

Συντάκτης : Βασίλειος Τσουκαλάς – δρ. Χημικός Τροφίμων

Νοεμβριος 2025

Μετάβαση από το HACCP με την ενσωμάτωση της Τεχνητής νοημοσύνης - Ενίσχυση της ασφάλειας των τροφίμων στη Βιομηχανία Τροφίμων* :

Ο ρόλος ενός συστήματος **HACCP-TN***, στη διαχείριση της ασφάλειας (*Listeria monocytogenes*), με την υποστήριξη της **Προγνωστικής ανάλυσης** και της **Γονιδιωματικής** (Genomics) σε προϊόντα επεξεργασίας κρέατος - Περίπτωση μελέτης προϊόντος

TN* : τεχνητή νοημοσύνη

Το κείμενο αυτό αποτελεί τμήμα εργασίας του συντάκτη με τίτλο : “ Η μετάβαση στο ενισχυμένο σύστημα **HACCP-TN** : Τεχνολογική αναβάθμιση – στρατηγική αναγκαιότητα διαχείρισης της ασφάλειας” – (υπο δημοσίευση)

Λέξεις-κλειδιά: HACCP, Ψηφιακός μετασχηματισμός HACCP-TN ,Ασφάλεια Τροφίμων, *Listeria monocytogenes* , Προγνωστική Ανάλυση, Γονιδιωματική, Αισθητήρες IoT

Εισαγωγή

1. Ενσωμάτωση της ΤΝ στο σύστημα HACCP

2. Προγνωστική Ανάλυση και Γονιδιωματική στην Ασφάλεια των Τροφίμων

Ψηφιοποίηση του HACCP σε HACCP-TN : Περίπτωση μελέτης : Χοιρομέρι θερμικής επεξεργασίας

4.1 Ενσωμάτωση της Γονιδιωματικής σε Συνδυασμό μεγαλεία Τεχνητής νοημοσύνης (HACCP- TN) : Παραγωγή θερμικά επεξεργασμένου προϊόντος (Χοιρομέρι βραστό)

5. Μοντέλο Τεχνητής νοημοσύνης - προγνωστικής ανάλυσης κινδύνου

6. Κώδικας Python* (Python Code Implementation) - Παράδειγμα εφαρμογής (μη εξαντητικό)

7. Πρότυπο τεκμηρίωσης HACCP -TN & Γονιδιωματική (πίνακας 1)

8. Προληπτικά μέτρα που σχετίζονται και παράγονται από την ενισχυτική εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης (HACCP-TN)

9. Παράδειγμα : HACCP-TN - Αρχείο καταγραφής διορθωτικών ενεργειών (πίνακας 2)

10. Εφαρμογή ΑΙ στο HACCP (HACCP-TN) :

- Αρχιτεκτονική Μοντέλου & Ενσωμάτωση Δεδομένων
- Διάγραμμα αρχιτεκτονικής μοντέλου ΤΝ

11. Διάγραμμα αρχιτεκτονικής μοντέλου ΤΝ

12.. Ενσωμάτωση δεδομένων σε HACCP (HACCP-TN) με υποστήριξη της τεχνητής νοημοσύνης - Εργαλεία ΤΝ

13. Προληπτικές ενέργειες με τεχνητή νοημοσύνη (επιγραμματικά)

Εκτίμηση κινδύνου τεχνητής νοημοσύνης : Χοιρομέρι βραστό – (ζαμπόν) (πίνακας)

Παράδειγμα: Έκθεση HACCP-TN

14. Πηγές πληροφόρησης/ περιλήψεις

1. Εισαγωγή

Η ασφάλεια των τροφίμων αποτελεί κρίσιμο θέμα στη βιομηχανία τροφίμων, όπου ο κίνδυνος μόλυνσης από παθογόνα μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για τη δημόσια υγεία. Μεταξύ των πολυάριθμων παθογόνων, η ***Listeria monocytogenes*** ξεχωρίζει λόγω της ανθεκτικότητάς της και της σοβαρότητας μόλυνσης.

Το μέλλον της ασφάλειας των τροφίμων έγκειται στην ενσωμάτωση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στο σύστημα HACCP. Οι αναδυόμενες τάσεις, όπως η **προγνωστική ανάλυση**, οι **εξελίξεις IoT (Internet of Things)** και η **ρομποτική** που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη, φέρνουν επανάσταση στον τρόπο διαχείρισης των κινδύνων και διασφάλισης της συμμόρφωσης προτύπων. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ένα σύστημα **HACCP-TN** πρόκειται να επαναπροσδιορίσει το εμπόριο τροφίμων τυποποιώντας τις πρακτικές, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη και βελτιώνοντας την ιχνηλασιμότητα.

Καθώς τα ρυθμιστικά πλαίσια εξελίσσονται για να φιλοξενήσουν αυτές τις καινοτομίες, ο κλάδος των τροφίμων πρέπει να είναι προορατικός, διασφαλίζοντας την ηθική χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, μεγιστοποιώντας παράλληλα τις δυνατότητές της. Με την υιοθέτηση της τεχνητής νοημοσύνης HACCP (HACCP-TN) , ο τομέας των τροφίμων μπορεί να επιτύχει ένα ασφαλέστερο, πιο βιώσιμο και παγκοσμίως συνδεδεμένο μέλλον.

Τα τελευταία χρόνια, οι εξελίξεις στην τεχνολογία, όπως η **Τεχνητή Νοημοσύνη (AI)** ενσωματωμένη σε συστήματα Ανάλυσης Κινδύνων και Κρίσιμων Σημείων Ελέγχου (HACCP), η **προγνωστική ανάλυση** σε συδυασμό με την **Γονιδιωματική**, αποτελούν καινοτομία στον τρόπο με τον οποίο οι παρασκευαστές τροφίμων μπορούν να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται την ασφάλεια. Η εφαρμογή αυτών των καινοτόμων προσεγγίσεων σε επεξεργασμένα προϊόντα κρέατος (πχ.) δημιουργεί ένα νέο παράδειγμα για τη διασφάλιση της ασφάλειας των καταναλωτών διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα των προϊόντων.

2. Ενσωμάτωση της ΤΝ στο σύστημα HACCP

Το HACCP είναι μια συστηματική προληπτική προσέγγιση για την ασφάλεια των τροφίμων, τον εντοπισμό πιθανών κινδύνων και την εφαρμογή μέτρων ελέγχου. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στο HACCP ενισχύει την αποτελεσματικότητά της και την προγνωστική της ικανότητα. Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να αναλύσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων από γραμμές επεξεργασίας, περιβαλλοντικούς αισθητήρες και ιστορικά αρχεία μόλυνσης για να εντοπίσουν μοτίβα και να προβλέψουν πιθανά παραβλήματα – παραβιάσεις της ασφάλειας πριν αυτές επισυμβούν. Αυτή η **προληπτική προσέγγιση** ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο μόλυνσης, ειδικά από ανθεκτικά παθογόνα όπως η *Listeria monocytogenes*.

- **Listeria monocytogenes**

Η *Listeria monocytogenes* είναι ένα παθογόνο βακτήριο ικανό να επιβιώσει σε σκληρές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της ψύξης και των περιβαλλόντων χαμηλού pH, καθιστώντας το μια ιδιαίτερη απειλή στα προϊόντα κρέατος. Μπορεί να προκαλέσει λιστερίωση, μια σοβαρή ασθένεια με υψηλά ποσοστά θνησιμότητας, ειδικά σε ευάλωτους πληθυσμούς. Η ικανότητά του να σχηματίζει βιοφίλμ σε επιφάνειες εξοπλισμού περιπλέκει τις προσπάθειες εκρίζωσης. Επομένως, η συνεχής παρακολούθηση και η ταχεία ανίχνευση είναι ζωτικής σημασίας συστατικά μιας ασφαλούς παραγωγικής διαδικασίας.

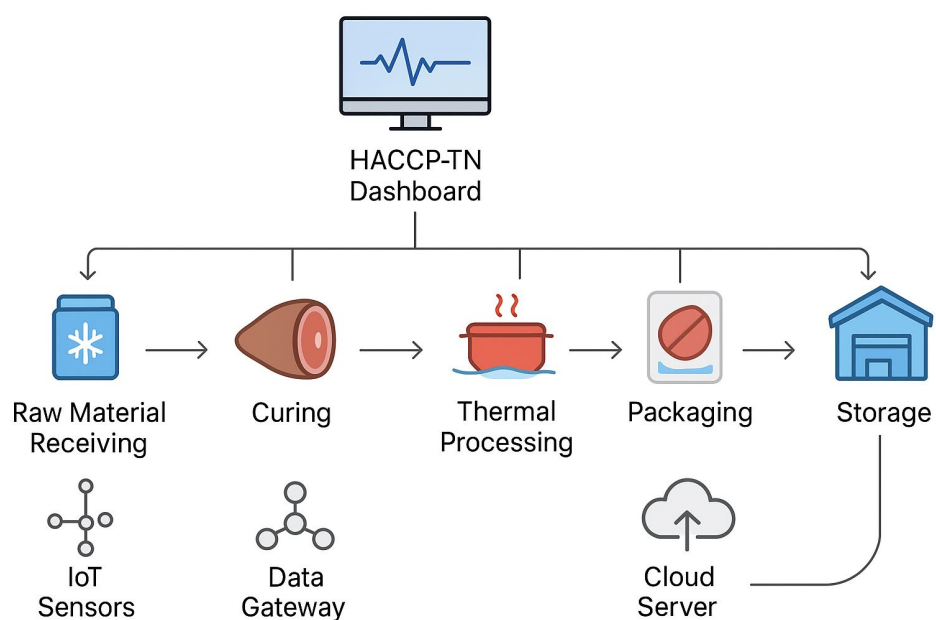
3. Προγνωστική Ανάλυση και Γονιδιωματική στην Ασφάλεια των Τροφίμων

Η προγνωστική ανάλυση χρησιμοποιεί **στατιστικούς αλγόριθμους** και **μοντέλα μηχανικής μάθησης** για την πρόβλεψη της πιθανότητας συμβάντων μόλυνσης. Όταν συνδυάζονται με τη **γονιδιωματική**, ιδιαίτερα την αλληλουχία ολόκληρου του γονιδιώματος (WGS), αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τα **στελέχη παθογόνων**, τις **πηγές μόλυνσης** και τα **προφίλ αντοχής**. Το **γονιδιωματικό προφίλ** επιτρέπει την ανίχνευση και βοηθά στον εντοπισμό πηγών μόλυνσης, είτε από πρώτες ύλες είτε από περιβαλλοντικούς παράγοντες, διευκολύνοντας στοχευμένες παρεμβάσεις.

4. Ψηφιοποίηση του HACCP σε HACCP-TN :

Περίπτωση μελέτης : Χοιρομέρι θερμικής επεξεργασίας

Χοιρομέρι θερμικής επεξεργασίας , ένα δημοφιλές επεξεργασμένο προϊόν κρέατος, είναι ευαίσθητο σε μόλυνση από *Listeria* λόγω τυχόν κακών συνθηκών επεξεργασίας, αποθήκευσης πχ. τεμαχισμού - συσκευασίας τους. Η εφαρμογή συστήματος HACCP ενισχυμένου με Τεχνητή νοημοσύνη (εργαλεία) επιτρέπει με (διαρκή) ανάλυση δεδομένων παραγωγής, τον εντοπισμό κανονιστικών αποκλίσεων και την σχετική αντιμετώπισή τους. Η **γονιδιωματική** επιτήρηση των **στελεχών της *Listeria*** , που βρίσκονται μέσα ή πάνω στον εξοπλισμό **διασφαλίζει στοχευμένες στρατηγικές υγιεινής**. Επιπλέον, η προγνωστική ανάλυση μπορεί να **προσομοιώσει σενάρια** και να **αξιολογήσει κινδύνους**, επιτρέποντας προληπτικές προσαρμογές στα πρωτόκολλα επεξεργασίας.



Ακολουθεί ανάλυση της γονιδιωματικής και της τεχνητής νοημοσύνης στο πλαίσιο εφαρμογής των διαδικασιών HACCP σε εγκατάσταση παραγωγής – επεξεργασίας προϊόντων κρέατος : Χοιρομέρι βραστό (σπάλα) θερμικής επεξεργασίας / στο στάδιο της αρχικής αξιολόγησης (αναγνώριση- εκτίμηση κινδύνου (-ων) , συμπεριλαμβανομένων των λεπτομερειών ενός μοντέλου TN και ενός προτύπου τεκμηρίωσης HACCP.

4.1 Ενσωμάτωση της Γονιδιωματικής σε Συνδυασμό μεγαλεία Τεχνητής νοημοσύνης (HACCP-TN) : Παραγωγή θερμικά επεξεργασμένου προϊόντος (Χοιρομέρι βραστό)

4.1.1 Στάδιο αρχικής αξιολόγησης

Σε αυτό το στάδιο, αξιολογήθηκαν πιθανοί κίνδυνοι χρησιμοποιώντας:

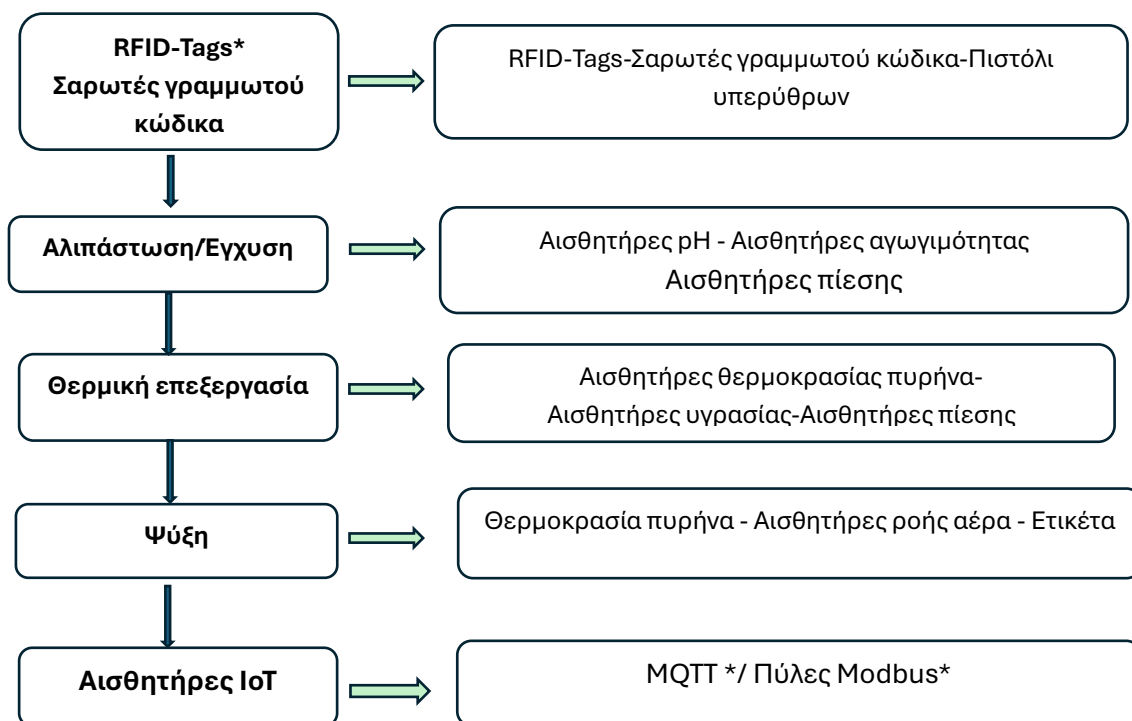
- **Γονιδιωματικό έλεγχο** – Αλληλούχιση ολόκληρου του γονιδιώματος (WGS) και μεταγονιδιωματική * -για μικροβιακή παρακολούθηση.
- **Προγνωστική ανάλυση TN *** – Μοντέλα μηχανικής μάθησης - πρόβλεψη κινδύνου και ανάλυση τάσεων.

Τα εργαλεία αυτά βελτιώνουν την αναγνώριση και την εκτίμηση κινδύνου αλλά και την επικύρωση της διαδικασίας.

5. Μοντέλο Τεχνητής νοημοσύνης - προγνωστικής ανάλυσης κινδύνου

Στη περίπτωση αυτή η Τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιεί ένα **μοντέλο κινδύνου πολλαπλών παραγόντων** για την πρόβλεψη των κινδύνων μόλυνσης με βάση διάφορες πηγές δεδομένων.

Μοντέλο κινδύνου πολλαπλών παραγόντων: Πρόβλεψη κινδύνων μόλυνσης διαφόρων πηγών δεδομένων – Αξιολόγηση			
Πηγή δεδομένων	Λειτουργία AI για ..	Δεδομένα	Είδος καταγραφής
Γονιδιωματικός έλεγχος	Παρουσία παθογόνου	Αναγνωριστικό στελέχους WGS	Κατηγορία , Κείμενο
Περιβαλλοντικά δεδομένα	Θερμοκρασία	Υγρασία,επίπεδα ροής αέρα	(Αριθμός)
Αρχεία υγιεινής	Συχνότητα καθαρισμού	Συγκέντρωση απολυμαντικού	Κατηγορία (Αριθμός)
Υγιεινή εργαζομένων	Συμμόρφωση με το πλύσιμο των χεριών	Χρήση PPE (Personal protective equipment) Εξοπλισμός προσωπικής προστασίας	Κατηγορία -Αριθμός
Διαδικασία Παραγωγής	Επεξεργασία	Αποκλίσεις θερμοκρασίας	Αριθμός
Δεδομένα προμηθευτή	Πρώτη ύλη (κρέας)	Ιστορικό μόλυνσης	Κατηγορία
Ιστορικά συμβάντα	Προηγούμενα συμβάντα μόλυνσης	Κατηγορία , κείμενο	Υπολογισμός βαθμολογίας κινδύνου
Το μοντέλο TN εμφανίζει βαθμολογία κινδύνου (1-10) με βάση ένα σταθμισμένο άθροισμα παραγόντων κινδύνου			



Διάγραμμα ροής / Εργαλεία AI / παράδειγμα : Χορομέρι θερμικής επεξεργασίας

6. Παράδειγμα εφαρμογής (μη εξαντητικό)

Κώδικας Python* (Python Code Implementation)

(ScienceDirect.com - [https://www.sciencedirect.com/article/abs/pii-S0950068722000000](https://www.sciencedirect.com/article/abs/pii/S0950068722000000) - Z Geng · 2022 ·

Random Forest Model for Risk Prediction * —(Μοντέλο τυχαίου δάσους πρόβλεψης κινδύνου)

```
from sklearn.ensemble import Random Forest Classifier
```

Training Random Forest model

```
rf_model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
rf_model.fit(X_train_scaled, y_train)
```

Predict AI risk scores

```
y_pred = rf_model.predict(X_test_scaled)
print("Predicted AI Risk Scores:", y_pred)
```

Κώδικας Python* (Python Code Implementation) -- Παράδειγμα εφαρμογής (μη εξαντητικό)

Real-Time Monitoring & Alerts- Έλεγχος σε πραγματικό χρόνο & ειδοποιήσεις (alerts)

```
import time
import random
```

```
def real_time_monitoring():
```

```
    print("\nStarting Real-Time Risk Monitoring...")
```

```
    for i in range(5):
```

```
        new_data = np.random.rand(1, X_train_scaled.shape[1]) # Simulated sensor input
```

```
        scaled_new_data = scaler.transform(new_data)
```

```
        risk_prediction = rf_model.predict(scaled_new_data)
```

```
        print(f"New Real-Time AI Risk Score: {risk_prediction[0]}")
```

```
        time.sleep(2) # Simulating delay for real-time updates
```

```
real_time_monitoring()
```

[PythonImplementations*](https://wiki.python.org/moin/PythonImplementations): <https://wiki.python.org/moin/PythonImplementations>

Πίνακας 1 Παράδειγμα: Πίνακας αποτελεσμάτων					
Σημείο (CCP)	Παθογόνο (+)	WGS Strain ID	Πρόβλημα θερμοκρασίας;	Βαθμολογία καθαρισμού	Βαθμολογία κινδύνου (HACCP -TN)
Αποθήκευση κρέατος	Listeria monocytogenes	LM-2345	Ναι	6/10	8
Μηχανή τεμαχισμού	Salmonella enterica	SE-5678	Όχι	8/10	6
Χώρος συσκευασίας	Κανένα	-	Όχι	9/10	2

Ερμηνεία αποτελεσμάτων

- Η **τεχνητή νοημοσύνη** επισημαίνει την περιοχή αποθήκευσης του κρέατος με βαθμολογία υψηλού κινδύνου (8) λόγω ανίχνευσης παθογόνων και απόκλισης θερμοκρασίας.
- Η μηχανή τεμαχισμού βαθμολογείται ως μέτριου κινδύνου (6) λόγω παρουσίας παθογόνων αλλά καλής υγιεινής .
- Ο χώρος συσκευασίας έχει βαθμολογία χαμηλού κινδύνου (2) λόγω μη ανίχνευσης παθογόνων παραγόντων και υψηλής συμμόρφωσης καθαρισμού.

7. Πρότυπο τεκμηρίωσης HACCP -TN & Γονιδιωματική

Αρχείο ανάλυσης κινδύνων

Σημείο διαδικασίας	Είδος κινδύνου	Γονιδιωματικά ευρήματα	Βαθμολογία κινδύνου HACCP -TN	Μέτρα ελέγχου
Δειγματοληψία κρέατος	Βιολογικός (Listeria)	Στέλεχος WGS: LM-2345	8	Έλεγχος προμηθευτών, ταχεία δοκιμή
Τεμαχιστήριο	Βιολογικός (Salmonella)	Στέλεχος WGS: SE-5678	6	Ρύθμιση υγιεινής , δειγματοληψία
Θερμική επεξεργασία (Kill Step))	Δεν εντοπίστηκε	-	2	Διατήρηση ελέγχου διεργασιών
Συσκευασία	Φυσικός (ίνες γαντιών)	Δεν εντοπίστηκε μικροβιακός κίνδυνος	2	Επιθεώρηση υλικών συσκευασίας

8. Προληπτικά μέτρα που σχετίζονται και παράγονται από την ενισχυτική εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης (HACCP-TN)

- Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των αρχείων καταγραφής ενεργειών Υγιεινής .
- Αυτοματοποιημένες ειδοποιήσεις σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων κινδύνου.
- Δυναμικά πρωτόκολλα υγιεινής προσαρμοσμένα με βάση την παρουσία παθογόνων.
- **Γονιδιωματική παρακολούθηση παθογόνων** για τον εντοπισμό πηγών μόλυνσης.
- Προληπτική συντήρηση για την πρόληψη μόλυνσης που σχετίζεται με τον εξοπλισμό.

9. Παράδειγμα : HACCP-TN - Αρχείο καταγραφής διορθωτικών ενεργειών				
Μη συμμόρφωση	Πρόβλεψη TN	Διορθωτική ενέργεια	Υπεύθυνος	Πρόβλημα
Αύξηση θερμοκρασίας αποθήκευσης	Υψηλός κίνδυνος (8)	Ρύθμιση ψύξης,	Υπεύθυνος QA	Επιλύθηκε
Listeria ανιχνεύθηκε στο τεμαχιστήριο	Μέτριος κίνδυνος (6)	Βαθύς καθαρισμός, περιοχή επανελέγχου	Ομάδα υγιεινής	Εκκρεμής
Σαλμονέλα στο δείγμα (κρέας)	Υψηλός κίνδυνος (8)	Παρτίδα καραντίνας, ειδοποίηση προμηθευτή	Προμήθειες	Διορθώθηκε

Συμπεράσματα

Με την ενσωμάτωση της γονιδιωματικής και της τεχνητής νοημοσύνης στο πλαίσιο ενός συστήματος HACCP-TN :

- Προβλέπονται κίνδυνοι πριν επισυμβεί μόλυνση.
- Βελτιστοποιείται η Υγιεινή χρησιμοποιώντας ανίχνευση hotspot .
- Ενισχύεται η ιχνηλασιμότητα με παρακολούθηση γονιδιωματικών παθογόνων.
- Αυτοματοποιούνται διορθωτικές ενέργειες με βάση δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

10. Εφαρμογή AI στο HACCP (HACCP-TN) :

Αρχιτεκτονική Μοντέλου & Ενσωμάτωση Δεδομένων

Σε αυτήν την ενότητα, παρέχονται **λεπτομέρειες** σχετικά με την **αρχιτεκτονική του μοντέλου AI**, την **ενσωμάτωση δεδομένων** και τον τρόπο με τον οποίο η **AI αλληλεπιδρά με τη γονιδιωματική στο πλαίσιο HACCP** (εγκατάσταση παραγωγής -χοιρομέρι βραστό) .

Αρχιτεκτονική μοντέλου AI για πρόβλεψη κινδύνου HACCP

Το μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης ακολουθεί μια υβριδική προσέγγιση, που συνδυάζει **μηχανική μάθηση (ML)**, **βαθιά μάθηση** και **συστήματα αποφάσεων βάσει κανόνων** για την αξιολόγηση των κινδύνων για την ασφάλεια των τροφίμων.

- **Επισκόπηση μοντέλου - Επίπεδο πρόσληψης δεδομένων:**

- Συλλέγει γονιδιωματικά δεδομένα (προφίλ παθογόνων WGS).
- Ανακτά δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο (θερμοκρασία, υγρασία).
- Ενσωματώνει αρχεία καταγραφής ιστορικής μόλυνσης.

- **Μηχανική χαρακτηριστικών:**

- Εξάγει σημαντικούς δείκτες κινδύνου (π.χ. επιμονή παθογόνων, αποτελεσματικότητα καθαρισμού).
- Μετατρέπει δεδομένα (π.χ. τύπους παθογόνων) σε αριθμητικές τιμές.

- **Εκπαίδευση μοντέλου :**

- Χρησιμοποιεί έναν **ταξινομητή τυχαίων δασών** για την **εκτίμηση κινδύνου**.
- Εφαρμόζει ένα **νευρωνικό δίκτυο (LSTM)** για την πρόβλεψη τάσεων μόλυνσης.
- Χρησιμοποιεί ένα έμπειρο σύστημα βασισμένο σε κανόνες για την παρακολούθηση της συμμόρφωσης με το HACCP-TN.

- **Εκτίμηση κινδύνου & Ειδοποιήσεις (alerts) :**

- Αποτελέσματα Βαθμολογίες κινδύνου TN (1-10) για τα **ΚΣΕ** (μόλυνσης) .
- Συστάσεις διορθωτικών ενεργειών σε πραγματικό χρόνο.

11. Διάγραμμα αρχιτεκτονικής μοντέλου TN

Πηγές δεδομένων : (Γονιδιωματική, Αισθητήρες)

Προεπεξεργασία δεδομένων

(Καθαρισμός, **Feature Eng.** ★)

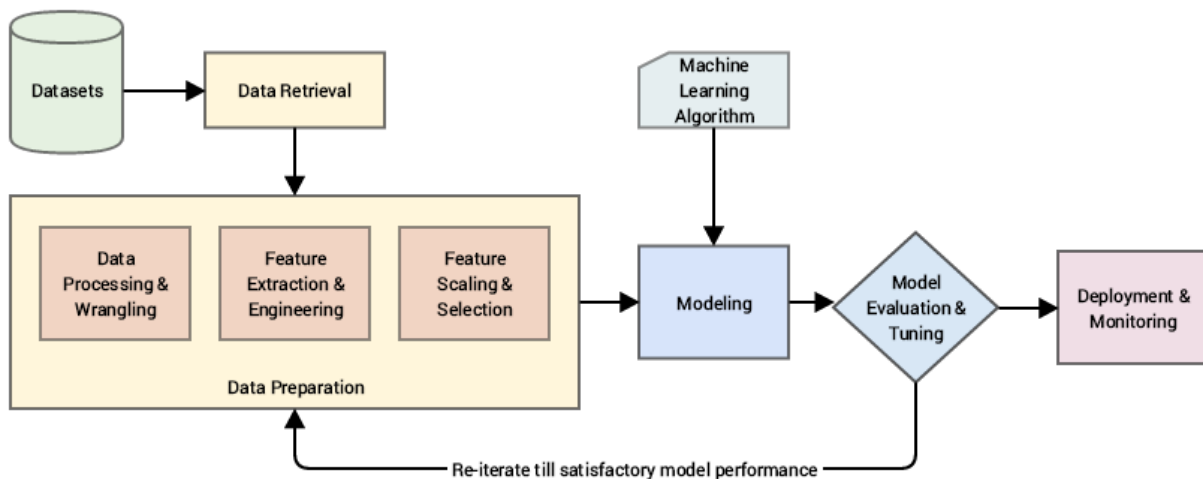


Image from Practice Machine Learning with Python, Apress/Springer



Μοντέλο κινδύνου TN :

- Τυχαίο δάσος - *Random forest* -
- Νευρωνικό δίκτυο LSTM
- Ειδικοί κανόνες



Βαθμολόγηση κινδύνου & ειδοποιήσεις

(Συστάσεις HACCP)

Αποποίηση ευθύνης : Η εργασία αυτή δεν δεσμεύει τον συντάκτη της για το περιεχόμενο των βιβλιογραφικών πηγών και δεν παρέχει δεσμευτικές εφαρμογές

12.. Ενσωμάτωση δεδομένων σε HACCP (HACCP-TN) με υποστήριξη της τεχνητής νοημοσύνης -Εργαλεία TN

A. Αγωγός δεδομένων γονιδιωματικής (*Genomics Data Pipeline*)

Αλληλούχιση DNA (WGS):

- Ταυτοποιήσιμα στελέχη παθογόνων (*Listeria*, *Salmonella*, *E. coli*).
- Τεχνητή νοημοσύνη : ταξινόμηση κινδύνου με βάση γενετικούς δείκτες.

Παράδειγμα: Ανίχνευση στελέχους *Listeria* LM-2345 σε μολυσμένη λεπίδα

Ανάλυση “επίμονων ” παθογόνων:

- Η TN ανιχνεύει επαναλαμβανόμενα μοτίβα μόλυνσης
- Ανιχνεύει επανεμφάνιση προηγούμενων εστιών

B. Αγωγός δεδομένων αισθητήρας TN σε πραγματικό χρόνο

• Αισθητήρες IoT στην εγκατάσταση:

Παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των επιπέδων/ περιεκτικότητας χημικών καθαρισμού.

πχ. Η TN ανιχνεύει τεχνικές ανωμαλίες (π.χ. δυσλειτουργία ψυγείου).

• Προγνωστική παρακολούθηση :

- Χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα LSTM για να προβλέψει πότε είναι πιθανή η μόλυνση.
- Αποτρέπει προβλήματα προτού εμφανιστούν (π.χ. προληπτική συντήρηση εξοπλισμού).

13. Προληπτικές ενέργειες με τεχνητή νοημοσύνη

- **Δυναμικές προσαρμογές υγιεινής:** Η ΑΙ προτείνει συχνότητα με βάση τις τάσεις μόλυνσης.
- **Αυτοματοποιημένοι έλεγχοι συμμόρφωσης:** Η τεχνητή νοημοσύνη επισημαίνει αποκλίσεις στα αρχεία καταγραφής HACCP.
- **Γονιδιωματική ιχνηλάτηση:** Η τεχνητή νοημοσύνη συνδέει τη μόλυνση που αφορούν προμηθευτές ή συγκεκριμένα μηχανήματα.

Σημείωση :

Με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και της γονιδιωματικής, η διαχείριση της ασφάλειας των τροφίμων στο HACCP γίνεται προγνωστική, προληπτική και αυτοματοποιημένη.

Παράδειγμα: Έκθεση HACCP-TN			
Εκτίμηση κινδύνου τεχνητής νοημοσύνης : Χοιρομέρι βραστό – (ζαμπόν)			
Διαδικασία	Αναγνωρισμένος κίνδυνος	Βαθμολογία Κινδύνου TN	Προτεινόμενη ενέργεια
Κρέας	Listeria monocytogenes	8	Καραντίνα, έλεγχος προμηθευτών
Τεμαχισμός	Salmonella enteritis	6	Υγιεινή , επανέλεγχος
Θερμική επεξεργασία	Δεν ανιχνεύθηκε παθογόνο	2	οκ
Συσκευασία	Φυσικός (ίνες γαντιών)	3	Βελτίωση εκπαίδευσης προσωπικού *
Προειδοποίηση TN : "Ανιχνεύθηκε υποτροπή της Listeria στην περιοχή τεμαχισμού. Συνιστώμενη ενημέρωση πρωτοκόλλου Υγιεινής - καθαριότητας ."			

Βαθμολογίες κινδύνου

- Παραλαβή κρέατος : 8/10 (Υψηλός κίνδυνος)
- (Αποστέωση) - Τεμαχισμός: 6/10 (Μέτριος κίνδυνος)
- Θερμική επεξεργασία : 2/10 (Χαμηλός κίνδυνος)
- Συσκευασία : 3/10 (Χαμηλός κίνδυνος)

Παράδειγμα (μη αποκλειστικό) σχεδιασμού πίνακα ελέγχου TN - Σενάριο (επογραφματικά) μοντέλου ML εκτίμησης κινδύνου (HACCP-TN) - (Χοιρομέρι θερμικής επεξεργασίας) .

Πίνακας εργαλείων HACCP με τεχνολογία AI (Σχεδιασμός δείγματος)

Βασικά χαρακτηριστικά του πίνακα ελέγχου:

- **Βαθμολογίες κινδύνου σε πραγματικό χρόνο** - Εμφανίζει κινδύνους μόλυνσης σε διαφορετικές ζώνες της εγκατάστασης .
- **Γονιδιωματική ανάλυση** - Παρακολουθεί στελέχη : **λίστέρια, σαλμονέλα και άλλα παθογόνα** .
- **Προγνωστικές ειδοποιήσεις συντήρησης** – Ανιχνεύει τις περιβαλλοντικές τάσεις πριν συμβεί μόλυνση.
- **Αυτοματοποιημένες αναφορές HACCP** - Δημιουργεί σχέδια διορθωτικών ενεργειών με βάση τις βαθμολογίες κινδύνου (Τεχνητή νοημοσύνη) .

Σενάριο μοντέλου HACCP-TN (Python - Μηχανική μάθηση πρόβλεψης κινδύνου)

Σενάριο Python : χρησιμοποιεί **Random Forest** για ταξινόμηση κινδύνου HACCP-TN και **LSTM** * για πρόβλεψη τάσεων μόλυνσης.

A. Προεπεξεργασία δεδομένων και Random Forest πρόβλεψης κινδύνου:

- Μοντέλο HACCP-TN
- Επεξήγηση του κώδικα του μοντέλου HACCP-TN
- Τυχαίος ταξινομητής Random Forest
- Χρήση ιστορικών δεδομένων παραγόντων κινδύνου (θερμοκρασία, απόδοση καθαρισμού, παθογόνα, ιστορικό προμηθευτή).
- Προβλέπει βαθμολογία κινδύνου (1-10) - HACCP-TN.

B. LSTM Neural Network (Νευρωνικό δίκτυο LSTM)

- Προβλέπει τις τάσεις μόλυνσης με την πάροδο του χρόνου.
- Βοηθά στην έγκαιρη προειδοποίηση ανίχνευσης μικροβιακών κινδύνων.

Σύνοψη :

Ο συνδυασμός της τεχνητής νοημοσύνης (HACCP-TN) , στη προκειμένη περίπτωση της **Γονιδιωματικής** και της **Προγνωστικής ανάλυσης** , σηματοδοτεί μια αλλαγή στη διαχείριση της ασφάλειας του κρέατος , μια μετάβαση από το “κλασικό” σύστημα **HACCP** στο **ενισχυμένο σύστημα HACCP-TN**. Για προϊόντα όπως η κατηγορία πχ. προϊόντων επεξεργασίας κρέατος όπως Χοιρομέρι θερμικής επεξεργασίας (φέτες) , αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση όχι μόνο ενισχύει την ανίχνευση και τον έλεγχο της *Listeria monocytogenes* (και άλλων παθογόνων), αλλά προωθεί επίσης μια κουλτούρα συνεχούς βελτίωσης και ανθεκτικότητας. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, η βιομηχανία κρέατος μπορεί να επιτύχει υψηλότερα πρότυπα ασφαλείας, να προστατεύσει τους καταναλωτές και να διατηρήσει την εμπιστοσύνη του κοινού στα επεξεργασμένα προϊόντα κρέατος.

14. Πηγές πληροφόρησης/ περιλήψεις

- | | | |
|----|---|---|
| 1 | AI / ML + HACCP / food safety monitoring | Kop: “Applications of Machine Learning in Food Safety and HACCP Monitoring” — discusses how ML algorithms support hazard identification, CCP monitoring in animal-source foods. MDPI+2PMC+2 |
| 2 | AI in food safety broadly | “Artificial Intelligence in Food Safety: A Decade Review and Bibliometric Analysis” — surveys AI/ML in food safety, traceability, monitoring. PMC+2e-fsbh.org+2 |
| 3 | Predictive analytics in food supply-chains | “Leveraging predictive analytics to enhance food safety risk management in supply chains: A conceptual framework” (2025) — develops a framework linking food-safety risks, supply-chain transparency, technological integration and predictive analytics. systems.enpress-publisher.com+1 |
| 4 | Risk & supply-chain analytics | “Predictive Analytics and Machine Learning for Real-Time Supply Chain Risk Mitigation and Agility” (2023) — though not food-specific, offers strong foundation for predictive analytics in supply-chain risk modelling. MDPI |
| 5 | AI + food safety/quality data management | “Food Safety and Quality Data Management Using Artificial Intelligence” — discusses how AI data-management supports food safety programs. foodprotection.org |
| 6 | AI implementation in food-safety practice | “AI in Food Safety: Is AI ‘Food Safe?’” — article discussing how AI is being used for food-borne pathogen detection, HACCP plans, etc. food-safety.com |
| 7 | Genomics / whole-genome sequencing (WGS) in foodborne pathogens | Brown et al., “Use of Whole-Genome Sequencing for Food Safety and Public Health” (2019) — details how genomics is used in inspection, verification, outbreak detection. PMC |
| 8 | Genomics in risk assessment | Guillier et al., “Taking account of genomics in quantitative microbial risk assessment” (2022) — shows how genomics/WGS can feed into QMRA frameworks. sciencedirect.com |
| 9 | Genomics + emerging detection technologies | Xiao et al., “Advancing microbial risk assessment: perspectives from the evolution of detection technologies” (2025) — explores how advanced detection (omics, genomics) influences risk assessment. Nature |
| 10 | Genomics traceability in food industry | Dong et al., “Significance of Whole-Genome Sequencing for the Food Industry” (2025) — focuses on WGS application in meat & dairy supply chains, traceability. MDPI |

Τα έγγραφα AI/ML (1-6) δείχνουν πώς η μηχανική μάθηση, η προγνωστική ανάλυση, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και η επεξεργασία μεγάλων δεδομένων εφαρμόζονται στην ασφάλεια των τροφίμων, συμπεριλαμβανομένων των πλαισίων τύπου HACCP.

Τα έγγραφα γονιδιωματικής (7-10) καλύπτουν τον τρόπο με τον οποίο η αλληλουχία ολόκληρου του γονιδιώματος και οι σχετικές μοριακές τεχνολογίες ενισχύουν την ανάλυση κινδύνου, την αξιολόγηση μικροβιακού κινδύνου, την ιχνηλασιμότητα και τις στρατηγικές ελέγχου.

Μαζί δείχνουν τον μετασχηματισμό που σημειώσατε: από το παραδοσιακό HACCP → HACCP + AI/ML + προγνωστική ανάλυση + γονιδιωματική.