

01

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

Η κατανόηση της ψηφιακής εικόνας αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τη μελέτη και την πράξη της σύγχρονης φωτογραφίας. Σε αντίθεση με την αναλογική φωτογραφία, η οποία βασίζεται σε συνεχείς χημικές ή φυσικές μεταβολές του φιλμ, στην ψηφιακή τεχνολογία η εικόνα αποτυπώνεται ως σύνολο διακριτών τιμών φωτεινότητας και χρώματος, οργανωμένων σε ένα πλέγμα εικονοστοιχείων (pixels). Η ψηφιακή εικόνα δεν είναι απλώς «μια φωτογραφία σε οθόνη», αλλά ένα σύστημα δειγματοληψίας και κβαντοποίησης του οπτικού σήματος, το οποίο καθορίζει τόσο την ποιότητα όσο και τα όρια της αναπαράστασης.

Στο θεωρητικό και τεχνικό αυτό πλαίσιο, το Κεφάλαιο εστιάζει στις θεμελιώδεις αρχές που διέπουν την ψηφιακή αναπαράσταση της εικόνας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη φωτογραφική πρακτική. Εξετάζονται έννοιες όπως το pixel, η ανάλυση, το βάθος bit και το δυναμικό εύρος, καθώς και ο ρόλος του θορύβου και των χαρακτηριστικών του ψηφιακού αισθητήρα στη διαμόρφωση της τελικής εικόνας. Παράλληλα, αναδεικνύονται με συστηματικό τρόπο οι διαφορές ανάμεσα στην αναλογική και την ψηφιακή σύλληψη και αποθήκευση της φωτογραφίας, τόσο σε επίπεδο φυσικών διαδικασιών όσο και σε επίπεδο ποιότητας και ευελιξίας επεξεργασίας.

1.1 Μαθησιακοί στόχοι και βασικές έννοιες

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις αρχές της ψηφιακής εικόνας, με έμφαση στην πρακτική εφαρμογή τους στη φωτογραφία. Με την ολοκλήρωσή του, ο αναγνώστης/τρια θα μπορεί:

- Να αναγνωρίζει τη διαφορά ανάμεσα στην αναλογική και την ψηφιακή αναπαράσταση μιας φωτογραφικής εικόνας.
- Να ορίζει τι είναι το pixel, να ερμηνεύει τι σημαίνουν η ανάλυση (χωρική ανάλυση) και το μέγεθος της εικόνας, και να εξηγεί πώς αυτά επηρεάζουν την ποιότητα μιας ψηφιακής φωτογραφίας.

- Να εξηγεί την έννοια του βάθους bit (bit depth) και να περιγράφει πώς αυτό συνδέεται με τους τόνους (τονικές διαβαθμίσεις) και τη χρωματική πληροφορία μιας εικόνας.
- Να περιγράφει τα βήματα μετατροπής μιας εικόνας σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή τη δειγματοληψία (sampling) και την κβαντοποίηση (quantization) ενός αναλογικού σήματος.
- Να κατανοεί την έννοια του δυναμικού εύρους μιας ψηφιακής εικόνας, να εξηγεί με ποιον τρόπο ο θόρυβος επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας και να ορίζει τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).
- Να κατανοεί τις βασικές αρχές λειτουργίας του αισθητήρα μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (CCD/CMOS) και να συγκρίνει τα χαρακτηριστικά αυτά με εκείνα του φωτογραφικού φιλμ.
- Να συγκρίνει τις μορφές αρχείων RAW και JPEG ως προς τα δεδομένα που καταγράφονται από τον αισθητήρα και τον τρόπο με τον οποίο αυτά αποδίδονται στην τελική εικόνα.
- Να εφαρμόζει στην πράξη τις παραπάνω έννοιες μέσω μιας εργαστηριακής άσκησης ψηφιοποίησης μιας αναλογικής φωτογραφίας με διαφορετικές αναλύσεις (DPI) και βάθη bit.

Οι παραπάνω στόχοι επικεντρώνονται σε θεμελιώδεις έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της ψηφιακής φωτογραφίας. Πριν την αναλυτική παρουσίαση, συνοψίζουμε εν συντομία ορισμένες κεντρικές ιδέες: Μια ψηφιακή εικόνα αναπαρίσταται δισδιάστατα ως ένα σύνολο από μικροσκοπικές διακριτές μονάδες που ονομάζονται pixel, ενώ μια αναλογική εικόνα (π.χ. σε φιλμ ή αναλογικό σήμα βίντεο) αποτελεί μια συνεχή συνάρτηση της φωτεινότητας κατά μήκος των δύο διαστάσεών της. Δηλαδή, στη ψηφιακή τεχνολογία η πληροφορία κωδικοποιείται σε διακριτές μονάδες, ενώ στην αναλογική μορφή η πληροφορία μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο, χωρίς να χωρίζεται σε ξεχωριστά «βήματα» (Galloway & Geoghegan, 2021).

Η μετατροπή μιας αναλογικής εικόνας σε ψηφιακή πραγματοποιείται μέσω δύο βασικών διαδικασιών, της δειγματοληψίας και της κβαντοποίησης, οι οποίες θα εξεταστούν αναλυτικά παρακάτω (βλ. Ενότητα 1.5). Σε ό,τι αφορά τη φωτογραφία, μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα για να μετατρέπει το φως σε ηλεκτρονικά δεδομένα. Αντίθετα, στις αναλογικές φωτογραφικές μηχανές που βασίζονται στο φιλμ, το φως επιφέρει χημικές αλλαγές στο φωτοευαίσθητο υλικό.

Βασικές έννοιες: Pixel (εικονοστοιχείο), ανάλυση, βάθος bit, δυναμικό εύρος, θόρυβος, SNR, αισθητήρας, RAW, JPEG. Οι όροι αυτοί συνιστούν θεμελιώδεις λέξεις-κλειδιά στη γλώσσα της ψηφιακής εικόνας και θα διερευνηθούν εκτενώς στις επόμενες ενότητες.

1.2 Αναλογική έναντι ψηφιακής αναπαράστασης της φωτογραφικής εικόνας

Οι φωτογραφικές εικόνες μπορούν να αποθηκευτούν και να αναπαρασταθούν είτε σε αναλογική μορφή (π.χ. φωτογραφικό φιλμ, αναλογικό σήμα βίντεο) είτε σε ψηφιακή μορφή, ως αρχείο εικόνας που αποτελείται από ψηφιακά δεδομένα. Ως αναλογική εικόνα ορίζεται εκείνη όπου η φωτεινή πληροφορία μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο στο μέσο καταγραφής. Για παράδειγμα, στο φωτογραφικό φιλμ η ένταση του φωτός που προσπίπτει επιφέρει αναλογικές και συνεχείς χημικές αλλαγές σε κάθε σημείο του υλικού (Allen & Triantaphillidou, 2011).

Αντίθετα, η ψηφιακή εικόνα αποτελεί αναπαράσταση της ίδιας σκηνής με διακριτές αριθμητικές τιμές. Η εικόνα χωρίζεται σε ένα πυκνό πλέγμα από εικονοστοιχεία (pixel) και καταγράφεται μια διακριτή αριθμητική τιμή φωτεινότητας και/ή χρώματος σε κάθε pixel. Με άλλα λόγια, η ψηφιακή εικόνα παράγεται μέσω των διαδικασιών της δειγματοληψίας (διακριτοποίηση στον χώρο) και της κβαντοποίησης (διακριτοποίηση στο φάσμα των φωτεινών τιμών) μιας αρχικά συνεχούς εικόνας (Galloway & Geoghegan, 2021; Gonzalez & Woods, 2018).

Η δειγματοληψία καθορίζεται από το «βήμα» (pixel pitch) και τον αριθμό των φωτοευαίσθητων στοιχείων του αισθητήρα (CCD/CMOS), ενώ η κβαντοποίηση καθορίζεται από το βάθος bit (π.χ., 8-, 12-, 14- ή 16-bit). Υπό αυτή την έννοια, για b bits αντιστοιχούν 2^b θεωρητικά διακριτά επίπεδα ανά κανάλι, χωρίς αυτό να συνεπάγεται αυτόματα αντίστοιχο δυναμικό εύρος ή «ποιότητα» αν ο θόρυβος, η συμπίεση ή η τονική χαρτογράφηση περιορίζουν την αξιοποιήσιμη πληροφορία (Holst & Lomheim, 2011).

Στην πράξη, η μετάβαση από την αναλογική στη ψηφιακή μορφή είχε καταλυτικό αντίκτυπο στη φωτογραφία. Οι ψηφιακές εικόνες μπορούν να αντιγραφούν απεριόριστες φορές χωρίς ποιοτικές απώλειες, να τροποποιηθούν εύκολα με λογισμικό και να διανεμηθούν ακαριαία μέσω ψηφιακών δικτύων (Jones, 2023). Αντίθετα, οι αναλογικές φωτογραφίες (σε φιλμ) απαιτούν χημική εμφάνιση και φυσική αποθήκευση, και επιπλέον κάθε αναλογική αναπαραγωγή τους επιφέρει σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Επιπλέον, η ψηφιακή τεχνολογία κατέστησε δυνατή τη συνεχή αύξηση της ανάλυσης των αισθητήρων. Με το πέρασμα του χρόνου, φτάσαμε σε επίπεδο όπου η ποιότητα της ψηφιακής εικόνας ξεπερνά εκείνη του φιλμ 35 mm σε αρκετούς τομείς. Η αύξηση αυτή σχετίζεται με την εξέλιξη της τεχνολογίας στερεοστατικών αισθητήρων (CCD/CMOS), τη μείωση του read noise και την πρόοδο της υπολογιστικής απεικόνισης/ISP. (Fossum *et al.*, 2024; Karl *et al.*, 2023)

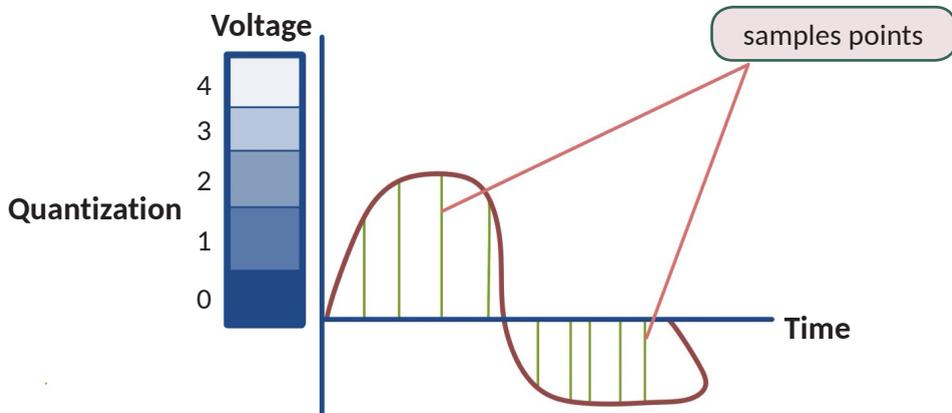
Παράδειγμα σύγκρισης: Συγκριτικές εκτιμήσεις από τον χώρο της φωτογραφίας επιχειρούν συχνά να αποδώσουν στο φιλμ 35 mm μια «ισοδύναμη» ανάλυση σε megapixel· όμως το εύρος τιμών μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του φιλμ, τον φακό και κυρίως με τη διαδικασία σάρωσης/ψηφιοποι-

ησης και τα κριτήρια μέτρησης (π.χ. MTF/SFR) (Archambault, 2023; ISO, 2024). Αντίστοιχα, μια σύγχρονη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή καταναλωτικής κατηγορίας διαθέτει αισθητήρα 24 megapixel ή και περισσότερα, αλλά αυτό το μέγεθος περιγράφει πρωτίστως τον αριθμό δειγμάτων του αισθητήρα και όχι κατ' ανάγκη το τελικό resolving power όλου του συστήματος (ISO, 2024).

Ιστορικά, το φιλμ διέθετε μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα έκθεσης (latitude) και ελαφρώς υψηλότερο δυναμικό εύρος στις πολύ φωτεινές περιοχές μιας σκηνής, αποδίδοντας πιο ομαλές τονικές μεταβάσεις στα highlights. Αντιθέτως, οι ψηφιακοί αισθητήρες επιδεικνύουν καλύτερη απόδοση στις σκοτεινές περιοχές (σκιές), με χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Ωστόσο, η διαφορά αυτή έχει πλέον σε μεγάλο βαθμό εξαλειφθεί, καθώς οι σύγχρονες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές DSLR και mirrorless υψηλών προδιαγραφών επιτυγχάνουν δυναμικό εύρος της τάξης των 13-15 στοπ, αντίστοιχο ή και ανώτερο από εκείνο του φιλμ (περίπου 13 στοπ), και υποστηρίζουν τεχνικές όπως η πολλαπλή έκθεση (HDR) για περαιτέρω διεύρυνση του συνολικού εύρους.

Κατά συνέπεια, η επιλογή ανάμεσα σε φιλμ και ψηφιακό μέσο σήμερα στηρίζεται κυρίως σε αισθητικά, δημιουργικά και πρακτικά κριτήρια, παρά σε αντικειμενικές διαφορές ποιότητας, δεδομένου ότι και οι δύο μέθοδοι είναι ικανές να αποδώσουν εικόνες εξαιρετικά υψηλής ποιότητας.

Εν κατακλείδι, στην αναλογική φωτογραφία η καταγραφή βασίζεται σε συνεχή φυσικά φαινόμενα (όπως οι χημικές αντιδράσεις στο φιλμ), ενώ στην ψηφιακή φωτογραφία βασίζεται σε διακριτές μετρήσεις και ψηφιακή αποθήκευση.

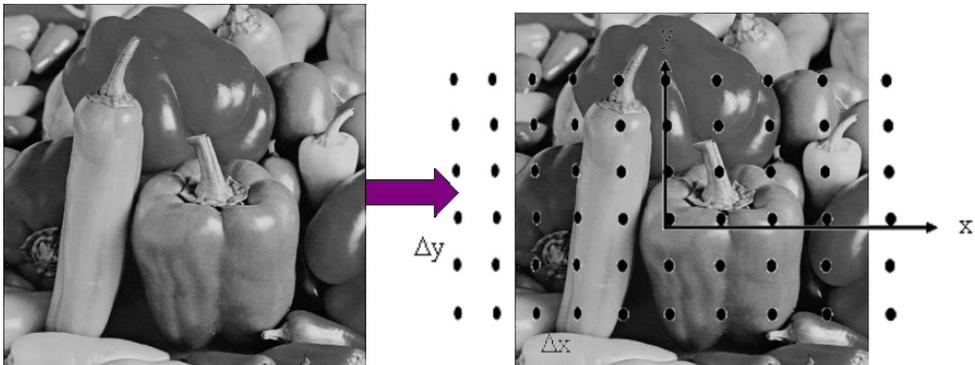


Εικόνα 1.1 | Διάγραμμα σύγκρισης αναλογικής και ψηφιακής απεικόνισης. Η αριστερή πλευρά δείχνει μια συνεχόμενη (αναλογική) κατανομή φωτεινότητας χωρίς διακριτά βήματα, ενώ η δεξιά απεικονίζει την ίδια πληροφορία ψηφιακά, χωρισμένη σε διακριτά δείγματα με συγκεκριμένες κβαντισμένες τιμές φωτεινότητας. Αυτό το διάγραμμα υπογραμμίζει τη μετατροπή μιας συνεχούς πληροφορίας σε διακριτές μονάδες (ψηφία). Προσαρμογή από Tushar B. Kute, "Image Sampling and Quantization", MITU Skillologies (GNU General Public License).

Η ψηφιακή εικόνα προσφέρει το πλεονέκτημα της άμεσης προβολής, του εύκολου διαμοιρασμού και της ηλεκτρονικής επεξεργασίας, ενώ η αναλογική διαθέτει μια απτή υλική υπόσταση και χαρακτηρίζεται από διακριτή αισθητική ταυτότητα. Για τον σύγχρονο φωτογράφο, η κατανόηση και των δύο αυτών κόσμων συμβάλλει στην πληρέστερη αξιολόγηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών της ψηφιακής εικόνας, η οποία θα εξεταστεί διεξοδικά στις επόμενες ενότητες.

1.3 Pixel, ανάλυση και μέγεθος εικόνας

Μια ψηφιακή εικόνα συνίσταται σε ένα πλέγμα (grid) αποτελούμενο από χιλιάδες ή και εκατομμύρια μικροσκοπικά στοιχεία, τα οποία ονομάζονται pixel (ή εικονοστοιχεία). Κάθε pixel αντιπροσωπεύει τη μικρότερη διακριτή μονάδα της ψηφιακής εικόνας, αποτελώντας ένα μικρό σημείο στο οποίο αντιστοιχίζεται μια συγκεκριμένη αριθμητική τιμή φωτεινότητας ή έντασης (Gonzalez & Woods, 2018; Burger & Burge, 2022). Τα pixel διατάσσονται σε σειρές και στήλες, συνθέτοντας την εικόνα παρόμοια με μικρά τετράγωνα σε ένα μωσαϊκό. Μπορεί κανείς να θεωρήσει μια εικόνα ως έναν πίνακα διαστάσεων $M \times N$, όπου (με την προϋπόθεση ότι δηλώνεται ρητά η σύμβαση) το ένα μέγεθος αναφέρεται στον αριθμό pixel κατά το πλάτος και το άλλο στον αριθμό pixel κατά το ύψος. Κάθε θέση αυτού του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα pixel και περιέχει μια συγκεκριμένη τιμή φωτεινότητας ή/και χρώματος.



Εικόνα 1.2 | Παράδειγμα ψηφιακής εικόνας και μεγεθυμένης περιοχής της, ώστε να διακρίνονται τα επιμέρους pixel. Στα δεξιά, η μεγέθυνση αποκαλύπτει το πλέγμα των τετραγωνικών εικονοστοιχείων, καθένα με μια ενιαία τιμή χρώματος, ενώ στα αριστερά η συνολική εικόνα φαίνεται συνεχής. Αυτό καταδεικνύει πώς τα πολλά μικροσκοπικά pixel συνδυάζονται για να σχηματίσουν μια συνεκτική φωτογραφική εικόνα. Πηγή: Tushar B. Kute, "Image Sampling and Quantization", MITU Skillologies (GNU General Public License).