odgovora ili termičkih promena u telu životinje. To je beskontaktna, neinvazivna metoda zasnovana na principu detekcije infracrvenog zračenja i njegovog pretvaranja u električne impulse. Rezultati su termalne slike koje prikazuju raspodelu temperature površine tela (Chem i sar., 2022). Termovizijske kamere se koriste u različitim oblastima proizvodnje svinja, npr. za otkrivanje bolesti i estrus (Lee i sar., 2019), za praćenje zdravlja i dobrobiti (Papadopoulos i sar., 2025) i za merenje telesne temperature bez upotrebe rektalnog termometra (Zhang i sar., 2024). Prednosti korišćenja termalnih kamera su visoka tačnost temperature, stabilnost i jednostavnost sistema. Rektalna termometrija i termometrija sa ugrađenim temperaturnim senzorima su konvencionalne metode za praćenje temperature kod svinja, ali imaju nekoliko nedostataka (Zhang i sar., 2024). Njihova upotreba povećava rizik od prenosa bolesti putem opreme ili uređaja i istovremeno povećava fiziološki odgovor na stres, uzrokujući nelagodnost i ugrožavajući dobrobit životinja. Ove kamere se mogu instalirati u robote za kontinuirano praćenje temperature svih životinja. Još jedan inovativni instrument je iBut-tonne®, samostalni sistem za merenje i snimanje temperature i vlažnosti. Može se pričvrstiti na identifikacionu oznaku na uhu svake životinje, uspostavljajući direktan kontakt sa unutrašnjim uhom, koje je osetljivo na temperaturne fluktuacije, obezbeđujući visoku

tačnost merenja (Sánchez-Giménez i sar., 2024). Postoje i različiti implantabilni i nosivi uređaji, kao što su potkožno primenjeni mikročipovi ili senzori ugrađeni u ušne oznake, koji nude visoku preciznost uz kontinuirano prikupljanje podataka (Himu i Raihan, 2024).

Sa aspekta biosigurnosti, termalne kamere omogućavaju rano otkrivanje bolesti, jer povećanje telesne temperature često predstavlja jedan od prvih simptoma infekcije (Noh i sar., 2021). Kontinuirano praćenje temperature omogućava brzu identifikaciju potencijalno obolelih jedinki i njihovu pravovremenu izolaciju, čime se smanjuje rizik od širenja zaraznih bolesti u stadu. Pored toga, ova tehnologija smanjuje potrebu za fizičkim kontaktom sa životinjama, što dodatno doprinosi smanjenju prenosa patogena (McManus i sar., 2022).

U pogledu dobrobiti životinja, termalne kamere omogućavaju praćenje stresa, povreda i upalnih procesa. Lokalizovane promene temperature mogu ukazivati na zapaljenja, povrede ili probleme kao što je mastitis kod mlečnih krava (McManus i sar., 2022). Takođe, praćenje temperature pomaže u otkrivanju toplotnog stresa, što je od velikog značaja u uslovima visokih temperatura. Važno je prepoznati uticaj klimatskih promena, koje povećavaju izloženost životinja bolestima, toplotnom stresu i brojnim zdravstvenim rizicima. Jedan od glavnih uzroka toplotnog stresa kod svinja je njihova ograničena sposobnost termoregulacije. Ekstremne temperature dovode do pregrevanja njihovog tela, što ima brojne negativne posledice i za životinje i za proizvođače. Upotreba pametnih tehnologija za praćenje unosa hrane, telesne temperature, brzine disanja i pokretljivosti životinja može pomoći u sprečavanju toplotnog stresa i direktno poboljšati dobrobit i produktivnost životinja (Papadopoulos i sar., 2025). Pravovremena reakcija na ove promene doprinosi smanjenju bola i nelagodnosti kod životinja i poboljšava njihovo opšte zdravstveno stanje. Praćenje fluktuacija telesne temperature je od velikog značaja za obezbeđivanje optimalnih reproduktivnih performansi, jer povećava stopu uspeha veštačkog osemenjavanja (Chung i sar., 2010). Prema Sharifuzzaman i sar., (2024), reproduktivni neuspeh zbog neprepoznatog estrusa jedan je od glavnih uzroka izlučivanja krmača. Pouzdano otkrivanje estrusa je moguće praćenjem telesne temperature, obrazaca kretanja i promena u ponašanju, uključujući vokalizacije i aktivnost.

7. Automatski sistemi za dezinfekciju

Tradicionalne farme svinja uglavnom koriste mašine za čišćenje objekata i životinja, koje se zasnivaju na ručnim ili poluautomatskim metodama rada. Ovakvi sistemi nemaju visok stepen automatizacije, inteligencije i efikasnosti, a njihove funkcije su ograničene. Tokom njihove primene često se javljaju sledeći problemi:

- a) Visoki troškovi rada – pranje svinja, čišćenje objekata i dezinfekcija zahtevaju značajan angažman radne snage, što povećava troškove i dovodi do neefikasnog korišćenja ljudskih resursa.

- b) Nepotpuno čišćenje – zbog ograničenja ručnog rada, teško je obezbediti temeljno i ujednačeno čišćenje svih površina.
- c) Rasipanje vodnih resursa – tradicionalne metode čišćenja često podrazumevaju prekomernu potrošnju vode, kao i neracionalnu upotrebu sredstava za čišćenje.
- d) Otežano određivanje ciklusa čišćenja – ove metode imaju nisku efikasnost i ne omogućavaju pravovremeno praćenje promena u okruženju. Zbog toga su ciklusi čišćenja najčešće fiksni i ne mogu se prilagoditi stvarnim potrebama u objektu.

Kako bi se poboljšao nivo čišćenja životinja i farmi, rešili problem kao što su troškovi rada i rasipanja vode, razvijeni su inteligentni integrisani sistemi za pranje i dezinfekciju, prilagođeni savremenim uslovima stočarske proizvodnje. Ovaj sistem koristi pokretne mlaznice za precizno usmeravanje procesa čišćenja, dok integrisani inteligentni sistem upravljanja omogućava automatizovanu kontrolu i praćenje celokupnog procesa pranja i dezinfekcije (Wang i Gu, 2024). Prednosti ovog sistema su višestruke:

- a) Smanjenje potrebe za radnom snagom – primenom elektronske kontrole omogućeno je inteligentno i automatizovano čišćenje, čime se značajno smanjuje angažovanje ljudskog rada.
- b) Potpuna pokrivenost prostora – sistem omogućava istovremen rad više mlaznica, čime se obezbeđuje efikasno čišćenje i dezinfekcija, uključujući i teško dostupna mesta.
- c) Racionalno korišćenje resursa – precizna kontrola protoka vode, pritiska i koncentracije dezinfekcionog sredstva smanjuje nepotrebnu potrošnju.
- d) Inteligentno upravljanje ciklusima – sistem automatski podešava cikluse pranja i dezinfekcije na osnovu detektovanih promena u okruženju, omogućavajući prilagođavanje realnim potrebama.
- e) Višenamenska funkcija – pored pranja i dezinfekcije, sistem poseduje i funkciju zaštite od požara, što ga čini ekonomičnim i praktičnim rešenjem.

Inteligentni integrisani sistem pranja i dezinfekcije predstavlja bezbedno, efikasno i ekološki prihvatljivo rešenje za savremene farme (npr. svinja, živine), jer objedinjuje funkcije pranja, dezinfekcije i protivpožarne zaštite u jedan sistem (Wang i Gu, 2024).

Sa aspekta biosigurnosti, automatski sistemi za dezinfekciju značajno smanjuju rizik od unošenja i širenja patogena. Oni se primenjuju na ulazima u objekte, u zonama za prolaz životinja, kao i na opremi i vozilima. Automatizacija procesa obezbeđuje doslednu i pravilnu primenu dezinfekcije, čime se izbegavaju propusti koji se mogu javiti kod ručne primene. Redovna i efikasna dezinfekcija doprinosi smanjenju prisustva mikroorganizama u okruženju i sprečavanju pojave zaraznih bolesti.

U pogledu dobrobiti životinja, ovi sistemi doprinose održavanju čistog i zdravog okruženja, što direktno utiče na smanjenje stresa i pojave bolesti. Smanjeno prisustvo patogena u objektu znači manji rizik od infekcija, posebno kod

osetljivih kategorija kao što su telad ili životinje u laktaciji. Pored toga, automatizovani sistemi omogućavaju primenu dezinfekcionih sredstava u kontrolisanim količinama, čime se izbegava prekomerna upotreba hemikalija i potencijalni negativni uticaji na zdravlje životinja.

ZAKLJUČAK

Širom sveta, dalji razvoj sistema preciznog stočarstva (PLF) doprinosi poboljšanju uslova držanja farmskih životinja, povećanju kvaliteta proizvoda, smanjenju emisije ugljenika po životinji, kao i značajnim uštedama energije u pogledu unosa hrane, njene konverzije i rasta. Ovaj napredak treba da bude praćen kontinuiranom edukacijom poljoprivrednika, kako bi primena novih tehnologija bila razumljivija i dostupnija u praksi. Ubrzan razvoj digitalnih tehnologija transformiše stočarsku proizvodnju, čineći je održivom i pozitivno utičući na dobrobit, zdravlje i produktivnost životinja. Prikupljanje i analiza podataka u realnom vremenu tokom proizvodnog procesa omogućavaju donošenje pravovremenih odluka, što dovodi do efikasnijeg upravljanja i boljih proizvodnih rezultata. Saradnja između poljoprivrednika, istraživača i stručnjaka iz oblasti interneta stvari (IoT) ključna je za uspešnu primenu ovih tehnologija, čime se obezbeđuje njihova praktičnost, ekonomska isplativost i dugoročna održivost.

Zahvalnica

Rad je podržan sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor broj 451-03-34/2026-03/200143).

LITERATURA

1. Andretta, I., Pomar, C., Kipper, M., Hauschild, L., Rivest, J. (2016). Feeding behavior of growing–finishing pigs reared under precision feeding strategies. *J. Anim. Sci.* 94, 3042–3050.
2. Benaissa, S., Tuytens, F.A.M., Plets, D., Martens, L., Vandaele, L., Joseph, W., Sonck, B. (2023). Improved cattle behaviour monitoring by combining ultra-wideband location and accelerometer data. *Animal*. 17, 100730.
3. Benjamin, M., Yik, S. (2019). Precision livestock farming in swine welfare: a review for swine practitioners. *Animals*. 9, 133.
4. Brown, V.R., Miller, R.S., McKee, S.C., et al. (2021). Risks of introduction and economic consequences associated with African swine fever, classical swine fever and foot-and-mouth disease: a review of the literature. *Transbound. Emerg. Dis.* 68, 1910–1965.
5. Buller, H., Blokhuis, H., Lokhorst, K., Silberberg, M., Veissier, I. (2020). Animal welfare management in a digital world. *Animals*. 10, 1779.
6. Cabezas, J., Yubero, R., Visitación, B., Navarro-García, J., Algar, M.J., Cano, E.L., Ortega, F. (2022). Analysis of accelerometer and GPS data for cattle behaviour identification and anomalous events detection. *Entropy*. 24, 336.
7. Chem, V., Mun, H.S., Ampode, K.M.B., Mahfuz, S., Chung, I.B., Dilawar, M.A., Yang, C.J. (2022). Heat detection of gilts using digital infrared thermal imaging camera. *Adv. Anim. Vet. Sci.* 10, 2142–2147.
8. Chung, T.H., Jung, W.S., Nam, E.H., Kim, J.H., Park, S.H., Hwang, C.Y. (2010). Comparison of rectal and infrared thermometry for obtaining body temperature of gnotobiotic piglets in conventional portable germ free facility. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 23, 1364–1368.

9. Confessore, A., Sirtori, B., Pugliese, C. (2022). Precision livestock farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal*. 16, 100429.
10. Curran, K., Norrby, S. (2009). RFID-enabled location determination within indoor environments. *Int. J. Ambient Comput. Intell.* 1, 63–86.
11. Das, R., Sailo, L., Verma, N., Bharti, P., Saikia, J., Imtiwati Kumar, R. (2016). Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: a review. *Vet. World*. 9, 260.
12. De Weerd, N., Van Langevelde, F., Van Oeveren, H., Nolet, B.A., Kölzsch, A., Prins, H.H.T., De Boer, W.F. (2015). Deriving animal behaviour from high-frequency GPS: tracking cows in open and forested habitat. *PLoS ONE*. 10, e0129030.
13. Gómez, Y., Stygar, A.H., Boumans, I.J., Bokkers, E.A., Pedersen, L.J., Niemi, J.K., Llonch, P. (2021). A systematic review on validated precision livestock farming technologies for pig production and its potential to assess animal welfare. *Front. Vet. Sci.* 8, 660565.
14. Hasan, M.K., Mun, H.S., Ampode, K.M.B., Lagua, E.B., Park, H.R., Kim, Y.H., Yang, C.J. (2024). Transformation toward precision large-scale operations for sustainable farming: A review based on China's pig industry. *J. Adv. Vet.* 11, 1076.
15. Herlin, A., Brunberg, E., Hultgren, J., Högborg, N., Rydberg, A., Skarin, A. (2021). Animal welfare implications of digital tools for monitoring and management of cattle and sheep on pasture. *Animals*. 11, 829.
16. Himu, H.A., Raihan, A. (2024). Digital transformation of livestock farming for sustainable development. *J. Vet. Med.* 1, 1–8.
17. Hofstra, G., Roelofs, J., Rutter, S.M., van Erp-van der Kooij, E., de Vlieg, J. (2022). Mapping welfare: location determining techniques and their potential for managing cattle welfare—A review. *Dairy*. 3, 776–788.
18. Jorquera-Chavez, M., Fuentes, S., Dunshea, F.R., Jongman, E.C., Warner, R.D. (2019). Computer vision and remote sensing to assess physiological responses of cattle to pre-slaughter stress, and its impact on beef quality: A review. *Meat Sci.* 156, 11–22.
19. Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: new contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen J. Life Sci.* 90, 100315.
20. Kopler, I., Marchaim, U., Tikász, I.E., Opaliński, S., Kokin, E., Mallinger, K., Banhazi, T. (2023). Farmers' perspectives of the benefits and risks in precision livestock farming in the EU pig and poultry sectors. *Animals*. 13, 2868.
21. Lamanna, M., Bovo, M., Cavallini, D. (2025). Wearable collar technologies for dairy cows: a systematized review of the current applications and future innovations in precision livestock farming. *Animals*. 15, 45.
22. Lee, J.H., Lee, D.H., Yun, W., Oh, H.J., An, J.S., Kim, Y.G., Cho, J.H. (2019). Quantifiable and feasible estrus detection using the ultrasonic sensor array and digital infrared thermography. *J. Anim. Sci. Technol.* 61, 163.
23. Li, Y., Shu, H., Bindelle, J., Xu, B., Zhang, W., Jin, Z., Guo, L., Wang, W. (2022). Classification and analysis of multiple cattle unitary behaviours and movements based on machine learning methods. *Animals*. 12, 1060.
24. Liao, C., Clark, P.E., Shibia, M., DeGloria, S.D. (2018). Spatiotemporal dynamics of cattle behavior and resource selection patterns on East African rangelands: evidence from GPS-tracking. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 32, 1523–1540.
25. Liu, N., Qi, J., An, X., Wang, Y. (2023). A review on information technologies applicable to precision dairy farming: focus on behavior, health monitoring, and the precise feeding of dairy cows. *Agriculture*. 13, 1858.
26. Lunner-Kolstrup, C., Hörndahl, T., Karttunen, J.P. (2018). Farm operators' experiences of advanced technology and automation in Swedish agriculture: a pilot study. *J. Agromed.* 23, 215–226.
27. Ma, H., Xie, Y., Li, A., Zhang, T., Liu, Y., Luo, X. (2023). A review on the effect of light-thermal-humidity environment in sow houses on sow reproduction and welfare. *Reprod. Domest. Anim.* 58, 1023–1045.

28. Marić, K., Gvozdanović, K., Djurkin Kušec, I., Kušec, G., Margeta, V. (2025). Smart pig farms: integration and application of digital technologies in pig production. *Agriculture*. 15, 937.
29. McIntosh, M.M., Cibils, A.F., Estell, R.E., Gong, Q., Cao, H., Gonzalez, A.L., Nyamuryekung'e, S., Spiegal, S.A. (2022). Can cattle geolocation data yield behavior-based criteria to inform precision grazing systems on rangeland? *Livest. Sci.* 255, 104801.
30. McManus, R., Boden, L.A., Weir, W., Viora, L., Barker, R., Kim, Y., McBride, P., Yang, S. (2022). Thermography for disease detection in livestock: a scoping review. *Front. Vet. Sci.* 9, 965622.
31. Ndue, K., Pál, G. (2022). Life cycle assessment perspective for sectoral adaptation to climate change: environmental impact assessment of pig production. *Land*. 11, 827.
32. Neethirajan, S. (2023). Artificial intelligence and sensor technologies in dairy livestock export: charting a digital transformation. *Sensors*. 23, 7045.
33. Noh, J.Y., Kim, K.J., Lee, S.H., Kim, J.B., Kim, D.H., Youk, S., Song, C.S., Nahm, S.S. (2021). Thermal image scanning for the early detection of fever induced by highly pathogenic avian influenza virus infection in chickens and ducks and its application in farms. *Front. Vet. Sci.* 8, 616755.
34. Norton, T., Chen, C., Larsen, M.L.V., Berckmans, D. (2019). Precision livestock farming: building 'digital representations' to bring the animals closer to the farmer. *Animal*. 13, 3009–3017.
35. Papadopoulos, G., Papantonatou, M.Z., Uyar, H., Kriezi, O., Mavrommatis, A., Psiroukis, V., Kasimati, A., Tsiplakou, E., Fountas, S. (2025). Economic and environmental benefits of digital agricultural technological solutions in livestock farming: a review. *Smart Agric. Technol.* 10, 100783.
36. Pompe, J.C.A.M., Alders, D.H.J., Heutinck, L.F.M., Lokhorst, C. (2007). Automatic individual feeding systems for dairy cows: observations of facility utilization. In: Cox, S. (Ed.), *Precision Livestock Farming*. Wageningen Academic Publishers, Skiathos, Greece, pp. 45–51.
37. Provolo, G., Brandolese, C., Grotto, M., Marinucci, A., Fossati, N., Ferrari, O., Beretta, E., Riva, E. (2025). An Internet of Things framework for monitoring environmental conditions in livestock housing to improve animal welfare and assess environmental impact. *Animals*. 15, 644.
38. Qi, F., Zhao, X., Shi, Z., Li, H., Zhao, W. (2023). Environmental factor detection and analysis technologies in livestock and poultry houses: a review. *Agriculture*. 13, 1489.
39. Sánchez-Giménez, P., Martínez-Nicolas, A., Madrid, J.A., Fernández, R., Martínez-Alarcón, L., Murciano, F., Munoz, A., Ramis, G. (2024). Circadian temperature rhythm in breeding sows: differences between days in oestrus and anoestrus after weaning. *Porc. Health Manag.* 10, 20.
40. Schillings, J., Bennett, R., Rose, D.C. (2021). Exploring the potential of precision livestock farming technologies to help address farm animal welfare. *Front. Anim. Sci.* 2, 639678.
41. Schillings, J., Bennett, R., Wemelsfelder, F., Rose, D.C. (2023). Digital livestock technologies as boundary objects: investigating impacts on farm management and animal welfare. *Anim. Welf.* 32, e17.
42. Sharifuzzaman, M., Mun, H.S., Ampode, K.M.B., Laguna, E.B., Park, H.R., Kim, Y.H., Hasan, M.K., Yang, C.J. (2024). Technological tools and artificial intelligence in estrus detection of sows—a comprehensive review. *Animals*. 14, 471.
43. Shen, W., Sun, Y., Zhang, Y., Fu, X., Hou, H., Kou, S., Zhang, Y. (2021). Automatic recognition method of cow ruminating behaviour based on edge computing. *Comput. Electron. Agric.* 191, 106495.
44. Subach, T.I., Shmeleva, Z.N. (2022). Introduction of digital innovations in livestock farming. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1112, 012079.
45. Tangorra, F.M., Agazzi, A., Perricone, V., Costa, A. (2020). Precision feeding e automazione. In: Ronchi, G., Savoini, M., Marinucci, T. (Eds.), *Manuale di Nutrizione dei Ruminanti da Latte*. Edises Università, Napoli, Italy, pp. 365–374.
46. Tedeschi, L.O., Muir, J.P., Riley, D.G., Fox, D.G. (2015) The role of ruminant animals in sustainable livestock intensification programs. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 22, 452–465.
47. Thölke, H., Wolf, P. (2022). Economic advantages of individual animal identification in fattening pigs. *Agriculture*. 12, 126.

48. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables. UNDESA, New York, USA, 53 pp.
49. Van Nuffel, A., Van De Gucht, T., Saeys, W., Sonck, B., Opsomer, G., Vangeyte, J., Mertens, K.C., De Ketelaere, B., Van Weyenberg, S. (2016). Environmental and cow-related factors affect cow locomotion and can cause misclassification in lameness detection systems. *Animal*. 10, 1533–1541.
50. Vlaicu, P.A., Gras, M.A., Untea, A.E., Lefter, N.A., Rotar, M.C. (2024). Advancing livestock technology: intelligent systemization for enhanced productivity, welfare, and sustainability. *AgriEngineering*. 6, 1479–1496.
51. Wang, X., Gu, Y. (2024) Design and research of intelligent washing and disinfection integrated system for pigsties. *Processes* 12, 2705.
52. Yan, G., Liu, K., Hao, Z., Shi, Z., Li, H. (2021). The effects of cow-related factors on rectal temperature, respiration rate, and temperature-humidity index thresholds for lactating cows exposed to heat stress. *J. Therm. Biol.* 100, 103041.
53. Zhang, Z., Zhang, H., Liu, T. (2019). Study on body temperature detection of pig based on infrared technology: a review. *Artif. Intell. Agric.* 1, 14–26.
54. Zhang, B., Xiao, D., Liu, J., Huang, S., Huang, Y., Lin, T. (2024). Pig eye area temperature extraction algorithm based on registered images. *Comput. Electron. Agric.* 217, 108549.