

2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Σύλληψη προϊόντος –Βιομηχανικός σχεδιασμός– Μοντέλα επιφανειών και αντίστροφη μηχανική

Περιεχόμενα κεφαλαίου

2.1

Βιομηχανικός
σχεδιασμός
σελ. 50

2.2

Μοντέλα
επιφανειών
σελ. 55

2.3

Μοντελοποίηση
με συστήματα
επιφανειών
σελ. 57

2.4

Μοντέλα
με αντίστροφη
σχεδίαση
σελ. 97

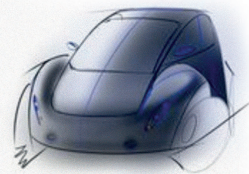
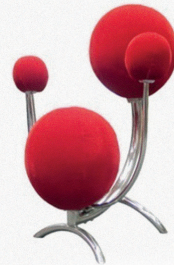
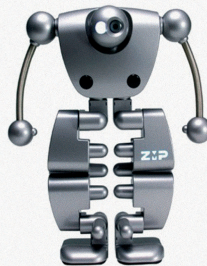
Επαναληπτικές
ερωτήσεις
σελ. 120

2.1 Βιομηχανικός σχεδιασμός

Ο βιομηχανικός σχεδιασμός είναι η υπηρεσία σύλληψης, ανάπτυξης της ιδέας και των προδιαγραφών που βελτιστοποιούν τη λειτουργία, την αξία, την αισθητική των προϊόντων και των συστημάτων προς αμοιβαίο όφελος τόσο των χρηστών όσο και των κατασκευαστών (σύμφωνα με τον Industrial Design Society of America - IDSA).

Σχήμα 2.1

Οι βιομηχανικοί σχεδιαστές ενεργούν τόσο ως μηχανικοί όσο και ως καλλιτέχνες. Παραδείγματα προϊόντων με βιομηχανικό σχεδιασμό.



Πηγή: Internet

Οι βιομηχανικοί σχεδιαστές ενεργούν τόσο ως μηχανικοί όσο και ως καλλιτέχνες στη διαδικασία του σχεδιασμού του προϊόντος (Σχήμα 2.1). Ο σχεδιασμός προϊόντων είναι μια δημιουργική δουλειά που σκοπό έχει να ορίσει τις διάφορες ποιότητες των προϊόντων ή συστημάτων προϊόντων. Ο σχεδιασμός ενός προϊόντος είναι ο κεντρικός παράγοντας που δίνει στην τεχνολογία ένα «ανθρώπινο» πρόσωπο έτσι ώστε να γίνει ελκυστική σε αυτόν που απευθύνεται προς χρήση. Ο σχεδιασμός, επίσης, είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες πολιτισμικής και οικονομικής ανταλλαγής μεταξύ ανθρώπων (σύμφωνα με τον International Council of Societies of Industrial Design - ICSID). Συνεπώς, οι βιομηχανικοί σχεδιαστές εξετάζουν τη λειτουργία και τη μορφή του προϊόντος και αποτελούν το σύνδεσμο μεταξύ του προϊόντος και του χρήστη. Δεν σχεδιάζουν και μελετούν σε λεπτομέρεια τα συστατικά του προϊόντος, όπως, για παράδειγμα, τους τροχούς ή τους κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν για να κινήσουν ένα μηχανισμό ή ένα σύστημα ελέγχου. Συνήθως συνεργάζονται με μηχανικούς μελετητές και με το εμπορικό τμήμα της επιχείρησης, για να αναγνωρίσουν και να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις και τις επιθυμίες των χρηστών με ένα προϊόν που θα είναι υλοποιήσιμο και βιώσιμο. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι ιδέες που οδήγησαν τον βιομηχανικό σχεδιαστή Ross Lovegrove στη σχεδίαση μερικών προϊόντων.

Σχήμα 2.2

Προϊόντα από τον βιομηχανικό σχεδιαστή Ross Lovegrove και οι ιδέες που τον οδήγησαν στη σχεδίασή τους.



Created for Welsh mineral water company Ty Nant between 1999 and 2001, it not only looks like a twist of running water, but can also be crushed for more efficient disposal and is easier for children and the elderly to grasp than regular bottles.



A vehicle that contributes to a cleaner, more joyful world. It would contain few parts, be athletic but not aggressive, lean, efficient and transparent in order to allow drivers to look out at the world going by.



The first project to be designed and produced by Lovegrove, this staircase looks like a strand of life itself. Lovegrove likes to say DNA - design, nature, art.

Στο στάδιο αυτό δίνονται τα πρώτα σχέδια και η μορφή του προϊόντος, προσδιορίζονται τα κριτήρια μελέτης από τις γενικές απαιτήσεις για το προϊόν, ελέγχεται η λειτουργικότητά του και η αποδοχή του από τους πελάτες. Τα συστήματα CAID (computer aided industrial design) χρησιμοποιούνται κυρίως στο στάδιο του σχεδίου του προϊόντος και αποτελούν βασικό εργαλείο του βιομηχανικού σχεδιασμού.

Το λογισμικό πρέπει να ενισχύει τη δημιουργικότητα του βιομηχανικού σχεδιαστή στο έργο της μετατροπής των απαιτήσεων για το προϊόν σε σχέδια προϊόντος. Πρέπει να προσομοιάζει τα βασικά στάδια και τις λειτουργίες που εκτελούνται σε ένα περιβάλλον βιομηχανικού σχεδιασμού (Σχήμα 2.3), όπως:

- *Δημιουργία ιδέας.* Οι ιδέες σε πρώτο στάδιο βασίζονται στη χρήση σκίτσου και εικόνας για την παρουσίαση των εναλλακτικών λύσεων από τις οποίες στη συνέχεια επιλέγεται η βέλτιστη δυνατή.
- *Χρήση παλαιότερων μορφών προϊόντων* για τις οποίες υπάρχουν ήδη τελικά σχέδια. Επίσης πρέπει να γίνεται εξαγωγή των σκίτσων και των σχεδίων σε τρισδιάστατο περιβάλλον, όπου γίνεται η απεικόνιση και παρουσίαση του προϊόντος.
- *Εισαγωγή κριτηρίων μελέτης σε κάθε στάδιο*, ώστε να αποφεύγονται λύσεις που δεν πληρούν τα κριτήρια.
- *Επισκόπηση της μελέτης*, τόσο στο δισδιάστατο σχέδιο όσο και στο τρισδιάστατο μοντέλο σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ή παρουσίασης.
- *Δυνατότητα αντίστροφης μηχανικής* (reverse engineering). Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου με λεπτομερή ψηφιακή αποτύπωση της μορφής πρωτοτύπων σε φυσικό ή υπό κλίμακα μέγεθος.
- *Μεταφορά και χρήση των μοντέλων* που παράγονται από το σύστημα βιομηχανικού σχεδιασμού σε άλλα συστήματα CAD για ακριβή μοντελοποίηση και μελέτη, ώστε να αποφεύγονται επαναλήψεις των ίδιων διαδικασιών σχεδίασης.

Συνεπώς, οι βασικές απαιτήσεις από ένα αντίστοιχο σύστημα CAID είναι:

- *Ευκολία χρήσης και μάθησης*, καθώς οι περισσότεροι χρήστες συνήθως δεν απασχολούνται αποκλειστικά με το σύστημα, δεν έχουν επαρκή χρόνο για την εκμάθηση του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι αποδοτικοί στην εργασία τους σε μικρό χρονικό διάστημα και για τη συχνότητα για την οποία χρησιμοποιούν το σύστημα.
- *Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης* υπάρχοντων σχεδίων. Πρέπει να μπορεί να διαβάζει δεδομένα από άλλα συστήματα CAID και CAD και αποτελέσματα από συστήματα ανάλυσης.
- *Ενσωμάτωση εργαλείων σχεδίασης* σε δύο διαστάσεις και εργαλεία διάταξης. Τα πρώτα σχέδια του προϊόντος είναι σε δύο διαστάσεις και σε μορφή σκί-

τσου. Ένα σύστημα CAID πρέπει να υποστηρίζει την εύκολη δημιουργία σκίτσων και να είναι ευέλικτο στη μετάβαση από το σκίτσο στο ακριβές μαθηματικό σχέδιο. Η συνήθης σειρά λειτουργίας είναι να δημιουργηθεί πρώτα το σκίτσο του προϊόντος (form generation) και στη συνέχεια το σκίτσο αυτό να ψηφιοποιηθεί και να αποδοθεί η μορφή του με γεωμετρικές καμπύλες (mathematical model generation).

- *Απλό αλλά ακριβείας σύστημα τρισδιάστατης μοντελοποίησης.* Πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα απόδοσης της τρισδιάστατης μορφής με μεγάλη ευκολία. Συνήθως, με βάση το μαθηματικό μοντέλο από το προηγούμενο στάδιο προσαρμόζονται τμήματα επιφανειών μεταξύ των καμπυλών που έχουν ψηφιοποιηθεί, ώστε να αποδοθεί πλήρως η εξωτερική μορφή του. Επιπλέον επιτρέπουν και τη δημιουργία πρόσθετης μορφής σε τμήματα των επιφανειών ώστε να αποδώσουν και χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα, π.χ. λεπτομέρειες χερουλιού σε μια πόρτα αυτοκινήτου. Οι επιφάνειες που παράγονται εξετάζονται με τη χρήση συστημάτων φωτισμού και ρεαλισμού, ώστε να δίνουν μια πιο ολοκληρωμένη και εύκολα κατανοητή εικόνα του προϊόντος. Το σύστημα πρέπει επίσης να επιτρέπει και τη δημιουργία κάποιων συναρμολογήσεων χωρίς να υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ανάλυσης.
- *Δυνατότητα κινηματικής ανάλυσης σε δύο και τρεις διαστάσεις.* Πολλά από τα προϊόντα απαιτούν κινηματική ανάλυση πριν από την έναρξη της λεπτομερούς μοντελοποίησης. Είναι απαραίτητο εργαλείο σε αυτά τα συστήματα. Η μελέτη σχεδιασμού προϊόντων που απαιτούν κινούμενα αντικείμενα χρειάζεται εργαλεία για την ανάλυση συναρμολογήσεων σε συνθήκες λειτουργίας. Η κινηματική ανάλυση είναι απαραίτητη τόσο στη δύο διαστάσεων γεωμετρία στα πρώτα στάδια της μελέτης όσο και στην τριών διαστάσεων στην τελική συναρμολόγηση ή στο ψηφιακό πρωτότυπο. Στην απλή διδιάστατη ανάλυση ο μηχανικός επιλέγει τις γραμμές που συνιστούν ένα σώμα και που κινούνται ταυτόχρονα. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να μπορεί να ορίζει τις ιδιότητες των συνδέσμων και τις κινήσεις, για να μελετηθεί το εύρος της κίνησης. Από αυτή την ανάλυση μπορεί να προσδιορίσει τον απαιτούμενο χώρο που πρέπει να παρέχεται στα επόμενα στάδια της μελέτης.
- *Συμβατότητα και επικοινωνία με σύστημα CAD.* Τα δεδομένα που προσδιορίζονται στο στάδιο της δημιουργίας του σχεδίου του προϊόντος πρέπει να μεταφέρονται με ακρίβεια στο σύστημα CAD για μηχανολογική μοντελοποίηση, χωρίς να απαιτείται πολύ διόρθωση στα δεδομένα και να μην απαιτείται η επανασχεδίαση της γεωμετρίας που έχει οριστεί από τα συστήματα βιομηχανικού σχεδιασμού.

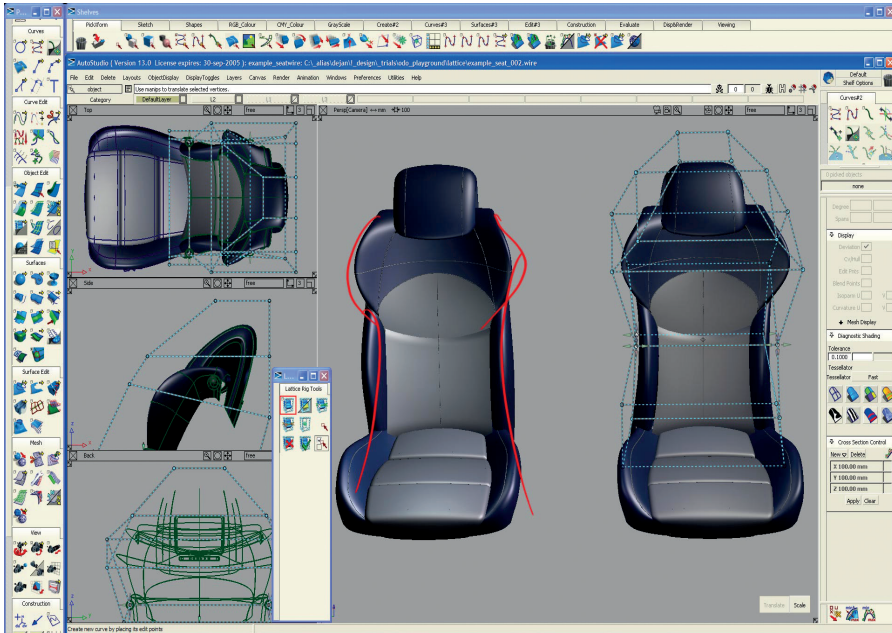
Πίνακας 2.1

Οι δυνατότητες ενός συστήματος CAID μαζί με αναλυτικό παράδειγμα εφαρμογής.

Δυνατότητες	Εφαρμογή	Παράδειγμα
<p>Παραμετρική και ελεύθερη σχεδίαση (freeform and parametric sketching). Στο στάδιο της δημιουργίας της ιδέας του προϊόντος δεν απαιτείται το σύστημα να έχει όλη τη λειτουργικότητα που δίνει ένα σύστημα μηχανολογικής σχεδίασης, αλλά βασικά εργαλεία για σκίτσο και σχέδιο, εργαλεία επεξεργασίας όλου του σχεδίου ή τμημάτων του και εργαλεία χρωματισμού. Οι παραμετρικές δυνατότητες που υπάρχουν στη στερεά μοντελοποίηση παρέχονται εδώ στη διδιάστατη σχεδίαση.</p>	<p>Με τη χρήση του StudioPaint ο χρήστης σχεδιάζει μια ποικιλία διαφορετικών σχεδίων του προϊόντος. Διαθέτει ποικιλία εργαλείων απόδοσης μορφής που βασίζονται στη γεωμετρία NURBS για τη δημιουργία καμπυλών ελεγχόμενης μορφής.</p>	
<p>Τα συστήματα αυτά παρέχουν ισχυρή και ευέλικτη μοντελοποίηση με ιδιαίτερη έμφαση στην απεικόνιση πολύπλοκων μορφών με επιφάνειες ελεύθερης μορφής και διαμόρφωση μορφής στην πραγματική απεικόνιση του προϊόντος.</p>	<p>Το χρώμα και η υφή είναι σημαντικοί παράγοντες για να αποδοθεί η μορφή και ο χαρακτήρας του σχεδίου. Διατίθεται μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και υφής.</p>	
<p>Τα συστήματα μπορούν να κάνουν χρήση της γεωμετρίας που έχει δημιουργηθεί στις δύο διαστάσεις και δεν απαιτούν επανάληψη της διαδικασίας.</p>	<p>Το διδιάστατο σκίτσο εισάγεται στο Studio και χρησιμοποιείται ως οδηγός για τη δημιουργία του τριδιάστατου μοντέλου που θα συλλαμβάνει όλη την αρχική πρόθεση του σχεδιαστή. Η μορφή και το σχήμα του σκίτσου προσεγγίζεται με καμπύλες NURBS. Παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της καμπυλότητας για να εξεταστεί η ομαλότητα των καμπυλών.</p>	
<p>Ολοκλήρωση της διδιάστατης με την τριδιάστατη μοντελοποίηση. Πολλά σχέδια προϊόντος μπορούν να παρουσιαστούν σε δύο διαστάσεις. Τα περισσότερα όμως απαιτούν τρεις διαστάσεις. Το σκίτσο αυτόματα μεταφράζεται σε καμπύλες ακριβείας ελεύθερης μορφής που στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για την απόδοση της τριδιάστατης μορφής.</p>	<p>Υπάρχει μια σειρά εργαλείων για τη δημιουργία επιφανειών με δυνατότητες τομής και αποκοπής επιφανειών με μεγάλη ακρίβεια.</p>	
<p>Δυνατότητες τροποποίησης μορφής και εξέτασης των αποτελεσμάτων σε συνθήκες λειτουργίας (π.χ. ανάκλαση φωτός), πολύ καλά γραφικά με βάση δεδομένους με δομές και υλικά, έγχρωμες απεικονίσεις με δυνατότητα φωτισμού.</p>	<p>Υψηλού επιπέδου φωτορεαλισμός και κίνηση για την παρουσίαση και αξιολόγηση του προϊόντος.</p>	

Στον Πίνακα 2.1 περιγράφονται οι δυνατότητες ενός συστήματος CAID μαζί με αναλυτικό παράδειγμα εφαρμογής. Τυπικά συστήματα βιομηχανικού σχεδιασμού είναι τα: Alias, Pro/Designer - CDRS, NX/shape Studio, Rhinoceros - R McNeels & Ass, Adobe Illustrator κ.ά. (Σχήμα 2.3)

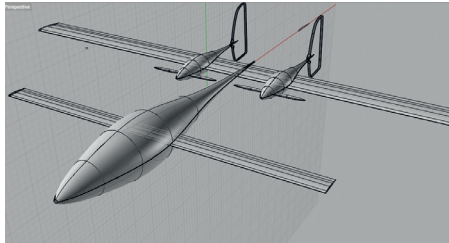
Σχήμα 2.3 Λογισμικό βιομηχανικού σχεδιασμού (studio tools).



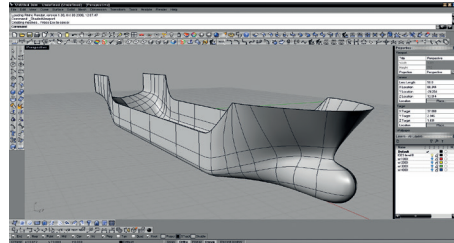
2.2 Μοντέλα επιφανειών

Τα μοντέλα επιφανειών (surface modeling) αποτελούν τη βάση για τα περισσότερα συστήματα βιομηχανικού σχεδιασμού με χρήση υπολογιστή. Με τα μοντέλα επιφανειών μοντελοποιείται ο φλοιός που περιβάλλει ένα αντικείμενο και αποδίδεται η εξωτερική του μορφή. Αντίθετα, δεν μπορεί να απεικονιστεί το πάχος του εξαρτήματος και δεν αναγνωρίζεται άμεσα αν είναι γεμάτο ή άδειο, το μέσα ή το έξω του.

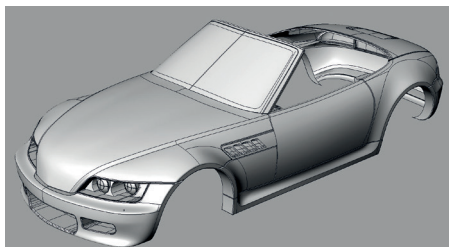
Η μέθοδος αυτή είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιείται από την πλειονότητα των χρηστών και μάλιστα των πιο μεγάλων, όπως είναι η αεροπορική βιομηχανία (Σχήμα 2.4α), η ναυπηγική βιομηχανία (Σχήμα 2.4β) και η αυτοκινητοβιομηχανία (Σχήμα 2.4γ). Πρόσφατα όμως χρησιμοποιείται και σε μικρές εταιρίες, όπως η υποδηματοποιία (Σχήμα 2.4δ), η συσκευασία (φιάλες, κιβώτια κ.λπ.) και για την παραγωγή χυτών, σφυρηλάτων και χυτοπρεσαριστών τεμαχίων. Είναι επίσης η βάση για τα συστήματα βιομηχανικού σχεδιασμού.

Σχήμα 2.4 Μοντέλα επιφανειών με το λογισμικό Rhinocerus.

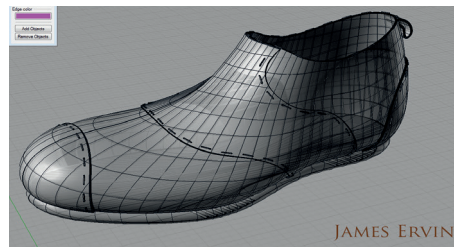
(α) Μοντέλο επιφάνειας αεροσκάφους



(β) Μοντέλο επιφάνειας κοίτης πλοίου με το Rhinocerus (Marino-Consult.eu)



(γ) Μοντέλο επιφάνειας αυτοκινήτου



(δ) Μοντέλο επιφάνειας υποδήματος (James Ervin)

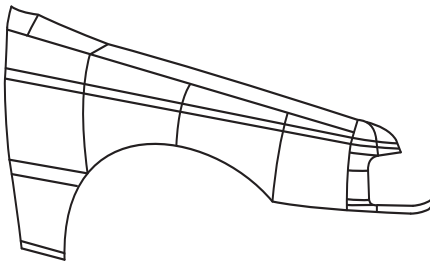
Με τα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται:

- Ακριβής αναπαράσταση της τελικής μορφής του αντικειμένου.
 - Δυνατότητα μοντελοποίησης σχεδόν κάθε αντικειμένου, με οποιαδήποτε μορφή όσο πολύπλοκο και εάν είναι αυτό ακόμα και για την απόδοση οργανικών μορφών.
 - Δυνατότητα απόκρυψης μη ορατών ακμών και επιφανειών αυτόματα.
 - Σκίαση και φωτορεαλισμός των μοντέλων για καλύτερη παρουσίαση.
 - Δυνατότητα χρήσης του μοντέλου για κάθετες εφαρμογές, όπως:
 - Δημιουργία πορείας κοπτικού εργαλείου για προγραμματισμό αριθμητικού ελέγχου οποιασδήποτε εργαλειομηχανής (φρέζα μέχρι 5 άξονες, σύρμα 2 ή 4 αξόνων, τόρνος, πρέσα, πλάσμα κ.λπ.). Η δυνατότητα αυτή είναι και το πιο ισχυρό πλεονέκτημα χρήσης των συστημάτων αυτών.
 - Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για ανάλυση ροής, θερμική ανάλυση, ανάλυση πλαστικών κ.λπ.
 - Υπολογισμός φυσικών ιδιοτήτων, επιφάνεια, όγκος κ.λπ.
 - Τομή και έλεγχος παρεμβολής αντικειμένων.
- Εντούτοις παρουσιάζουν και μειονεκτήματα χρήσης, όπως:
- Δεν ενδείκνυνται για παραγωγή σχεδίων, επειδή η διαδικασία δημιουργίας των όψεων είναι χρονοβόρα.

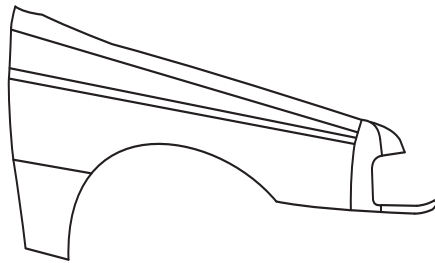
- Απαιτείται η γνώση της μαθηματικής αναπαράστασης των καμπυλών και των επιφανειών, ιδιαίτερα για τη διαχείριση επιφανειών ελεύθερης μορφής, με τις οποίες είναι δυνατή η αναπαράσταση των πολύπλοκης μορφής αντικειμένων. Τα πρώτα συστήματα στηρίχθηκαν στη μέθοδο Bézier, ακολούθησε η αναπαράσταση με B-Splines και σήμερα όλα τα συστήματα στηρίζονται στις ανομοιόμορφες ρητές B-Splines (Non Uniform Rational B-splines - NURBS).
- Συνήθως είναι πολύπλοκα μοντέλα, με μεγάλη απαίτηση επεξεργασίας και η πολυπλοκότητα αυτή εξαρτάται και από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο αναπαράστασης των καμπυλών και επιφανειών.
- Η δημιουργία του μοντέλου είναι επίπονη και απαιτεί τη δημιουργία και διαχείριση κάποιου μοντέλου ακμών. Πάνω από αυτό το μοντέλο δημιουργούνται τα διάφορα τμήματα επιφανειών (surface patches). Αυτές οι επιφάνειες πρέπει να ενώνονται μεταξύ τους με την επιθυμητή συνέχεια και στο τέλος συνιστούν το φλοιό του εξαρτήματος. Το πλήθος των τμημάτων που απαιτούνται για την απόδοση μιας μορφής εξαρτάται και από τη μέθοδο αναπαράστασης των καμπυλών και των επιφανειών (Σχήμα 2.5).

Σχήμα 2.5

Επίδραση του είδους της επιφάνειας στο τελικό μοντέλο επιφανειών του ίδιου αντικειμένου.



(α) Απεικόνιση με Bézier



(β) Απεικόνιση με NURBS.

Η γνώση της μαθηματικής αναπαράστασης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του μοντέλου είναι απαραίτητη στο μηχανικό, για να κάνει τη σωστή επιλογή του είδους της επιφάνειας που θα χρησιμοποιήσει και για να κατανοήσει τις μεταβλητές που απαιτούνται από το σύστημα.

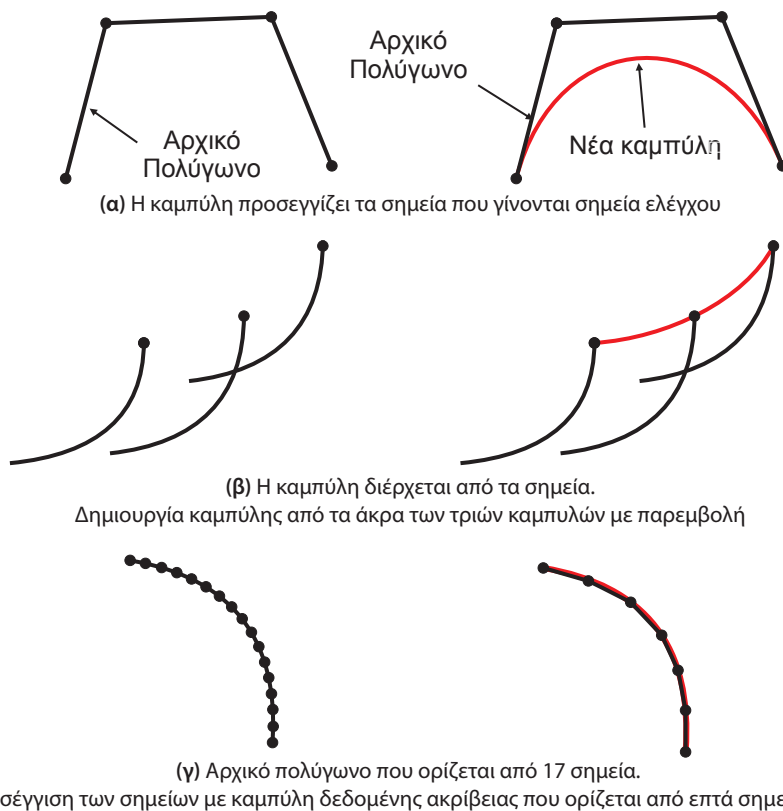
2.3 Μοντελοποίηση με συστήματα επιφανειών

Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούν τα συστήματα μοντελοποίησης με επιφάνειες είναι τα σημεία, οι καμπύλες και οι επιφάνειες.

2.3.1 Καμπύλες

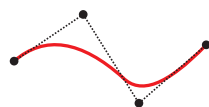
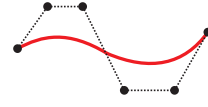
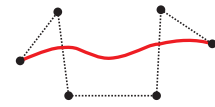
Οι καμπύλες μπορεί να είναι ευθύγραμμα τμήματα, τόξα, κύκλοι, πολύγωνα, ελλείψεις, έλικες ή ελεύθερης μορφής, ανοικτές ή κλειστές. Τμήματα καμπυλών μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια σύνθετη καμπύλη. Στον ορισμό καμπυλών ελεύθερης μορφής έχουμε τρεις επιλογές για τον ορισμό της καμπύλης (Σχήμα 2.6).

Σχήμα 2.6 Μέθοδοι προσαρμογής καμπύλης σε σειρά σημείων.

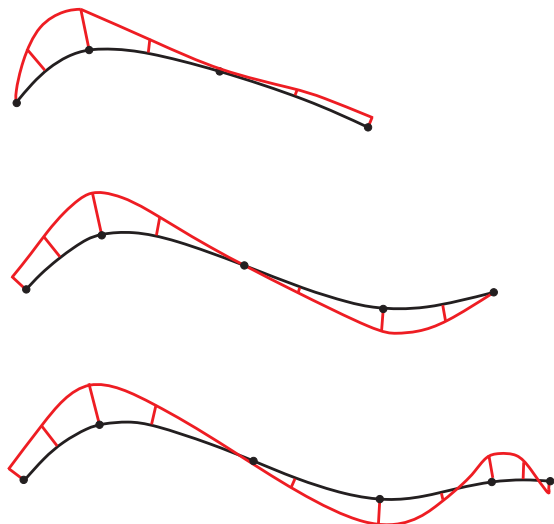


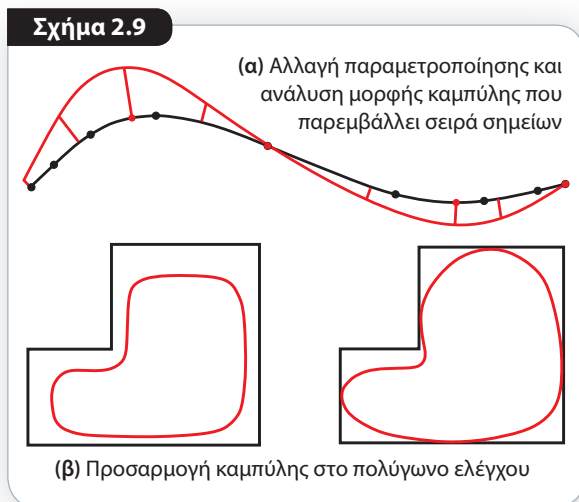
Στην πρώτη περίπτωση η καμπύλη προσεγγίζει τα σημεία που δημιουργούν το αρχικό πολύγωνο ελέγχου (τα σημεία γίνονται σημεία ελέγχου της καμπύλης). Η καμπύλη, ανάλογα με το είδος της, περνάει από το πρώτο και το τελευταίο σημείο ελέγχου και προσεγγίζει τα υπόλοιπα. Ανάλογα με την κατανομή των σημείων είναι και η τελική μορφή της καμπύλης. Χρησιμοποιείται για την απόδοση της αρχικής μορφής μιας καμπύλης ελεύθερης μορφής την οποία στη συνέχεια θα μεταβάλλουμε ανάλογα με το σχήμα που προσεγγίζουμε. Συνήθως ορίζουμε μια καμπύλη 3^{ου}

μέχρι 5^{ου} βαθμού, καθώς καμπύλες μεγαλύτερου βαθμού δεν είναι πρακτικές στη χρήση τους, επειδή αποκλίνουν πολύ από τη μορφή του πολύγωνου ελέγχου και είναι πιο δύσκολος ο έλεγχος της μορφής της καμπύλης. Στο πρώτο στάδιο πρέπει να προσδιοριστεί ο ελάχιστος αριθμός των σημείων ελέγχου της καμπύλης. Για μια κυρτή καμπύλη (μορφής C), τέσσερα σημεία ελέγχου είναι επαρκή (τρίτου βαθμού καμπύλη), (Σχήμα 2.7α). Για μια καμπύλη με κυρτά και κοίλα τμήματα (μορφής S ή M) απαιτούνται από τέσσερα έως έξι σημεία ελέγχου (βαθμός καμπύλης 3 έως 5), (Σχήμα 2.7β-δ). Επιπλέον, για τον έλεγχο της καμπύλης μπορούμε να αποδώσουμε και βάρος σε κάθε σημείο ελέγχου.

Σχήμα 2.7**Μορφές καμπύλης Bézier ανάλογα με τη θέση των σημείων ελέγχου.****(α)** Κυρτή καμπύλης μορφής C 3^{ου} βαθμού**(β)** Καμπύλης μορφής S 3^{ου} βαθμού**(γ)** Καμπύλης μορφής S 5^{ου} βαθμού**(δ)** Καμπύλης μορφής M 5^{ου} βαθμού

Στη δεύτερη περίπτωση η καμπύλη παρεμβάλλει ακριβώς όλα τα σημεία (υπολογίζονται τα σημεία ελέγχου της καμπύλης) και το σύστημα δημιουργεί μια καμπύλη τύπου spline. Σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ δύσκολο να κάνουμε την καμπύλη να περνάει από όλα τα σημεία που έχουμε ορίσει και να έχει τις ιδιότητες που θέλουμε. Εάν έχουμε πολλά σημεία ανομοιομορφα κατανεμημένα, τότε σε ορισμένα τμήματα η καμπύλη απομακρύνεται και σε άλλα μπορεί να αλλάζει κύρτωση (από κοίλη σε κυρτή). Για τρία ή τέσσερα σημεία δεν υπάρχει πρόβλημα, αλλά για περισσότερα σημεία είναι δύσκολο η καμπύλη να παραμείνει ομαλή (Σχήμα 2.8). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται από το χρήστη να αλλάξει την

Σχήμα 2.8**Ανάλυση της μορφής της καμπύλης που ορίζεται από παρεμβολή σε σειρά σημείων.**



παραμετροποίηση της καμπύλης και αντί της απλής ομαλής παραμετροποίησης να χρησιμοποιήσει πιο πολύπλοκη παραμετροποίηση τύπου τόξου (chord), τετραγώνου τόξου (SqrChord) ή κεντρομόλου (centripetal) ή να ορίσει ειδικές επιλογές για να προσαρμόσει το σχήμα της καμπύλης (Σχήμα 2.9).

Στην τρίτη περίπτωση η καμπύλη προσεγγίζει και/ή παρεμβάλλει ορισμένα σημεία

με δεδομένη ακρίβεια. Με τη μέθοδο αυτή συνήθως για τον ορισμό της καμπύλης απαιτούνται πολύ λιγότερα σημεία ελέγχου, σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που τα σημεία ορισμού είναι πάρα πολλά και στα σημεία αυτά υπάρχει κάποιο σφάλμα που προέρχεται από τη μέθοδο υπολογισμού τους. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση που προσαρμόζονται καμπύλες τύπου NURBS σε μια σειρά από σημεία που προέρχονται από ψηφιοποίηση μορφών με αυτόματη διαδικασία (π.χ. σαρωτές τύπου laser για αντίστροφη μηχανική).

2.3.2 Στοιχεία ορισμού σε καμπύλες/επιφάνειες

Τα σύγχρονα συστήματα μοντελοποίησης με επιφάνειες στηρίζονται στη χρήση καμπυλών και επιφανειών τύπου NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Η ακριβής μαθηματική εξήγηση των καμπυλών/επιφανειών θα γίνει σε επόμενα κεφάλαια, αλλά στην ενότητα αυτή θα δώσουμε τον ορισμό τους και τη βασική θεωρία, ώστε ο χρήστης να μπορέσει να κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων. Οι έννοιες που θα αναλυθούν θα αναφέρονται κύρια σε καμπύλες αλλά είναι ακριβώς οι ίδιες και για τις επιφάνειες. Στην περίπτωση της καμπύλης οι έννοιες αναφέρονται σε μια διάσταση, ενώ για τις επιφάνειες έχουμε δύο κατευθύνσεις ορισμού.

Οι καμπύλες τύπου NURBS ορίζονται από ένα σύνολο σημείων στο χώρο που ονομάζονται σημεία ελέγχου και όταν ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζουν το πολύγωνο ελέγχου ή κέλυφος. Η καμπύλη προσεγγίζει το σχήμα του πολυγώνου ελέγχου και μπορεί να ξεκινάει από το πρώτο σημείο ελέγχου και να καταλήγει στο τελευταίο σημείο ελέγχου. Αυτό εξαρτάται από το είδος της καμπύλης. Μια καμπύλη NURBS αποτελείται από ένα ή περισσότερα επιμέρους τμήματα καμπυλών και ανάλογα με τον αριθμό των επιμέρους τμημάτων η καμπύλη μπορεί να είναι τύ-

που Bézier ή B-Splines. Μια καμπύλη τύπου Bézier αποτελείται από ένα μόνο τμήμα και διέρχεται από τα ακραία σημεία ελέγχου. Μια καμπύλη τύπου B-Splines περνάει από τα ακραία σημεία ελέγχου ανάλογα με τον τύπο παραμετροποίησης. Η **παραμετροποίηση** μπορεί να είναι δεσμευμένη ή ανοικτή, και η καμπύλη διέρχεται από αυτά, ή περιοδική και η καμπύλη δεν περνάει από το πρώτο και το τελευταίο σημείο ελέγχου. Η μορφή της καμπύλης καθορίζεται από τις **συναρτήσεις μείξης ή βασικές συναρτήσεις** των σημείων ελέγχου που καθορίζουν ποια τμήματα της καμπύλης (όταν είναι περισσότερα του ενός) και πόσο ακριβώς κάθε σημείο της καμπύλης επηρεάζει το καθένα σημείο ελέγχου. Τα σημεία ελέγχου μπορεί να επηρεάζουν με το ίδιο **βάρος** τη μορφή της καμπύλης ή σε ορισμένα από αυτά να αυξήσουμε το βάρος επιρροής τους στην καμπύλη, αποδίδοντας μια τέταρτη διάσταση, το βάρος του σημείου ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή οι συντεταγμένες των σημείων $x(u)$, $y(u)$ και $z(u)$ υπολογίζονται από το πηλίκο δύο πολυωνύμων βαθμού ίσου με το βαθμό της καμπύλης και οι καμπύλες ονομάζονται ρητές καμπύλες [(ρητές καμπύλες Bézier και ρητές καμπύλες B-Splines (NURBS))].

Για τον ορισμό κάθε σημείου πάνω σε μια καμπύλη χρησιμοποιείται η παραμετρική αναπαράσταση και η σειρά με την οποία ορίζουμε τα σημεία ελέγχου ορίζει και τη διεύθυνση παραμετροποίησης της καμπύλης. Η παραμετρική αναπαράσταση ορίζει τις καρτεσιανές συντεταγμένες (X , Y και Z) κάθε σημείου στην καμπύλη σε συνάρτηση με μια ανεξάρτητη παράμετρο (συνήθως συμβολίζεται ως u ή t). Η καμπύλη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελείται συνήθως από περισσότερα του ενός τμήματα και τα σημεία στα οποία ενώνονται τα τμήματα μεταξύ τους ονομάζονται **σημεία επεξεργασίας ή κόμβοι**. Ο αριθμός των τμημάτων εξαρτάται από το βαθμό της καμπύλης που επιλέγουμε να προσεγγίσει τα σημεία ελέγχου και τον αριθμό των σημείων ελέγχου. Όταν η καμπύλη αποτελείται από ένα μόνο τμήμα, τότε αποτελεί μια καμπύλη Bézier και η παράμετρος ορισμού είναι $0 \leq u \leq 1$, ενώ στις καμπύλες με n τμήματα η παράμετρος ορισμού ορίζεται μεταξύ $0 \leq u \leq n$. Οι συναρτήσεις μείξης ορίζονται με βάση την παράμετρο ορισμού u της καμπύλης.

Οι τιμές της παραμέτρου ορισμού στις οποίες αντιστοιχούν οι κόμβοι συνιστούν τμήμα του διάνυσματος κόμβων ή **τιμές κόμβων** και οι τιμές αυτές είναι πάντα κατ' αύξουσα τιμή κατανεμημένες. Ο αριθμός των τιμών στο διάνυσμα των κόμβων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των σημείων επεξεργασίας ή κόμβων. Οι τιμές στο διάνυσμα κόμβων μπορεί να είναι ισάπεχουσες μεταξύ τους και συνιστούν μια **ομοιόμορφη παραμετροποίηση** ή να είναι άτακτα αλλά κατ' αύξουσα τάξη κατανεμημένες και συνιστούν μια **ανομοιόμορφη παραμετροποίηση**. Η επιλογή του τρόπου παραμετροποίησης σχετίζεται και με την κατανομή των σημείων ελέγχου της καμπύλης. Εάν οι πλευρές του πολύγωνου ελέγχου έχουν περίπου το ίδιο μήκος, τότε η ομοιόμορφη παραμετροποίηση είναι κατάλληλη, ενώ όταν υπάρχουν διαφορές στα μήκη των πλευρών, τότε η ανομοιόμορφη παραμετρο-

ποίηση κρίνεται πιο κατάλληλη. Στη συνέχεια θα αναπτύξουμε τις βασικές έννοιες των καμπυλών πιο αναλυτικά και θα δώσουμε και την εφαρμογή τους στις επιφάνειες. Ο ακριβής ορισμός τους θα δοθεί στη μαθηματική αναπαράσταση των σχημάτων ορισμού των καμπυλών και επιφανειών στα επόμενα κεφάλαια.

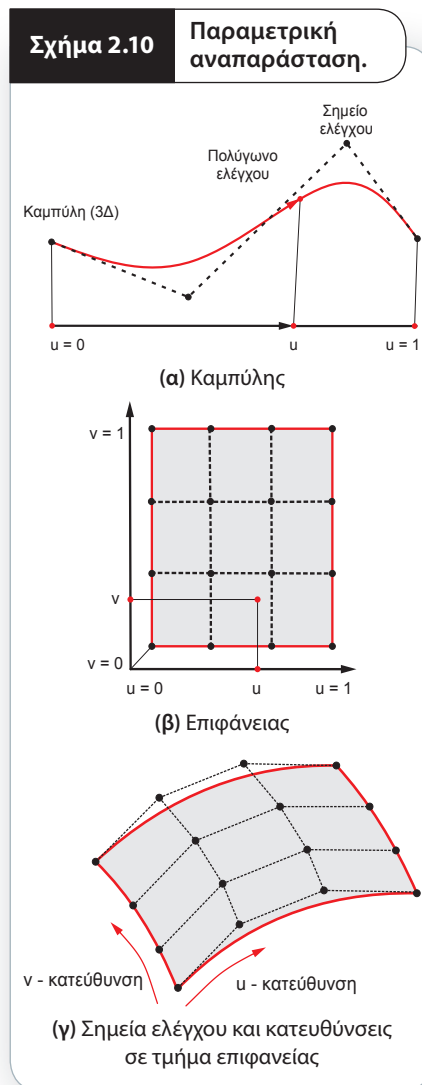
2.3.2.1 Παραμετρική αναπαράσταση

Οι καμπύλες και επιφάνειες ελεύθερης μορφής εκφράζονται με τη χρήση της παραμετρικής αναπαράστασης. Για τον ορισμό της καμπύλης δεν χρησιμοποιείται η πεπλεγμένη μορφή $Z = f(X, Y)$ αλλά εξισώσεις της μορφής $X = f_x(u)$, $Y = f_y(u)$ και $Z = f_z(u)$. Η παράμετρος u ορίζει κάθε σημείο στην καμπύλη. Στις καμπύλες Βέζιερ που αποτελούνται από ένα μόνο τμήμα, η παράμετρος ορισμού ορίζεται μεταξύ 0 και 1 ($0 < u < 1$) (Σχήμα 2.10α), ενώ στις καμπύλες τύπου NURBS οι τιμές είναι $0 < u < n$, για μια καμπύλη B-splines που αποτελείται από n τμήματα.

Οι επιφάνειες στα συστήματα CAD είναι τετράπλευρου τύπου (ορίζονται από τέσσερις οριακές καμπύλες) και υπάρχουν δύο παράμετροι ορισμού, u και v , και οι παραμετρικές εξισώσεις είναι $X = f_x(u, v)$, $Y = f_y(u, v)$ και $Z = f_z(u, v)$. Σε αντιστοιχία με τις καμπύλες, οι τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται μεταξύ $0 < u < 1$, $0 < v < 1$, για τμήματα επιφανειών Βέζιερ (Σχήμα 2.10β, γ) και $0 < u < m$, $0 < v < n$ για επιφάνεια τύπου B-splines που αποτελείται από $m \times n$ επιμέρους τμήματα.

Ένας έμμεσος τρόπος κατανόησης της απεικόνισης της καμπύλης είναι με την έννοια ενός σημείου που ταξιδεύει πάνω στην καμπύλη. Η παράμετρος u αντιπροσωπεύει το χρόνο και οι συντεταγμένες (X , Y) αντιπροσωπεύουν τη θέση του σημείου στην καμπύλη στο χρόνο u .

Αντίστοιχα σε μια επιφάνεια το σημείο κινείται ανεξάρτητα και προς τις δύο κατευθύνσεις με διαφορετική ταχύτητα όμως σε κάθε κατεύθυνση (Σχήμα 2.10β).



2.3.2.2 Σημεία ελέγχου

Κάθε καμπύλη ορίζεται από τα σημεία ελέγχου (control points) (Σχήμα 2.10α), τα οποία δεν βρίσκονται όλα πάνω στην καμπύλη/επιφάνεια που ορίζουν. Τα σημεία ελέγχου όταν ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζουν το πολύγωνο ελέγχου ή κέλυφος (hull) και προσδιορίζουν τη μορφή της καμπύλης. Κάθε σημείο της καμπύλης προσδιορίζεται από το σταθμισμένο άθροισμα ενός αριθμού από τα σημεία ελέγχου. Συνεπώς, η μετακίνηση ενός σημείου ελέγχου επηρεάζει την καμπύλη σε μια περιοχή που εξαρτάται από το βαθμό της καμπύλης (μικρός βαθμός αντιστοιχεί σε μικρή περιοχή, μεγάλος βαθμός σε μεγάλη περιοχή μεταβολής). Στις καμπύλες Bézier όλη η καμπύλη επηρεάζεται από τη μετακίνηση ενός σημείου ελέγχου. Κάθε σημείο πάνω στην καμπύλη/επιφάνεια μετακινείται πάντοτε λιγότερο από την αντίστοιχη μετακίνηση του σημείου ελέγχου. Συνήθως τα σημεία ελέγχου προσδιορίζονται όταν η καμπύλη πρόκειται να προσεγγίσει μια άλλη δεδομένη καμπύλη, π.χ. καμπύλη από μια εικόνα. Ο γενικός κανόνας είναι να αρχίζουμε την προσέγγιση με λίγα σημεία ελέγχου, π.χ. τρία και ένα τμήμα, και προοδευτικά να προσθέτουμε σημεία ή τμήματα ώστε να αποδώσουμε τη μορφή που επιθυμούμε.

Στην περίπτωση μιας επιφάνειας τα σημεία ελέγχου κατανέμονται σε πίνακα (Σχήμα 2.10β, γ), δηλαδή έχουμε σειρές και στήλες σημείων ελέγχου και υπάρχει ο ίδιος αριθμός σημείων σε κάθε σειρά/στήλη του πίνακα των σημείων ελέγχου. Για τη μεταβολή της μορφής της επιφάνειας από τα σημεία ελέγχου ισχύουν αντίστοιχα με τις καμπύλες, αλλά η μεταβολή της επιφάνειας μέσω του σημείου ελέγχου έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί άμεσα να προσδιοριστεί η τελική μορφή της επιφάνειας, ενώ για τις καμπύλες το αποτέλεσμα είναι πιο προβλέψιμο.

2.3.2.3 Τμήματα και σημεία επεξεργασίας

Μια καμπύλη που ορίζεται από μια σειρά σημείων ελέγχου μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο τμήμα, και είναι ένα τμήμα Bézier, ή από περισσότερα τμήματα και είναι μια καμπύλη B-splines (Σχήμα 2.11α, β). Τα άκρα κάθε τμήματος ονομάζονται σημεία επεξεργασίας ή κόμβοι (edit points, knots). Μια μορφή καμπύλης μπορεί να αποδοθεί από πολλά τμήματα Bézier (Σχήμα 2.11γ) ή από μια καμπύλη B-splines που από μόνη της αποτελείται από περισσότερα επιμέρους τμήματα (Σχήμα 2.11δ). Τα σημεία επεξεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αλλαγή της μορφής της καμπύλης. Τα σημεία επεξεργασίας, και συνεπώς και τα τμήματα από τα οποία αποτελείται μια καμπύλη NURBS, μπορούν να αυξηθούν ή να μειωθούν και αντίστοιχα αλλάζει και η μορφή της καμπύλης. Ο αριθμός των τμημάτων εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων ελέγχου και το βαθμό της καμπύλης. Οι τιμές της παραμέτρου u ορισμού της καμπύλης στις οποίες αντιστοιχούν τα σημεία επεξεργασίας ανήκουν στο διάνυσμα κόμβων.