

[DCA] **DCA 06 Η Αρχιτεκτονική των Αντικειμένων**
[09-DCA-06-Η Αρχιτεκτονική των Αντικειμένων-ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ]
(σσ. 97-110, 14 σελίδες)

1. Επιλέξτε ένα προϊόν (ή απλό εξάρτημα) και δώστε ένα σχέδιο αρθρωτής αρχιτεκτονικής και ένα σχέδιο ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής για το προϊόν αυτό. Εξηγήστε την απάντησή σας. Εξαιρείται το παράδειγμα του βιβλίου (ρυμουλκούμενο όχημα) ή άλλα σχετικά αντικείμενα.

01-02-16 [ΘΕΜΑΤΑ - 1-1]

15-09-16 [ΘΕΜΑΤΑ - 1]

01-02-16 [ΘΕΜΑΤΑ - 2]

Επιλέξτε ένα προϊόν (ή απλό εξάρτημα) και δώστε ένα σχέδιο αρθρωτής αρχιτεκτονικής και ένα σχέδιο ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής για το προϊόν αυτό. Εξηγήστε την απάντησή σας. Εξαιρούνται το παράδειγμα του βιβλίου (ρυμουλκούμενο όχημα) ή άλλα σχετικά αντικείμενα.

20-02-18 [ΘΕΜΑΤΑ - 12 [3]]

2. Εξηγήστε πώς η επιλογή μεταξύ μίας αρθρωτής ή μίας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής επηρεάζει τις αλλαγές κατά τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.

01-02-16 [ΘΕΜΑΤΑ - 1-2]

15-09-16 [ΘΕΜΑΤΑ - 1]

3. Δώστε το σκαρίφημα **μίας βαλίτσας** και σχεδιάστε ένα διάγραμμα λειτουργιών για τη βαλίτσα αυτή. Εξηγήστε συνοπτικά την απάντησή σας.

06-02-17 [ΘΕΜΑΤΑ - 1-2]

4. Δώστε το σκαρίφημα **ενός θρανίου** και σχεδιάστε ένα διάγραμμα λειτουργιών για το θρανίο αυτό. Εξηγήστε συνοπτικά την απάντησή σας.

06-02-17 [ΘΕΜΑΤΑ - 1-3]

5. Δώστε το σκαρίφημα ενός **φορητού φακού** και σχεδιάστε ένα διάγραμμα λειτουργιών για τον φορητό αυτόν φακό. Εξηγήστε συνοπτικά την απάντησή σας.

06-02-17 [ΘΕΜΑΤΑ - 1-1]

6. Δώστε το σκαρίφημα ενός **ποδηλάτου** και σχεδιάστε ένα διάγραμμα λειτουργιών για το ποδήλατο αυτό. Εξηγήστε συνοπτικά την απάντησή σας.

06-02-17 [ΘΕΜΑΤΑ - 1-4]

Η Αρχιτεκτονική των Αντικειμένων

Η *Αρχιτεκτονική* πιο συχνά αναφέρεται ως η τέχνη ή η επιστήμη της δημιουργίας οικοδομημάτων. Ωστόσο, στο παρόν κεφάλαιο, θα χρησιμοποιήσω τον όρο, για να αναφερθώ στην οργανωτική δομή ενός αντικειμένου και πιο συγκεκριμένα στη διάταξη των *λειτουργιών* και της *δομής* του. Αυτή είναι η έννοια, με την οποία μιλάμε για την αρχιτεκτονική ενός υπολογιστή ή την αρχιτεκτονική ενός αυτοκινήτου. Για φυσικά αντικείμενα η δομή αποτελείται από φυσικά δομικά μέρη. Για το λογισμικό, τις υπηρεσίες ή άλλα άυλα αντικείμενα η δομή περιλαμβάνει τα άυλα δομικά στοιχεία—ρουτίνες, διαδικασίες, κώδικα—που χρησιμοποιούνται, για να συσταθεί το αντικείμενο.

Ορίζω την αρχιτεκτονική ενός αντικειμένου ακριβέστερα ως (1) τη διάταξη των λειτουργικών στοιχείων· (2) την αντιστοίχιση των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη· και (3) τον προσδιορισμό των διεπαφών μεταξύ των αλληλεπιδρώντων δομικών μερών. Αυτές οι έννοιες μπορεί να γίνουν αφηρημένες αρκετά γρήγορα, οπότε σε αυτήν την ενότητα θα εξηγήσω τα βασικά σημεία χρησιμοποιώντας το παράδειγμα ενός απλού ρυμουλκούμενου οχήματος. Αφού επεξηγήσω την ιδέα της αρχιτεκτονικής ενός αντικειμένου, θα διατυπώσω τις επιπτώσεις της αρχιτεκτονικής στα ζητήματα που έχουν σημασία για τους σχεδιαστές, τους παραγωγούς και τους χρήστες των αντικειμένων.¹

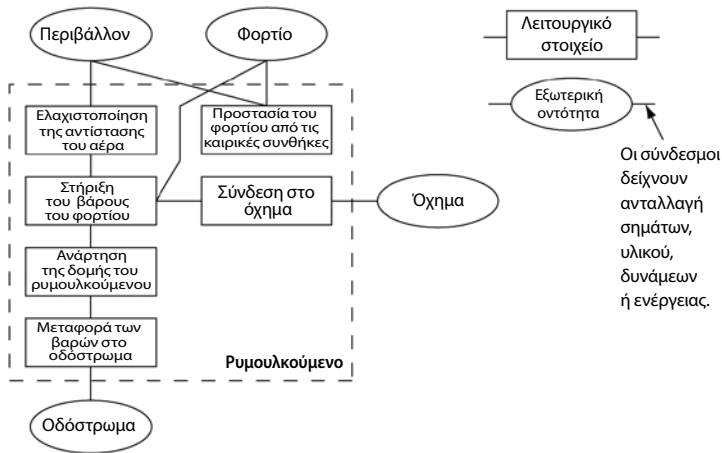
Η διάταξη των λειτουργικών στοιχείων

Η λειτουργία ενός αντικειμένου είναι αυτό που *κάνει* σε αντίθεση με τα δομικά χαρακτηριστικά του (Crilly 2010). Υπήρξαν αρκετές προσπάθειες στην επιστημονική κοινότητα της θεωρίας του σχεδιασμού να δημιουργηθούν τυπικές γλώσσες, για να περιγραφεί η λειτουργία (Finger and Dixon 1989) και υπήρξαν μέτριες επιτυχίες σε στενές περιοχές εφαρμογής, όπως τα ηλεκτρο- και ρευστο-μηχανικά συστήματα και τα ψηφιακά κυκλώματα (Mead and Conway 1980). Υπήρξαν επίσης προσπάθειες για τη δημιουργία άτυπων λειτουργικών γλωσσών, για να διευκολυνθεί η άσκηση του σχεδιασμού (Fowler 1990· Hubka and Eder 1988). Οι γλώσσες αυτές χρησιμοποιούνται μερικές φορές, για να δημιουργηθούν διαγράμματα που αποτελούνται από λειτουργικά στοιχεία τα οποία εκφράζονται με γλωσσικούς όρους, όπως *μετατρέψτε ενέργεια* και συνδέονται με συνδέσμους που υποδεικνύουν την ανταλλαγή σημάτων, υλικών,

δυνάμεων και ενέργειας. Μερικοί συγγραφείς άτυπων λειτουργικών γλωσσών παρέχουν ένα λεξιλόγιο προτύπων λειτουργικών στοιχείων, ενώ άλλοι βασίζονται στους χρήστες να επινοήσουν το δικό τους. Τα λειτουργικά στοιχεία μερικές φορές ονομάζονται *λειτουργικές απαιτήσεις* [*functional requirements* ή *functionives*] και τα διαγράμματα αυτά έχουν ποικιλοτρόπως κληθεί *διαγράμματα λειτουργιών* [*function diagrams*], *λειτουργικές περιγραφές* [*functional descriptions*] και *σχηματικές περιγραφές* [*schematic descriptions*] (Pahl and Beitz 1984). Εδώ θα καλέσω τη διάταξη των λειτουργικών στοιχείων και των διασυνδέσεών τους *διάγραμμα λειτουργιών* [*function diagram*]. Ένα παράδειγμα διαγράμματος λειτουργιών ενός ρυμουλκούμενου παρουσιάζεται στο Έκθεμα 6-1.

Διαγράμματα λειτουργιών μπορούν να δημιουργηθούν σε διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης. Στο πιο γενικό/αφηρημένο επίπεδο, το διάγραμμα λειτουργιών ενός ρυμουλκούμενου μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο λειτουργικό στοιχείο: επέκταση χωρητικότητας φορτίου.

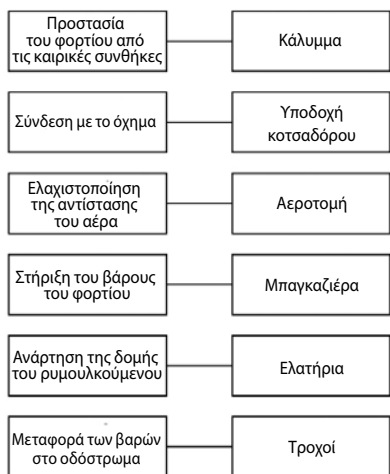
Σε ένα πιο λεπτομερές επίπεδο, το διάγραμμα λειτουργιών θα μπορούσε να καθορισθεί ότι αποτελείται από τη συλλογή των λειτουργικών στοιχείων που παρουσιάζονται στο Έκθεμα 6-1, δηλαδή, σύνδεση στο όχημα, προστασία του φορτίου από τις καιρικές συνθήκες, ελαχιστοποίηση της αντίστασης του αέρα, στήριξη του βάρους του φορτίου, ανάρτηση της δομής του ρυμουλκούμενου και μεταφορά των βαρών στο οδόστρωμα. Όταν εκφράζονται με περισσότερη λεπτομέρεια, τα διαγράμματα λειτουργιών εμπεριέχουν περισσότερες παραδοχές σχετικά με τις φυσικές αρχές λειτουργίας, πάνω στις οποίες βασίζεται το αντικείμενο. Για παράδειγμα, η “επέκταση χωρητικότητας φορτίου” δεν υποθέτει ότι το ρυμουλκούμενο θα είναι μία συσκευή ρυμουλκούμενη στον δρόμο (το ρυμουλκούμενο θα μπορούσε να είναι μία συσκευή ελαφρύτερη από τον αέρα), ενώ το πιο λεπτομερές διάγραμμα λειτουργιών που παρουσιάζεται στο Έκθεμα 6-1 όντως εμπεριέχει αυτήν την παραδοχή. Για τον λόγο αυτόν δύο προϊόντα, τα οποία στο πιο γενικό επίπεδο κάνουν το ίδιο πράγμα, μπορεί να έχουν διαφορετικά διαγράμματα λειτουργιών, όταν περιγράφονται σε ένα πιο λεπτομερές επίπεδο. Ενώ τα περισσότερα λειτουργικά στοιχεία περιλαμβάνουν την ανταλλαγή σημάτων, πληροφοριών, υλικών, δυνάμεων και ενέργειας, ορισμένα στοιχεία δεν αλληλεπιδρούν με άλλα λειτουργικά στοιχεία. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου στοιχείου μπορεί να είναι η “εναρμόνιση αισθητικά με το όχημα”.²



Έκθεμα 6-1. Διάγραμμα λειτουργιών ενός ρυμουλκούμενου οχήματος.

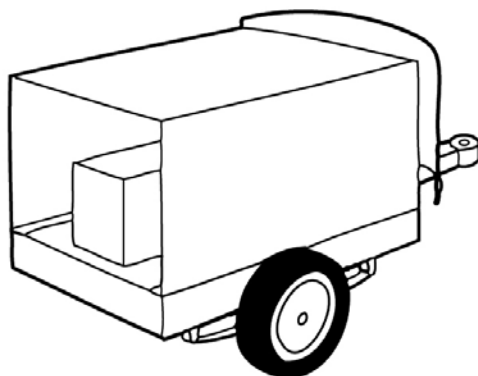
Η αντιστοίχιση των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη

Το δεύτερο μέρος της αρχιτεκτονικής των αντικειμένων είναι η αντιστοίχιση των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη. Ένα αντικείμενο αποτελείται από ένα ή περισσότερα δομικά μέρη. Για λόγους σαφήνειας, ορίζω ως δομικό μέρος ένα ξεχωριστό εξάρτημα ή υποσύστημα. Ωστόσο, για πολλά από τα επιχειρήματα που εκφέρονται στο κεφάλαιο, ένα δομικό μέρος μπορεί να θεωρηθεί ως οποιαδήποτε διακριτή περιοχή του αντικειμένου, το οποίο και επιτρέπει να συμπεριληφθεί, για παράδειγμα, μία υπορουτίνα λογισμικού στον ορισμό ενός δομικού μέρους. Ομοίως, διακριτές περιοχές ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, παρόλο που δεν είναι στην πραγματικότητα διαφορετικά φυσικά μέρη, θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως διαφορετικά δομικά μέρη. Τα δομικά μέρη υλοποιούν τα λειτουργικά στοιχεία του αντικειμένου. Η αντιστοίχιση μεταξύ λειτουργικών στοιχείων και δομικών μερών μπορεί να είναι ένα-προς-ένα, πολλά-προς-ένα ή ένα-προς-πολλά. Δύο διαφορετικά σχέδια ρυμουλκούμενου και οι σχετικές αντιστοιχίσεις των λειτουργικών στοιχείων και δομικών μερών παρουσιάζονται στα Εκθέματα 6-2 και 6-3.

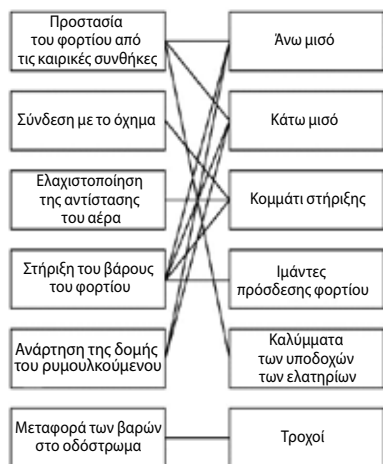


Λειτουργικά στοιχεία

Δομικά μέρη

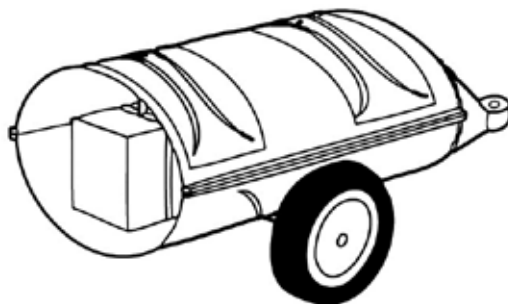


Έκθεμα 6-2. Ένα παράδειγμα μίας αντιστοίχισης ένα-προς-ένα μεταξύ λειτουργικών στοιχείων και δομικών μερών και ένα σχετικό ρυμουλκούμενο.



Λειτουργικά στοιχεία

Δομικά μέρη



Έκθεμα 6-3. Ένα παράδειγμα μίας σύνθετης αντιστοίχισης μεταξύ λειτουργικών στοιχείων και δομικών μερών και ένα σχετικό ρυμουλκούμενο.

Ο προσδιορισμός των διεπαφών μεταξύ αλληλεπιδρώντων δομικών μερών

Εξ ορισμού τα αλληλεπιδρώντα δομικά μέρη συνδέονται με κάποια διεπαφή. Οι διεπαφές μπορεί να περιλαμβάνουν γεωμετρικές συνδέσεις μεταξύ δύο δομικών μερών, όπως με ένα γρανάζι σε έναν άξονα, ή μπορεί να περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις χωρίς επαφή, όπως με τον σύνδεσμο υπέρυθρης επικοινωνίας μεταξύ ενός τηλεχειριστηρίου και μίας συσκευής τηλεόρασης. Ο προσδιορισμός των διεπαφών ορίζει το πρωτόκολλο για τις κύριες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διεπαφών και τη γεωμετρία της ζεύξης σε περιπτώσεις όπου υπάρχει γεωμετρική σύνδεση.

Για παράδειγμα, μία από τις διεπαφές του ρυμουλκούμενου στο Έκθεμα 6-2 είναι μεταξύ του καλύμματος και της μπαγκαζιέρας. Ο προσδιορισμός της διεπαφής περιλαμβάνει τις διαστάσεις των επιφανειών επαφής των δύο δομικών μερών, τις θέσεις και τα μεγέθη των οπών των κοχλιών και τη μέγιστη δύναμη που αναμένεται να δεχτεί η διεπαφή. Σημειώστε ότι οι διεπαφές μπορούν να καθοριστούν μέσω προδιαγραφών, ώστε να τηρούν ένα πρότυπο πρωτόκολλο. Παραδείγματα πρωτοκόλλων, τα οποία έχουν τυποποιηθεί για όλα τα προϊόντα πολλών διαφορετικών κατασκευαστών, είναι τα USB (Universal Serial Bus), τα πρότυπα ελαστικού/ζάντας των αυτοκινήτων, το βύσμα ήχου 3,5 mm των ακουστικών, το σπείρωμα σύνδεσης του λάστιχου του ποτίσματος και ένας κοτσαδόρος “τύπου μπάλας.” Οι κατασκευαστές μερικές φορές επιλέγουν να υιοθετήσουν ένα κοινό πρωτόκολλο για τις διεπαφές που χρησιμοποιούνται στη σειρά των προϊόντων τους, ακόμη και αν η διεπαφή δεν τηρεί ένα εξωτερικό (εκτός κλάδου) πρότυπο.

Μία Κατηγοριοποίηση των Αρχιτεκτονιών

Μία κατηγοριοποίηση των αρχιτεκτονιών παρέχει ένα λεξιλόγιο που διευκολύνει τη συζήτηση των επιπτώσεων της επιλογής της αρχιτεκτονικής για τον χρήστη και τον παραγωγό. Η πρώτη διάκριση στην κατηγοριοποίηση είναι ανάμεσα σε μία *αρθρωτή* αρχιτεκτονική και μία *ολοκληρωμένη* αρχιτεκτονική. Μία αρθρωτή αρχιτεκτονική περιλαμβάνει μία αντιστοίχιση ένα-προς-ένα των λειτουργικών στοιχείων του διάγραμματος λειτουργιών με τα δομικά μέρη και καθορίζει αποσυζευγμένες διεπαφές μεταξύ των δομικών μερών. Μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει μία σύνθετη (όχι ένα-προς-ένα) αντιστοίχιση των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη και/ή συζευγμένες διεπαφές μεταξύ των δομικών μερών.

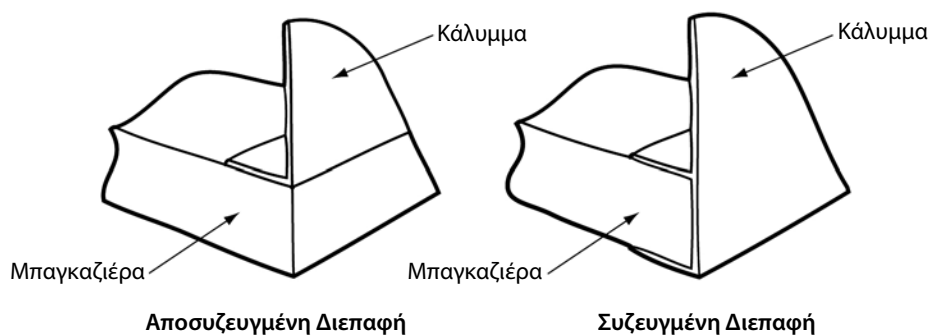
Τύποι αντιστοιχίσεων των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη

Τα δύο ρυμουλκούμενα στα Εκθέματα 6-2 και 6-3 απεικονίζουν δύο ακραία παραδείγματα αντιστοιχίσεων των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη. Το πρώτο ρυμουλκούμενο εμπεριέχει μία αντιστοιχίση ένα-προς-ένα μεταξύ λειτουργικών στοιχείων και δομικών μερών. Υποθέτοντας ότι οι διεπαφές των δομικών μερών είναι αποσυζευγμένες (περισσότερα για αυτό αργότερα), αυτό το ρυμουλκούμενο έχει μία αρθρωτή αρχιτεκτονική. Στον τομέα της μηχανικής λογισμικού η έννοια της τμηματικής συνοχής ή δύναμης [module cohesion or strenght] είναι παρόμοια με την αντιστοιχίση ένα-προς-ένα των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη (Schach 1990). Το άλλο ρυμουλκούμενο εμπεριέχει μία αντιστοιχίση, στην οποία διάφορα λειτουργικά στοιχεία υλοποιούνται το καθένα από περισσότερα από ένα δομικά μέρη και διάφορα δομικά μέρη υλοποιούν περισσότερα από ένα λειτουργικά στοιχεία (μία σύνθετη αντιστοιχίση). Αυτό το ρυμουλκούμενο έχει μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική. Το φαινόμενο, όπου ένα μόνο δομικό μέρος υλοποιεί πολλά λειτουργικά στοιχεία, καλείται στη βιβλιογραφία της επιστημονικής κοινότητας της θεωρίας του σχεδιασμού *function sharing* [μπορεί να αποδοθεί ως *σύμπτυξη λειτουργιών*] και περιγράφεται λεπτομερώς από τους Ulrich και Seering (1990). Σε κάποιον βαθμό το αν τα λειτουργικά στοιχεία αντιστοιχίζονται σε περισσότερα από ένα δομικά μέρη ή όχι εξαρτάται από το επίπεδο λεπτομέρειας, στο οποίο εξετάζονται τα δομικά μέρη και λειτουργικά στοιχεία. Για παράδειγμα, αν κάθε ροδέλα, βίδα και κομμάτι σύρμα θεωρούνται δομικά μέρη, τότε κάθε λειτουργικό στοιχείο θα αντιστοιχίζεται σε πολλά δομικά μέρη. Για να ορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τι σημαίνει αντιστοιχίση ένα-προς-ένα μεταξύ λειτουργικών στοιχείων και δομικών μερών, δείτε ένα αντικείμενο που έχει αποσυναρμολογηθεί σε ένα επίπεδο εξαρτημάτων, το καθένα από τα οποία έχει ένα μοναδικό κομμάτι. (Αυτό το επίπεδο της αποσυναρμολόγησης μερικές φορές καλείται στη βιβλιογραφία *iota level* [πολύ μικρό επίπεδο]). Σε γενικές γραμμές πολλά πιθανά υποσυστήματα³ μπορούν να δημιουργηθούν από αυτά τα πολύ μικρά εξαρτήματα. Αν υπάρχει ένας διαχωρισμός ενός συνόλου τέτοιων πολύ μικρών εξαρτημάτων σε υποσυστήματα, έτσι ώστε να υπάρχει μία αντιστοιχίση ένα-προς-ένα μεταξύ αυτών των υποσυστημάτων και λειτουργικών στοιχείων, τότε το αντικείμενο εμφανίζει την αντιστοιχίση ένα-προς-ένα, που είναι χαρακτηριστική μίας αρθρωτής αρχιτεκτονικής.

Ζεύξη διεπαφών

Επιπλέον των αντιστοιχίσεων ένα-προς-ένα, οι αρθρωτές αρχιτεκτονικές περιλαμβάνουν *αποσυζευγμένες* διεπαφές δομικών μερών. Δύο δομικά μέρη

είναι συζευγμένα, αν μία αλλαγή που γίνεται σε ένα δομικό μέρος απαιτεί μία αλλαγή στο άλλο δομικό μέρος, ώστε να λειτουργήσει σωστά το συνολικό αντικείμενο. Δύο φυσικά δομικά μέρη που συνδέονται με μία διεπαφή είναι σχεδόν πάντα συζευγμένα σε κάποιον βαθμό· υπάρχει σχεδόν πάντα μία αλλαγή που μπορεί να γίνει σε ένα δομικό μέρος, η οποία θα απαιτήσει μία αλλαγή στο άλλο δομικό μέρος. (Για παράδειγμα, αυθαίρετη αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός δομικού μέρους κατά 1.000°C θα απαιτήσει μία αλλαγή σε σχεδόν οποιοδήποτε γειτονικό δομικό μέρος που μπορεί κανείς να φανταστεί). Ωστόσο, σε πρακτικό επίπεδο, η σύζευξη έχει νόημα μόνο σε αλλαγές που τροποποιούν το δομικό μέρος με κάποιο χρήσιμο τρόπο. (Βλέπε Schach 1990 για μία λεπτομερή συζήτηση των διαφόρων τύπων σύζευξης που συναντώνται στο λογισμικό). Το Έκθεμα 6-4 απεικονίζει ένα παράδειγμα μίας διεπαφής μεταξύ των δύο δομικών μερών, της μπαγκαζιέρας και του καλύμματος του ρυμουλκούμενου στο Έκθεμα 6-2. Η συζευγμένη διεπαφή περιλαμβάνει μία εξάρτηση μεταξύ του πάχους της μπαγκαζιέρας και του κάθετου κενού στη σύνδεση του καλύμματος με τη μπαγκαζιέρα. Η αποσυζευγμένη διεπαφή δεν περιλαμβάνει καμία τέτοια εξάρτηση. Για τη συζευγμένη διεπαφή, όταν το πάχος της μπαγκαζιέρας πρέπει να αλλάξει, για να διευκολύνει μία αλλαγή στο μέγεθος του μέγιστου επιτρεπόμενου βάρους του φορτίου, το κάλυμμα πρέπει να αλλάξει επίσης. Αν και το παράδειγμα στο Έκθεμα 6-4 είναι γεωμετρικό, η σύζευξη μπορεί επίσης να βασίζεται σε άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως τη θερμότητα ή τον μαγνητισμό.



Έκθεμα 6-4. Δύο υποθετικά σχέδια για τη διεπαφή μεταξύ του καλύμματος και της μπαγκαζιέρας ενός ρυμουλκούμενου, μία αποσυζευγμένη, η άλλη συζευγμένη.

Τύποι αρθρωτής αρχιτεκτονικής

Χωρίζω την αρθρωτή αρχιτεκτονική σε τρεις υποκατηγορίες: εγκοπής, διαύλου και τμηματική. Επειδή κάθε μία από τις τρεις υποκατηγορίες είναι αρθρωτή, κάθε μία περιλαμβάνει μία αντιστοίχιση ένα-προς-ένα μεταξύ λειτουργι-

κών στοιχείων και δομικών μερών και οι διεπαφές των δομικών μερών είναι αποσυζευγμένες· οι διαφορές μεταξύ αυτών των υποκατηγοριών βρίσκονται στον τρόπο με τον οποίο είναι οργανωμένες οι αλληλεπιδράσεις των δομικών μερών.

Εγκοπής

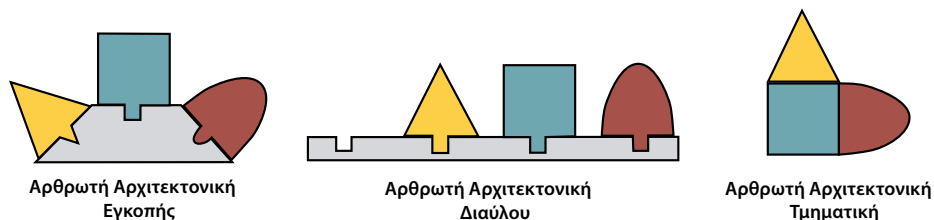
Κάθε μία από τις διεπαφές μεταξύ των δομικών μερών σε μία αρχιτεκτονική εγκοπής είναι διαφορετικού τύπου από τις άλλες, έτσι ώστε τα διάφορα δομικά μέρη του αντικειμένου δεν μπορούν να εναλλαχθούν. Το ραδιόφωνο ενός αυτοκινήτου είναι ένα παράδειγμα ενός δομικού μέρους σε μία αρχιτεκτονική εγκοπής. Το ραδιόφωνο υλοποιεί ακριβώς μία λειτουργία και είναι αποσυζευγμένο από τα γειτονικά δομικά μέρη αλλά η διεπαφή του είναι διαφορετική από οποιαδήποτε διεπαφή των άλλων δομικών μερών του οχήματος (π.χ. τα ραδιόφωνα και τα ταχύμετρα έχουν διαφορετικούς τύπους διεπαφής στο ταμπλό).

Διαύλου

Σε μία αρχιτεκτονική διαύλου υπάρχει ένα κοινός δίαυλος, πάνω στον οποίο τα άλλα φυσικά δομικά μέρη συνδέονται χρησιμοποιώντας τον ίδιο τύπο διεπαφής. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα ενός δομικού μέρους σε μία αρχιτεκτονική διαύλου είναι μία κάρτα επέκτασης ενός προσωπικού υπολογιστή. Τα μη ηλεκτρονικά προϊόντα μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μία αρχιτεκτονική διαύλου. Τα φωτιστικά ράγας, τα συστήματα ραφιών με ράγες και οι ρυθμιζόμενες σκάρες οροφής αυτοκινήτων όλα περιλαμβάνουν μία αρχιτεκτονική διαύλου. Ο δίαυλος δεν είναι απαραίτητα γραμμικός· περιλαμβάνω επίσης δομικά μέρη που συνδέονται με ένα πολυδιάστατο δίκτυο στην υποκατηγορία διαύλου.

Τμηματική

Σε μία τμηματική αρχιτεκτονική όλες οι διεπαφές είναι του ίδιου τύπου και δεν υπάρχει ένα μόνο στοιχείο, στο οποίο προσκολλώνται όλα τα άλλα δομικά μέρη. Το αντικείμενο συναρμολογείται εάν συνδέσουμε τα δομικά μέρη το ένα με το άλλο μέσω όμοιων διεπαφών. Πολλά συστήματα σωληνώσεων ακολουθούν μία τμηματική αρχιτεκτονική, όπως κάνουν τμηματικοί καναπέδες, χωρίσματα γραφείων, καθώς και ορισμένα συστήματα υπολογιστών.



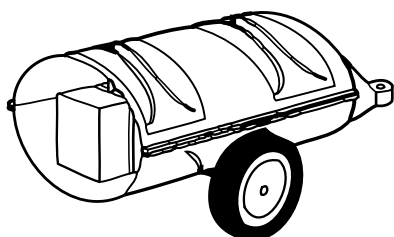
Έκθεμα 6-5. Τρεις τύποι αρθρωτής αρχιτεκτονικής. Πηγή: Προσαρμοσμένο από Ulrich and Eppinger 2011.

Παραδείγματα

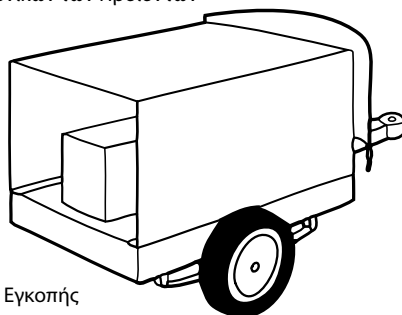
Τα επόμενα μερικά εκθέματα απεικονίζουν αυτήν την κατηγοριοποίηση για το παράδειγμα του ρυμουλκούμενου, για ένα γραφείο και για μία ποικιλία άλλων αντικειμένων. Επιδιώκω η κατηγοριοποίηση να παράσχει ένα λεξιλόγιο για την περιγραφή διαφορετικών αρχιτεκτονικών των αντικειμένων. Οι τύποι που παρουσιάζονται είναι εξιδανικευμένοι· τα περισσότερα πραγματικά προϊόντα εμφανίζουν κάποιον συνδυασμό χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων. Προϊόντα μπορεί, επίσης, να παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων, ανάλογα με το αν κάποιος παρατηρεί το αντικείμενο στο επίπεδο της συνολικής τελικής συναρμολόγησης ή στο επίπεδο των επιμέρους εξαρτημάτων και υποσυστημάτων.

Ο παραγωγός μπορεί να σχεδιάσει και να κατασκευάσει αντικείμενα, χωρίς να σχεδιάσει ποτέ ρητά την αρχιτεκτονική τους ή ακόμα ένα διάγραμμα λειτουργιών. Στις περιοχές του λογισμικού και των ηλεκτρονικών συστημάτων η ιδέα ενός διαγράμματος λειτουργιών (με το όνομα schematic ή διάγραμμα ροής [flowchart] κ.λπ.) είναι αρκετά διαδεδομένη στη βιομηχανική πρακτική. Ωστόσο, η έννοια ενός διαγράμματος λειτουργιών μόνο πρόσφατα έχει διαδοθεί σε πολλές περιοχές της μηχανολογίας. Αν μία αρχιτεκτονική αναπτυχθεί ρητά κατά τη διαδικασία ανάπτυξης, το στάδιο αυτό συνήθως συμβαίνει κατά τη φάση σχεδιασμού σε επίπεδο συστήματος της διαδικασίας σχεδιασμού και αφού οριστούν οι βασικές τεχνολογικές αρχές λειτουργίας αλλά πριν αρχίσει ο σχεδιασμός των δομικών μερών και υποσυστημάτων.

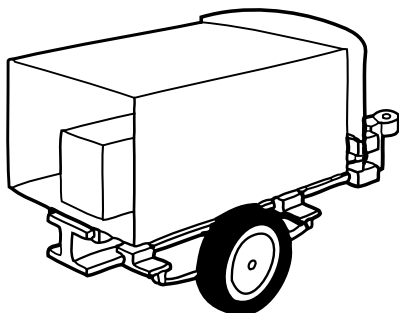
Τυπολογία των Αρχιτεκτονικών των Προϊόντων



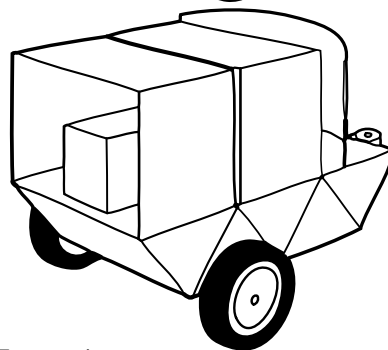
Ολοκληρωμένη



Εγκοπής

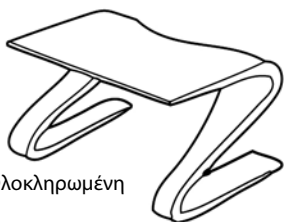


Διαύλου

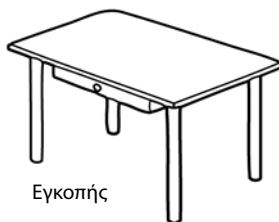


Τμηματική

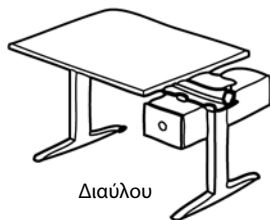
Έκθεμα 6-6. Τέσσερα σχηματοποιημένα ρυμουλκούμενα που εκπροσωπούν τέσσερις διαφορετικές επιλογές αρχιτεκτονικής.



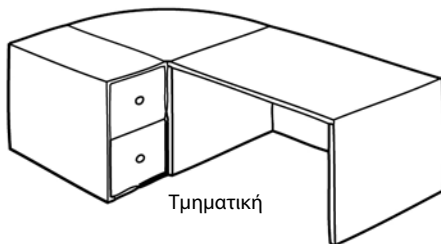
Ολοκληρωμένη



Εγκοπής



Διαύλου



Τμηματική

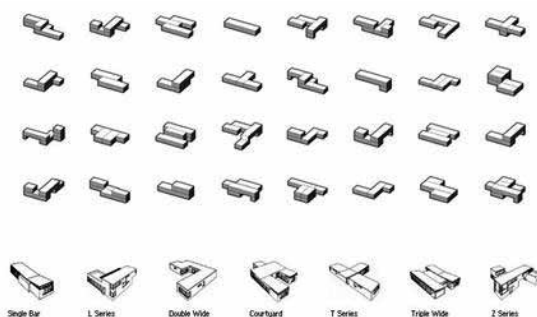
Έκθεμα 6-7. Τέσσερα σχηματοποιημένα γραφεία που εκπροσωπούν τέσσερις διαφορετικές επιλογές αρχιτεκτονικής.



Έκθεμα 6-8. Μία αρθρωτή αρχιτεκτονική διαύλου ενός μαχαιριού. Κάθε εργαλείο από το σύνολο των πιθανών εργαλείων μπορεί να προστεθεί ως μία νέα φέτα στο “σάντουιτς”, μία μορφή αρχιτεκτονικής διαύλου. Πηγή: Wenger.



Έκθεμα 6-9. Η εταιρία Shimano πρωτοστάτησε στην ενοποίηση των χειριστηρίων της αλλαγής ταχυτήτων και της πέδησης με μία θέση για να πιάνονται τα χέρια του αναβάτη. Αυτή είναι μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική, που προκύπτει τόσο από μία σύνθετη αντιστοίχιση των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη όσο και από συζευγμένες διεπαφές. Πηγή: Shimano.



Έκθεμα 6-10. Μερικές από τις εναλλακτικές μορφές κατοικιών που μπορούν να δημιουργηθούν από μία τμηματική αρθρωτή αρχιτεκτονική. Πηγή: Resolution 4Architecture (<http://www.re4a.com>).

Τα παραδείγματα των εκθεμάτων δείχνουν ότι οι σχεδιαστές διαθέτουν σημαντική διακριτική ευχέρεια για την επιλογή μίας αρχιτεκτονικής, αν και η αρχιτεκτονική πολλών υπάρχοντων προϊόντων μπορεί να είναι λιγότερο το αποτέλεσμα προγραμματισμένης επιλογής και περισσότερο μίας σταδιακής, επαυξητικής εξέλιξης. Αρκετοί μελετητές έχουν προτείνει την αρθρωτή αρχιτεκτονική ως ιδανική. Για παράδειγμα, ο Alexander (1964) παρουσιάζει μία “βέλτιστη” μεθοδολογία σχεδιασμού, εξασφαλίζοντας την έλλειψη σύζευξης μεταξύ δομικών μερών.⁴ Υποστηρίζω ότι, ενώ η αρχιτεκτονική των αντικείμενων είναι εξαιρετικά σημαντική, δεν υπάρχει μία μόνο αρχιτεκτονική που να είναι βέλτιστη σε όλες τις περιπτώσεις. Το υπόλοιπο του κεφαλαίου παρουσιάζει τις πιθανές συνδέσεις μεταξύ της αρχιτεκτονικής του αντικειμένου και μίας σειράς από ζητήματα τεχνικής, οικονομικής και διοικητικής σημασίας. Το να αναγνωρίσουμε και να κατανοήσουμε αυτές τις διασυνδέσεις είναι απαραίτητη προϋπόθεση, για να επιλέξουμε αποτελεσματικά την αρχιτεκτονική ενός συγκεκριμένου προϊόντος.

Αλλαγή των Αντικειμένων

Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται σε δύο τύπους αλλαγής των αντικειμένων: την αλλαγή σε ένα συγκεκριμένο αντικείμενο κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (π.χ. αντικατάσταση ενός φθαρμένου ελαστικού) και την αλλαγή σε ένα προϊόν ή μοντέλο κατά τη διάρκεια διαδοχικών γενεών (π.χ. αντικατάσταση του συστήματος ανάρτησης με το σύστημα ανάρτησης επόμενης γενιάς σε ολόκληρο το εύρος των παρεχόμενων προϊόντων). Οι δύο επόμενες ενότητες διαπραγματεύονται δύο στενά συνδεδεμένες έννοιες: την ποικιλία και την τυποποίηση.

Η αρχιτεκτονική καθορίζει πώς το αντικείμενο μπορεί να αλλάξει

Η ελάχιστη αλλαγή που μπορεί να γίνει σε ένα αντικείμενο είναι μία αλλαγή σε ένα δομικό μέρος. Η αρχιτεκτονική του αντικειμένου καθορίζει ποια λειτουργικά στοιχεία του αντικειμένου θα επηρεαστούν από μία αλλαγή σε ένα συγκεκριμένο δομικό μέρος και ποια δομικά μέρη θα πρέπει να αλλάξουν για να επιτευχθεί μία επιθυμητή αλλαγή σε ένα λειτουργικό στοιχείο. Στο ένα άκρο οι αρθρωτές αρχιτεκτονικές επιτρέπουν σε κάθε λειτουργικό στοιχείο του αντικειμένου να αλλάξει ανεξάρτητα, αλλάζοντας μόνο το αντίστοιχο δομικό μέρος. Στο άλλο άκρο οι πλήρως ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές απαιτούν αλλαγές σε κάθε δομικό μέρος, για να επιφέρουν αλλαγή σε οποιοδήποτε ατομικό λειτουργικό στοιχείο. Η αρχιτεκτονική ενός αντικείμενου ως εκ τούτου συνδέεται στενά με την ευκολία, με την οποία μπορεί να υλοποιηθεί μία αλλαγή σε ένα αντικείμενο. Εδώ εξετάζω πώς η ίδια αυτή η σχέση εκφράζεται

κατά την εφαρμογή της αλλαγής κατά τη διάρκεια ζωής ενός συγκεκριμένου αντικειμένου και κατά την εφαρμογή αλλαγών για πολλές γενιές.

Αλλαγή κατά τη διάρκεια ζωής ενός συγκεκριμένου αντικειμένου

Τα αντικείμενα υφίστανται συχνά κάποια αλλαγή κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Ορισμένα από τα κίνητρα για αυτήν την αλλαγή είναι:

- **Αναβάθμιση.** Καθώς οι τεχνολογικές δυνατότητες ή οι ανάγκες των χρηστών εξελίσσονται, μερικά αντικείμενα μπορεί να ανταποκριθούν σε αυτήν την εξέλιξη μέσω αναβαθμίσεων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την αλλαγή της πλακέτας του επεξεργαστή ενός εκτυπωτή και την αντικατάσταση της αντλίας ενός συστήματος ψύξης με ένα πιο ισχυρό μοντέλο.
- **Πρόσθετα.** Πολλά αντικείμενα πωλούνται από έναν κατασκευαστή ως μία βασική μονάδα, στην οποία ο χρήστης προσθέτει δομικά μέρη, συχνά παραγόμενα από τρίτους, όταν χρειάζεται. Αυτός ο τύπος αλλαγής είναι συνήθης στον κλάδο των προσωπικών υπολογιστών (π.χ. η προσθήκη συσκευών μαζικής αποθήκευσης που προέρχονται από άλλον κατασκευαστή σε έναν βασικό υπολογιστή). Δείτε το Langlois and Robertson (1992) για μία λεπτομερή περιγραφή αρκετών τέτοιων περιπτώσεων.
- **Προσαρμογή.** Μερικά αντικείμενα με μεγάλο χρόνο ζωής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα άλλα περιβάλλοντα χρήσης υποβαλλόμενα σε προσαρμογή. Για παράδειγμα, εργαλειομηχανές μπορεί να χρειαστεί να μετατραπούν από ισχύ των 220V σε ισχύ των 440V. Κινητήρες μπορεί να χρειαστεί να μετατραπούν από τροφοδοσία καυσίμου με βενζίνη σε τροφοδοσία καυσίμου με προπάνιο.
- **Φθορά.** Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου μπορεί να φθαρούν με τη χρήση, καθιστώντας αναγκαία την αντικατάσταση των φθαρμένων εξαρτημάτων, ώστε να επεκταθεί ο χρόνος της ωφέλιμης ζωής τους. Για παράδειγμα, κάποιος μπορεί να αντικαταστήσει τα ελαστικά των οχημάτων, τα περισσότερα ρουλεμάν, τους κινητήρες πολλών οικιακών συσκευών και τις μη κοφτερές λεπίδες στα μη αναλώσιμα (όχι μίας χρήσης) ξυραφάκια.
- **Ανάλωση.** Μερικά αντικείμενα αναλώνουν υλικά που μπορούν να αντικατασταθούν. Για παράδειγμα, τα φωτοτυπικά μηχανήματα και οι εκτυπωτές συχνά περιέχουν κασέτες με μελάνι, τα πιστόλια κόλλησης χρησιμοποιούν ράβδους κόλλας, οι δάδες περιέχουν φιαλίδια αερίου και τα ρολόγια τροφοδοτούνται από μπαταρίες.
- **Ευελιξία στη χρήση.** Ορισμένα αντικείμενα μπορεί να διαμορφωθούν από τον χρήστη, για να προσφέρουν διαφορετικές δυνατότητες. Για παράδειγμα, πολλές φωτογραφικές μηχανές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικές επιλογές φακών και φλας, μερικές βάρκες μπορούν να χρησιμοποιη-

ηθούν με διάφορες επιλογές σκεπασμάτων και κάποια καλάμια ψαρέματος δέχονται διάφορες διατάξεις καλαμιού και μηχανισμού ψαρέματος.

Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις οι αλλαγές στο αντικείμενο είναι πιο εύκολο να υλοποιηθούν με τη χρήση αρθρωτών αρχιτεκτονικών. Η αρθρωτή αρχιτεκτονική επιτρέπει οι απαιτούμενες αλλαγές που συνήθως σχετίζονται με τη λειτουργία του αντικειμένου να περιοριστούν στον ελάχιστο δυνατό αριθμό δομικών μερών.

Αν και η ανάλωση και η φθορά συχνά αντιμετωπίζονται με τη χρήση ενός αρθρωτού σχεδίου με αντικαταστάσιμα/ανταλλάξιμα κομμάτια, μία άλλη δημοφιλής στρατηγική είναι να μειώσουμε δραματικά το κόστος του συνολικού αντικειμένου, συχνά μέσω μίας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής, έτσι ώστε το συνολικό αντικείμενο να μπορεί να απορριφθεί ή να ανακυκλωθεί. Για παράδειγμα, ξυραφάκια, φωτογραφικές μηχανές και αναπτήρες μίας χρήσης έχουν όλα γίνει εμπορικά επιτυχημένα προϊόντα και τα στυλό μίας χρήσης κυριαρχούν στην αγορά. Αργότερα, θα εξηγήσω πώς οι ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές μπορούν να επιτρέψουν να σχεδιαστούν αντικείμενα με χαμηλότερο κόστος υπό ορισμένες προϋποθέσεις.

Αλλαγή των αντικειμένων από γενιά σε γενιά

Όταν εισάγεται ένα νέο μοντέλο του υφιστάμενου αντικειμένου, το αντικείμενο εμπεριέχει σχεδόν πάντα κάποια λειτουργική αλλαγή σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση. (Σε σχετικά σπάνιες περιπτώσεις ένας παραγωγός αλλάζει μόνο το όνομα του αντικειμένου). Η αρχιτεκτονική του αντικειμένου έχει ευρείες επιπτώσεις στην ικανότητα του παραγωγού να υλοποιήσει αυτήν την αλλαγή του προϊόντος. Για αντικείμενα με αρθρωτή αρχιτεκτονική οι επιθυμητές αλλαγές σε ένα λειτουργικό στοιχείο μπορεί να περιοριστούν σε ένα δομικό μέρος. Αντικείμενα με ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές απαιτούν αλλαγές σε αρκετά δομικά μέρη, προκειμένου να μπορούν να υλοποιήσουν αλλαγές στη λειτουργία του αντικειμένου. Η παρατήρηση μας βοηθά να εξηγήσουμε τη βιομηχανική πρακτική στον τομέα της αλλαγής από γενιά σε γενιά.

Για παράδειγμα, η αρχική αρχιτεκτονική του Sony Walkman επέτρεπε στον μηχανισμό μεταφοράς της ταινίας της κασέτας να επαναχρησιμοποιείται σε πολλά διαδοχικά μοντέλα, ενώ τα τμήματα του περιβλήματος μπορούσαν να αλλάξουν εύκολα για κάθε νέο μοντέλο (Sanderson and Uzumeri 1995). *Εικονικός* σχεδιασμός είναι ένας όρος που οι Sanderson και Uzumeri χρησιμοποίησαν για τη διαδοχή αυτή πολλών κύκλων προϊόντων που περιλαμβάνουν αλλαγές σε λίγα μόνο δομικά μέρη κατά το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου ζωής μίας τεχνολογικής πλατφόρμας.

Αυτός ο εικονικός σχεδιασμός καθίσταται δυνατός από την αρθρωτή αρχιτεκτονική αντικειμένου που παρουσίαζε το Walkman στο επίπεδο των μεγάλων υποσυστημάτων. Σε ορισμένες περιστάσεις μία επιχείρηση εισάγει ένα προϊόν, μετρά την αντίδραση της αγοράς και μετά αναπτύσσει και λανσάρει πολύ γρήγορα ένα επαυξητικά βελτιωμένο/διορθωμένο προϊόν. Μία αρθρωτή αρχιτεκτονική είναι απαραίτητη, για να είναι σε θέση η εταιρία να αλλάξει γρήγορα το αντικείμενο με αυτόν τον τρόπο. Τα οφέλη μίας αρθρωτής αρχιτεκτονικής στη δυνατότητα των εταιριών να διερευνούν μία αγορά και να προσαρμόζουν και τελειοποιούν ένα αντικείμενο περιγράφονται επίσης στο Langlois and Robertson (1992). Οι Nobeoka και Cusumano (1997), συνοψίζοντας αρκετές προηγούμενες μελέτες της παγκόσμιας αυτοκινητοβιομηχανίας, προσδιορίζουν το εύρος έργου [project score] -το ποσοστό των μοναδικών δομικών μερών που ένας κατασκευαστής σχεδιάζει από το μηδέν- ως μία βασική μεταβλητή που σχετίζεται με τις επιδόσεις ανάπτυξης προϊόντων μίας εταιρίας. Η αρχιτεκτονική του προϊόντος και ιδίως ο βαθμός της αρθρωτότητας [modularity] καθορίζουν πόσο μεγάλο εύρος έργου θα χρειαστεί, για να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο λειτουργικής αλλαγής. Η αλλαγή σε ένα αντικείμενο δεν περιορίζεται σε δραστηριότητες από ένα μόνο κατασκευαστή. Σε ορισμένες αγορές, όπως η οικιακή ψυχαγωγία, οι χρήστες δημιουργούν εικονικά προϊόντα συναρμολογώντας συλλογές προϊόντων που παρέχονται από διάφορους κατασκευαστές. Η αρθρωτότητα στο επίπεδο του συνολικού συστήματος, όταν συνδυάζεται με πρότυπες διεπαφές, επιτρέπει στα εικονικά αντικείμενα να εξελίσσονται και να αλλάζουν μέσα από ανεξάρτητες δράσεις μεμονωμένων κατασκευαστών (Langlois και Robertson 1992· Fine 1998).

Η Ποικιλία των Αντικειμένων

Για τους σκοπούς του παρόντος κεφαλαίου ορίζω *ποικιλία* ως το σύνολο των αντικειμένων που ένα σύστημα παραγωγής προσφέρει στην κοινωνία. (Το Κεφάλαιο 8 είναι μία διεξοδική μελέτη του θέματος της ποικιλίας). Υψηλή ποικιλία μπορεί να παραχθεί από οποιοδήποτε σύστημα με κάποιο κόστος. Για παράδειγμα, ένας κατασκευαστής αυτοκινήτων θα μπορούσε να δημιουργήσει διαφορετικά σχήματα φτερών για κάθε μεμονωμένο όχημα, δημιουργώντας διαφορετικά καλούπια αποτύπωσης, καθένα από τα οποία θα χρησιμοποιούταν μόνο μία φορά. Ένα τέτοιο σύστημα είναι τεχνικά εφικτό αλλά απαγορευτικά ακριβό. Η δυσκολία είναι να δημιουργηθεί η επιθυμητή ποικιλία οικονομικά.

Η ικανότητα ενός συστήματος να παράγει ποικιλία οικονομικά πιστώνεται συχνά στην ευελιξία της παραγωγής. Όταν εξετάζεται στο επίπεδο του συνολικού συστήματος παραγωγής, αυτό είναι μία ταυτολογία -εάν ένα σύστημα παράγει ποικιλία οικονομικά, είναι σε κάποιο βαθμό ευέλικτο. Ωστόσο,

η ευελιξία συχνά ταυτίζεται με την ευελιξία των επιμέρους κατεργασιών του συστήματος παραγωγής (π.χ. καθοδηγούμενες από υπολογιστή φρέζες) ή με ευέλικτα συστήματα συναρμολόγησης (π.χ. προγραμματιζόμενος εξοπλισμός εισαγωγής ηλεκτρονικών τσιπ). Σε αυτό το πλαίσιο μία ευέλικτη διαδικασία παραγωγής επισύρει χαμηλό πάγιο κόστος για κάθε παραγόμενη παραλλαγή (π.χ. χαμηλό κόστος εργαλείων παραγωγής) και χαμηλό κόστος μετάβασης μεταξύ παραγόμενων παραλλαγών (π.χ. χαμηλούς χρόνους τοποθέτησης). Αυτή η έννοια της ευελιξίας είναι συνεπής με τον ορισμό του Upton (1994, 73): “η ικανότητα κάποιου να αλλάξει ή να προσαρμοστεί με λίγη προσπάθεια, χρόνο ή τίμημα.” Υποστηρίζω ότι ένα μεγάλο μέρος της ικανότητας ενός συστήματος παραγωγής να δημιουργήσει ποικιλία δεν έγκειται στην ευελιξία των κατεργασιών του συστήματος αλλά στην αρχιτεκτονική του αντικειμένου που το σύστημα παράγει. Η ενότητα αυτή δείχνει πώς τόσο η ευελιξία της διαδικασίας παραγωγής όσο και η αρχιτεκτονική του αντικειμένου αλληλεπιδρούν, για να συμβάλουν στη δυνατότητα της διαδικασίας παραγωγής να δημιουργεί ποικιλία οικονομικά.

Η ποικιλία είναι σημαντική για τους χρήστες, μόνο εάν η λειτουργία του αντικειμένου αλλάζει με κάποιο τρόπο.⁵ Αυτή η αλλαγή μπορεί να είναι συνάρτηση του συνόλου των λειτουργικών στοιχείων που υλοποιείται από το αντικείμενο (Προστατεύει καθόλου το ρυμουλκούμενο το μεταφερόμενο φορτίο από το περιβάλλον;) ή συνάρτηση ειδικών χαρακτηριστικών απόδοσης του αντικειμένου σχετικών με ένα συγκεκριμένο λειτουργικό στοιχείο (Είναι η προστασία από το περιβάλλον κανονική ή υψηλών προδιαγραφών;). Δείτε το παράδειγμα του ρυμουλκούμενου και μία επιχείρηση που παράγει ρυμουλκούμενα για τους πελάτες της. Ας υποθέσουμε ότι οι ανάγκες των πελατών μπορεί να χωριστούν προσεκτικά με τους ακόλουθους τρόπους. Ορισμένοι πελάτες θέλουν να ελαχιστοποιήσουν την αντίσταση του αέρα, κάποιοι όχι. Επιθυμούμε δύο τύπους σύνδεσης με το όχημα και τρεις εναλλακτικές λύσεις για τον τύπο προστασίας από το περιβάλλον. Επίσης, επιθυμούμε τρεις εναλλακτικές λύσεις τόσο για το μέγεθος του μέγιστου επιτρεπόμενου δομικού βάρους όσο και για την ποιότητα της μετακίνησης που παρέχει το σύστημα ανάρτησης.⁶ Βάσει των παραδοχών αυτών, αν η ποικιλία δεν επέσυρε κόστος, η εταιρία θα πρόσφερε στην αγορά 108 διακριτά ρυμουλκούμενα ($2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 = 108$). Εάν η εταιρία χρησιμοποιήσει την αρθρωτή αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στο Έκθεμα 6-2, όλα τα 108 διαφορετικά ρυμουλκούμενα μπορούν να δημιουργηθούν από 12 συνολικά διαφορετικούς τύπους δομικών μερών: έναν μόνο τύπο αεροτομής (ο οποίος μπορεί να συμπεριλαμβάνεται με το ρυμουλκούμενο ή όχι), δύο τύπους υποδοχής του κοτσαδόρου, τρεις τύπους καλύμματος, τρεις τύπους μπαγκαζιέρας, τρεις τύπους συστήματος ελατηρίων και έναν τύπο συστήματος τροχών. Επειδή κάθε λειτουργικό στοι-

χείο αντιστοιχίζεται σε ένα μόνο φυσικό δομικό μέρος και επειδή οι διεπαφές είναι αποσυζευγμένες, η ποικιλία μπορεί να δημιουργηθεί σχηματίζοντας 108 συνδυασμούς από ένα σύνολο 12 δομικών μερών θεωρούμενων ως δομικά στοιχεία. Δεν ήμουν ο πρώτος που παρατήρησε ότι η ποικιλία μπορεί να δημιουργηθεί από συνδυασμούς δομικών στοιχείων. Στην πραγματικότητα αυτή η συνδυαστική προσέγγιση της ποικιλίας είναι μέρος μίας τεχνικής πέντε βημάτων που ονομάζεται (προκαλώντας κάποια σύγχυση) Variety Reduction Program [Πρόγραμμα Μείωσης της Ποικιλίας] (Suzue and Kohdate 1990). Οι Nevins και Whitney (1989), επίσης, έχουν δώσει αρκετά παραδείγματα τέτοιων συνδυαστικών συναρμολογήσεων παραλλαγών αντικειμένων και ο Pine (1992) κατέστησε δημοφιλή την έννοια της *μαζικής εξατομίκευσης*. Η αρθρωτότητα [modularity] ενός αντικειμένου επιτρέπει η ποικιλία να δημιουργηθεί κατά την τελική συναρμολόγηση, το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας παραγωγής. Ορισμένες επιχειρήσεις μάλιστα καθυστερούν ένα τμήμα της τελικής συναρμολόγησης, μέχρι το αντικείμενο να μεταφερθεί μέσω του συστήματος διανομής και να είναι έτοιμο να αποσταλεί σε έναν πελάτη. Αυτή η στρατηγική έχει κληθεί *postponement* [αναβολή] (Lee and Tang 1997). Αν η εταιρία επιθυμεί να προσφέρει όλες τις 108 παραλλαγές και χρησιμοποιεί την ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αντικειμένων που παρουσιάζεται στο Έκθεμα 6-3, θα απαιτηθούν 73 διαφορετικοί τύποι δομικών μερών: 27 τύποι άνω μισού, 27 τύποι κάτω μισού, 12 τύποι κομματιού στήριξης, τρεις τύποι ιμάντα πρόσδεσης του φορτίου, τρεις τύποι καλυμμάτων των υποδοχών των ελατηρίων και ένας τύπος συστήματος τροχών. Επειδή σε πολλές περιπτώσεις κάθε δομικό μέρος υλοποιεί διάφορα λειτουργικά στοιχεία, πρέπει να υπάρχουν τόσοι πολλοί τύποι κάθε δομικού μέρους όσοι είναι οι επιθυμητοί συνδυασμοί των λειτουργικών στοιχείων που υλοποιεί. Για παράδειγμα, για να παράσχουμε όλους τους διαφορετικούς επιθυμητούς συνδυασμούς δύο τύπων σύνδεσης με το όχημα, δύο τύπων μείωσης της αντίστασης του αέρα και τριών μεγεθών του μέγιστου επιτρεπόμενου βάρους του φορτίου, απαιτούνται 12 διαφορετικοί τύποι κομματιών στήριξης, επειδή το κομμάτι στήριξης συμβάλλει και στα τρία λειτουργικά στοιχεία που σχετίζονται με τις επιλογές αυτές.

Ποικιλία και ευελιξία

Με την πρώτη ματιά, το να παράγουμε 108 ποικιλίες ολοκληρωμένου σχεδιασμού φαίνεται να είναι πολύ λιγότερο οικονομικό από τον αρθρωτό σχεδιασμό. Στην πραγματικότητα, η ευελιξία της διαδικασίας παραγωγής είναι ένας πρόσθετος παράγοντας για τον προσδιορισμό των βασικών οικονομικών της παραγωγής ποικιλίας. Αν τα δομικά μέρη του ρυμουλκούμενου μπορούν να παραχθούν οικονομικά μόνο σε πολύ μεγάλα μεγέθη παρτίδων εξαιτίας των μεγάλων χρόνων τοποθέτησης που απαιτούνται από τα μηχανήματα κατερ-

γασιών ή αν κάθε τύπος δομικού μέρους απαιτεί μεγάλες επενδύσεις σε εργαλεία παραγωγής, τότε στην πραγματικότητα ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός θα είναι πολύ ακριβός για την παραγωγή υψηλής ποικιλίας. Η υψηλή ποικιλία υπό αυτές τις συνθήκες θα απαιτήσει κάποιον συνδυασμό υψηλού κόστους αποθεμάτων, υψηλού κόστους τοποθέτησης ή υψηλού κόστους εργαλείων παραγωγής.⁷ Ωστόσο, αν τα δομικά μέρη του ρυμουλκούμενου μπορούν να παραχθούν οικονομικά σε μικρές παρτίδες (π.χ. το κόστος τοποθέτησης είναι χαμηλό) και χωρίς επενδύσεις σε εργαλεία παραγωγής, τότε μπορεί να προφερθεί ποικιλία ολοκληρωμένου σχεδιασμού.

Για παράδειγμα, δείτε το ακόλουθο σύστημα παραγωγής για το ολοκληρωμένο ρυμουλκούμενο. Τα άνω και κάτω μισά κατασκευάζονται από μία καθοδηγούμενη από υπολογιστή μηχανή εξέλασης και από μία καθοδηγούμενη από υπολογιστή μηχανή κοπής με laser. Φύλλα αυθαίρετου πάχους και υλικού μπορεί να κυλινδροποιηθούν σε αυθαίρετες διαμέτρους (εντός ορισμένων ορίων) και υποδοχές για τα ελατήρια μπορεί να κοπούν κατά μήκος αυθαίρετων τροχιών -όλα με μικρούς χρόνους τοποθέτησης, χωρίς επένδυση σε εργαλεία παραγωγής και με ταχείς χρόνους επεξεργασίας. Το κομμάτι στήριξης κατασκευάζεται με κοπή με laser, καθοδηγούμενη από υπολογιστή κυλινδροποίηση και αυτοματοποιημένη συγκόλληση. Τα έξι δομικά μέρη στη συνέχεια συναρμολογούνται με το χέρι. Λόγω της ευελιξίας των διαδικασιών παραγωγής του άνω μισού, του κάτω μισού και του κομματιού στήριξης, οι απαιτούμενοι τύποι δομικών μερών μπορεί να παραχθούν, όταν είναι απαραίτητοι, και σε αυθαίρετους συνδυασμούς και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν στους απαιτούμενους τύπους ρυμουλκούμενου. Αυτή η ευελιξία διαδικασίας επιτρέπει την οικονομική παραγωγή υψηλής ποικιλίας ενός αντικειμένου με μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική.

Τα ευέλικτα μηχανήματα μίας διαδικασίας παραγωγής μπορούν, επίσης, να έχουν αντίκτυπο και στην παραγωγή αρθρωτού σχεδιασμού. Χρησιμοποιώντας μη ευέλικτες διαδικασίες που απαιτούν δαπανηρά εργαλεία παραγωγής και πολύ μεγάλα μεγέθη παρτίδων, τα 12 διαφορετικά δομικά μέρη που απαιτούνται για τη συναρμολόγηση των 108 διαφορετικών παραλλαγών του προϊόντος θα φυλάσσονταν ως απόθεμα έτοιμο για τελική συναρμολόγηση. Εναλλακτικά, τα δομικά μέρη για τον αρθρωτό σχεδιασμό θα μπορούσαν να παραχθούν με ευέλικτο εξοπλισμό παραγωγής, εξαλείφοντας την ανάγκη για αποθέματα και δαπάνες σε εργαλεία παραγωγής. Με μία αρθρωτή αρχιτεκτονική η ποικιλία μπορεί να επιτευχθεί με ή χωρίς ευέλικτο εξοπλισμό παραγωγής των δομικών μερών. Συγκριτικά μιλώντας, για να παράξουμε υψηλή ποικιλία με ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική οικονομικά, η διαδικασία παραγωγής των δομικών μερών πρέπει να είναι ευέλικτη. Το επιχείρημα αυτό θεωρεί σε όλες τις περιπτώσεις ότι και η τελική διαδικασία συναρμολόγησης, η ίδια,

είναι κάπως ευέλικτη, πράγμα που σημαίνει ότι διαφορετικοί συνδυασμοί δομικών μερών μπορούν να συναρμολογηθούν εύκολα, για να δημιουργήσουμε την ποικιλία του τελικού προϊόντος. Αυτή η παραδοχή συνήθως ισχύει για τα προϊόντα που συναρμολογούνται με το χέρι αλλά ορισμένα συστήματα συναρμολόγησης, ιδιαίτερα ο υψηλού όγκου αυτοματοποιημένος εξοπλισμός συναρμολόγησης, δεν πληρούν αυτήν την παραδοχή. Για τα συστήματα αυτά η ευελιξία της τελικής διαδικασίας συναρμολόγησης είναι, επίσης, μία βασική κινητήρια δύναμη για την ικανότητα της επιχείρησης να προσφέρει ποικιλία προϊόντων.

Άπειρη ποικιλία

Πολλές ευέλικτες διαδικασίες παραγωγής μπορούν να προγραμματιστούν για να παράγουν μία άπειρη ποικιλία δομικών μερών. Για παράδειγμα, ένα καθοδηγούμενο από υπολογιστή σύστημα κοπής με laser μπορεί να κόψει κατά μήκος μίας αυθαίρετα καθορισμένης τροχιάς. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στα συστήματα που περιλαμβάνουν αυτές τις κατεργασίες να δημιουργούν αντικείμενα που μπορεί να είναι απείρως ποικίλα αναφορικά με μία ή περισσότερες ιδιότητες. Αυτή η ικανότητα να μεταβάλλουμε συνεχώς τις ιδιότητες των δομικών μερών μέσω μίας ευέλικτης διαδικασίας κάνει μία λεπτή διάκριση μεταξύ της ποικιλίας που μπορεί να δημιουργηθεί, συναρμολογώντας αντικείμενα από ένα πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών δομικών μερών, και την ποικιλία που μπορεί να δημιουργηθεί από μία ευέλικτη διαδικασία παραγωγής δομικών μερών. Η συναρμολόγηση από πεπερασμένες επιλογές δομικών μερών είναι ουσιαστικά μία "πεπερασμένη λειτουργία" ["set operation"] υπό την έννοια ότι επιτρέπει να σχηματιστούν ομάδες από διακριτές εναλλακτικές λύσεις. Συνεχώς μεταβαλλόμενα μηχανήματα κατεργασιών μπορούν να εφαρμόσουν τυχαίες μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών των δομικών μερών. Για παράδειγμα, η μηχανή κοπής με laser θα μπορούσε να προγραμματιστεί να κόψει κατά μήκος μίας καμπύλης παραμετροποιημένης ως συνάρτησης ενός συνόλου άλλων χαρακτηριστικών, όπως οι αναμενόμενες κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος χρήσης, οι τύποι των φορτίων που θα μεταφέρει το ρυμουλκούμενο και η ποιότητα των οδοστρωμάτων στη γεωγραφική περιοχή των πελατών. Σημειώστε ότι η ικανότητα να ποικίλλουν αυθαίρετα τα χαρακτηριστικά των δομικών μερών μπορεί να επιτευχθεί τόσο για ολοκληρωμένες όσο και για τις αρθρωτές αρχιτεκτονικές, εάν τα δομικά μέρη κατασκευάζονται με προγραμματιζόμενες κατεργασίες.

Μία σύνοψη της επίδρασης της αρχιτεκτονικής και της ευελιξίας της διαδικασίας των δομικών μερών στα προκύπτοντα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος παραγωγής παρουσιάζεται στο Έκθεμα 6-11.

Αρχιτεκτονική του Αντικειμένου Αρθρωτή Ολοκληρωμένη	Η ποικιλία επιτυγχάνεται με συναρμολόγηση από σχετικά λίγους τύπους δομικών μερών. Επιτρέπει να γίνεται συναρμολόγηση κατά παραγγελία από αποθέματα δομικών μερών. Μπορεί να καθοριστεί ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής.	Επιτρέπει να γίνεται κατασκευή δομικών μερών κατά παραγγελία καθώς και συναρμολόγηση κατά παραγγελία. Μπορούμε να κρατάμε αποθέματα δομικών μερών για να ελαχιστοποιήσουμε τον χρόνο ολοκλήρωσης της παραγωγής. Η άπειρη ποικιλία είναι εφικτή, όταν τα δομικά μέρη κατασκευάζονται κατά παραγγελία.
	Η υψηλή ποικιλία δεν είναι οικονομικά εφικτή· θα απαιτούσε υψηλά πάγια έξοδα (π.χ. εργαλεία παραγωγής), υψηλές δαπάνες τοποθέτησης, μεγάλους χρόνους ολοκλήρωσης και/ή υψηλό κόστος αποθεμάτων.	Ποικιλία μπορεί να επιτευχθεί χωρίς υψηλό κόστος αποθεμάτων με την κατασκευή δομικών μερών κατά παραγγελία. Ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής καθορίζεται τόσο από τον χρόνο κατασκευής των δομικών μερών όσο και από τον τελικό χρόνο συναρμολόγησης. Η άπειρη ποικιλία είναι εφικτή.
	Χαμηλή	Υψηλή
	Ευελιξία Παραγωγής των Δομικών Μερών	

Έκθεμα 6-11. Η σχέση μεταξύ της ευελιξίας της διαδικασίας παραγωγής των δομικών μερών, της αρχιτεκτονικής ενός αντικειμένου και της ικανότητας της διαδικασίας παραγωγής να προσφέρει ποικιλία.

Τυποποίηση των Δομικών Μερών

Τυποποίηση των δομικών μερών είναι η χρήση του ίδιου δομικού μέρους σε πολλαπλές εκδόσεις ενός αντικειμένου και συνδέεται στενά με την ποικιλία. Κοινά τυποποιημένα δομικά μέρη περιλαμβάνουν τα ελαστικά, τις μπαταρίες, τα ρουλεμάν, τους κινητήρες, τις λάμπες, τις αντιστάσεις και τα μέσα στερέωσης. Η τυποποίηση των δομικών μερών συμβαίνει τόσο εντός μίας ενιαίας οντότητας (π.χ. κινητήρες Quad4 στη General Motors) όσο και σε πολλές οντότητες (π.χ. τα ρουλεμάν Timken στις Ford, General Motors, και Daimler). Καλώ την πρώτη περίπτωση *εσωτερική τυποποίηση* και τη δεύτερη περίπτωση *εξωτερική τυποποίηση*. Στην περίπτωση της εσωτερικής τυποποίησης τα δομικά μέρη μπορούν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν εντός της οντότητας ή να παρέχονται από προμηθευτές. Στην περίπτωση της εξωτερικής

τυποποίησης τα δομικά μέρη συνήθως σχεδιάζονται και κατασκευάζονται από προμηθευτές.

Μία αρθρωτή αρχιτεκτονική καθιστά δυνατή την τυποποίηση

Τυποποίηση μπορεί να προκύψει, μόνο όταν (α) ένα δομικό μέρος υλοποιεί κοινά χρήσιμες λειτουργίες και (β) η διεπαφή με το δομικό μέρος είναι ολόκληρη σε περισσότερα από ένα διαφορετικά προϊόντα. Σε αντίθετη περίπτωση, ένα δομικό μέρος είτε δεν θα χρησιμεύει σε περισσότερες από μία εφαρμογές είτε δεν θα ταιριάζει με τη διεπαφή περισσότερων από μίας εφαρμογών. Μία αρθρωτή αρχιτεκτονική αυξάνει την πιθανότητα ότι ένα δομικό μέρος θα είναι κοινά χρήσιμο. Όταν η αντιστοίχιση των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη είναι ένα-προς-ένα, κάθε δομικό μέρος υλοποιεί μία και μόνο μία λειτουργία. Τέτοια δομικά μέρη είναι επομένως χρήσιμα σε οποιεσδήποτε άλλες εφαρμογές παρουσιάζονται οι σχετικές τους λειτουργίες. Τα δομικά μέρη ενός αντικειμένου που εμφανίζει ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική θα μπορούσαν δυνητικά να είναι χρήσιμα μόνο σε άλλα αντικείμενα, τα οποία περιέχουν τον ακριβή συνδυασμό λειτουργικών στοιχείων ή τμημάτων λειτουργικών στοιχείων που υλοποιούνται από το δομικό μέρος. Μία αρθρωτή αρχιτεκτονική, επίσης, επιτρέπει οι διεπαφές των δομικών μερών να είναι πανομοιότυπες σε διάφορα προϊόντα. Οι διεπαφές στην αρθρωτή αρχιτεκτονική είναι αποσυζευγμένες –δηλαδή, ένα συγκεκριμένο δομικό μέρος δεν χρειάζεται να αλλάξει, όταν αλλάζουν τα δομικά μέρη που το περιστοιχίζουν. Ως εκ τούτου, διαφορετικά σύνολα περιστοιχίζοντων δομικών μερών, οποιαδήποτε τυχαίνει να εμφανίζονται σε διαφορετικές εφαρμογές, δεν απαιτούν διαφορετικές διεπαφές. Όταν οι διεπαφές είναι αποσυζευγμένες, μπορεί να υιοθετηθεί ένα πρότυπο διεπαφής και το ίδιο δομικό μέρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία ποικιλία περιστάσεων.

Ποιες είναι οι επιπτώσεις της τυποποίησης;

Η τυποποίηση των δομικών μερών, είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά, έχει επιπτώσεις για τον παραγωγό στους τομείς του κόστους, της απόδοσης και της ανάπτυξης. Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα τυποποιημένο δομικό μέρος είναι λιγότερο ακριβό από ό,τι ένα δομικό μέρος που έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για χρήση σε ένα μόνο αντικείμενο. Αυτό το χαμηλότερο κόστος είναι δυνατό, κυρίως επειδή το τυποποιημένο δομικό μέρος θα παραχθεί σε υψηλότερο όγκο, καθιστώντας εφικτές μεγαλύτερες οικονομίες κλίμακας και περισσότερη μάθηση. Ο υψηλότερος όγκος παραγωγής ενός δομικού μέρους μπορεί επίσης να προσελκύσει πολλούς ανταγωνιστές, οι οποίοι θα ασκούν πίεση στις τιμές ο ένας στον άλλο. Ωστόσο, κάτω από ορισμένες συνθήκες, η χρήση ενός τυποποιημένου δομικού μέρους μπορεί να επισύρει υψηλότε-

ρο κόστος ανά μονάδα από τη χρήση ενός ειδικού δομικού μέρους. Μερικές φορές, σε μία προσπάθεια να τυποποιήσουν, οι επιχειρήσεις θα χρησιμοποιήσουν ένα δομικό μέρος με πλεονάζουσα δυνατότητα για μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Για παράδειγμα, ένα τυποποιημένο περίβλημα μπορεί να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από ό,τι είναι απαραίτητο σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή ή ένα τυποποιημένο τροφοδοτικό μπορεί να παρέχει ελαφρά περισσότερη ισχύ από το απόλυτα αναγκαίο σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι εταιρίες μπορούν να επιλέξουν να υιοθετήσουν τα τυποποιημένα δομικά μέρη, ακόμη και αν το κόστος τους ανά μονάδα είναι υψηλότερο από αυτό ενός δομικού μέρους που θα ταίριαζε περισσότερο στην εφαρμογή. Η τυποποίηση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της οικονομικής εξοικονόμησης που θα προέλθει από τη μείωση της πολυπλοκότητας, για παράδειγμα, στις προμήθειες, τη διαχείριση αποθεμάτων, τον ποιοτικό έλεγχο ή την υποστήριξη πεδίου.

Τα τυποποιημένα δομικά μέρη, σε γενικές γραμμές, παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση (για ένα δεδομένο κόστος) από τα μοναδικά σχέδια. Αυτό το πλεονέκτημα στην απόδοση προκύπτει από τη μάθηση και την εμπειρία που είναι σε θέση να συσσωρεύσει ο προμηθευτής του δομικού μέρους. Ωστόσο, η τυποποίηση μπορεί να λειτουργήσει ως δύναμη αδράνειας που εμποδίζει τις επιχειρήσεις να υιοθετήσουν μία καλύτερη τεχνολογία δομικών μερών λόγω των προβλημάτων συμβατότητας που μπορούν να παρουσιαστούν στην εγκατεστημένη βάση των προϊόντων τους.

Η χρήση τυποποιημένων δομικών μερών μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα, το κόστος και τον χρόνο ολοκλήρωσης του σχεδιασμού και της ανάπτυξης. Ένα υπαρκτό τυποποιημένο δομικό μέρος αντιπροσωπεύει μία γνωστή οντότητα και ως εκ τούτου μπορεί να μειώσει τον αριθμό των αβέβαιων ζητημάτων, τα οποία η ομάδα ανάπτυξης πρέπει να αντιμετωπίσει. Ένα υπαρκτό τυποποιημένο δομικό μέρος, επίσης, δεν απαιτεί καθόλου πόρους ανάπτυξης και έτσι μπορεί να μειώσει και το κόστος και, εάν η ανάπτυξη του δομικού μέρους θα ήταν στην κρίσιμη διαδρομή του έργου, και τον χρόνο ολοκλήρωσης ενός έργου.

Απόδοση του Αντικειμένου

Ορίζω *απόδοση* το πόσο καλά το αντικείμενο υλοποιεί τα λειτουργικά στοιχεία του. Τυπικά χαρακτηριστικά της απόδοσης είναι η ταχύτητα, η αποδοτικότητα, η διάρκεια ζωής και ο θόρυβος. Η απόδοση, όπως ορίζεται εδώ, δεν περιλαμβάνει την οικονομική απόδοση, παρά μόνο στον βαθμό που προκύπτει από μη οικονομικές διαστάσεις της απόδοσης, διότι η οικονομική απόδοση

εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις δραστηριότητες της παραγωγής, της εξυπηρέτησης πελατών, των πωλήσεων και του μάρκετινγκ της εταιρίας.

Όλα τα φυσικά αντικείμενα καταλαμβάνουν χώρο, εμφανίζουν κάποια μορφή και αποτελούνται από υλικά με μάζα και άλλες φυσικές ιδιότητες. Τα χαρακτηριστικά της απόδοσης, που συνδέονται στενά με το μέγεθος και τη μάζα ενός αντικειμένου, συνήθως επιδεινώνονται από αρθρωτές αρχιτεκτονικές. Για να ελαχιστοποιήσουν το μέγεθος, τη μάζα και το μεταβλητό κόστος, οι σχεδιαστές υιοθετούν ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές. Τα μη φυσικά αντικείμενα, όπως το λογισμικό, μπορεί να εμφανίζουν χαρακτηριστικά της απόδοσης κάπως ανάλογα με εκείνα που σχετίζονται με το μέγεθος και τη μάζα -για παράδειγμα, απαιτήσεις μνήμης ή γραμμές κώδικα.

Για τα περισσότερα φυσικά αντικείμενα μερικά χαρακτηριστικά της απόδοσης συνδέονται στενά με το μέγεθος και το σχήμα και/ή τη μάζα. Για παράδειγμα, η επιτάχυνση συνδέεται με τη μάζα, η αεροδυναμική αντίσταση του αέρα σχετίζεται με το μέγεθος και το σχήμα και στο παράδειγμα του ρυμουλκούμενου η απόδοση καυσίμου του οχήματος σχετίζεται με το μέγεθος και το σχήμα καθώς και με τη μάζα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αύξηση της συνολικής απόδοσης απαιτεί μείωση του μεγέθους και της μάζας. (Σε σχετικά σπάνιες περιπτώσεις η αύξηση της απόδοσης απαιτεί *αύξηση* του μεγέθους και της μάζας· η βελτίωση της δύναμης συγκράτησης της άγκυρας μίας βάρκας ή η αύξηση της άνεσης των επιβατών ενός αυτοκινήτου μπορεί να είναι τέτοιες περιπτώσεις).

Τρεις στρατηγικές σχεδιασμού χρησιμοποιούνται συχνά για την ελαχιστοποίηση της μάζας ή του μεγέθους: σύμπτυξη λειτουργιών [function sharing], γεωμετρικό φώλιασμα [geometric nesting] και ενοποίηση των κομματιών [part integration]. Η *σύμπτυξη λειτουργιών* είναι μία στρατηγική σχεδιασμού, στην οποία πλεονάζουσες φυσικές ιδιότητες των δομικών μερών απαλείφονται μέσω της αντιστοίχισης περισσότερων του ενός λειτουργικών στοιχείων σε ένα μόνο δομικό μέρος (Ulrich and Seering 1990). Για παράδειγμα, μία συμβατική μοτοσικλέτα περιέχει ένα χαλύβδινο σωληνοειδή σκελετό, διακριτό από τον κινητήρα και το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Αντίθετα, αρκετές μοτοσικλέτες υψηλών επιδόσεων δεν διαθέτουν διακριτό σκελετό. Αντ' αυτού, το περίβλημα χυτού αλουμινίου του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του κινητήρα λειτουργεί ως δομή για τη μοτοσικλέτα. Για παράδειγμα, δείτε τη μοτοσικλέτα BMW R1100S που παρουσιάζεται στο Έκθεμα 6-12. Οι σχεδιαστές της μοτοσικλέτας υιοθέτησαν τη σύμπτυξη λειτουργιών ως έναν τρόπο, για να αξιοποιήσουν το γεγονός ότι το περίβλημα του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του κινητήρα είχε συμπτωματικά δομικές ιδιότητες, οι οποίες καθιστούσαν πλεονάζουσες τις δομικές ιδιότητες του συμβατικού σκελετού. Μέσω της σύμπτυξης λειτουργιών οι σχεδιαστές ελαχιστοποίησαν

τη μάζα του συστήματος σκελετού/κινητήρα/συστήματος μετάδοσης κίνησης. Αξιοποιώντας τις δευτερεύουσες δομικές ιδιότητες του περιβλήματος του κινητήρα και του συστήματος μετάδοσης κίνησης, οι σχεδιαστές αντιστοίχισαν περισσότερα από ένα λειτουργικά στοιχεία σε ένα μόνο δομικό μέρος και ως εκ τούτου δημιούργησαν μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική.

Γεωμετρική εμφώλευση είναι μία στρατηγική σχεδιασμού για αποτελεσματική χρήση χώρου και υλικού και περιλαμβάνει την εμφώλευση και διάταξη των δομικών μερών, έτσι ώστε να καταλαμβάνουν τον ελάχιστο δυνατό όγκο ή, σε μερικές περιπτώσεις, να καταλαμβάνουν έναν όγκο με ένα συγκεκριμένο επιθυμητό σχήμα. Για παράδειγμα, ο τροχός, η ανάρτηση, το φτερό και το σύστημα πέδησης ενός σύγχρονου αυτοκινήτου είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο που να αφήνει ελεύθερο χώρο για την κίνηση του τροχού· είναι στενά εμφωλευμένα. Μία αρνητική συνέπεια της εμφώλευσης είναι η σύζευξη των διεπαφών μεταξύ των δομικών μερών, το άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα της ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής. Για παράδειγμα, σε ένα αυτοκίνητο η ψύξη του συστήματος πέδησης είναι στενά συζευγμένη με το σχήμα της περιοχής του τροχού, τα τάσια και τα φτερά. Μία μικρή αλλαγή στο σχήμα του τασιού μπορεί να απαιτήσει σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό του δίσκου του φρένου. Ομοίως, ο θόρυβος του δρόμου και του ανέμου από τους τροχούς συνδέεται με έναν σύνθετο τρόπο με το σχήμα της περιοχής του τροχού και του φτερού. Έτσι, η επιθυμία για αύξηση της συνολικής επίδοσης στους τομείς της αντίστασης του αέρα και της αισθητικής οδηγεί σε μία στρατηγική σχεδιασμού γεωμετρικής εμφώλευσης. Αυτή η στρατηγική σχεδιασμού προκαλεί τα δομικά μέρη να συζευγνούνται, θυσιάζοντας την αρθρωτότητα της αρχιτεκτονικής.



Έκθεμα 6-12. Η μοτοσυκλέτα BMW R1100S περιλαμβάνει ένα δομικό μέρος συστήματος μετάδοσης κίνησης, που όχι μόνο μεταδίδει ισχύ από τον κινητήρα στον πίσω τροχό αλλά λειτουργεί και ως ένα βασικό δομικό στοιχείο για τον σκελετό και την ανάρτηση. Πηγή: BMW.

Ένα παρόμοιο επιχείρημα ισχύει και για την *ενοποίηση κομματιών* [*part integration*] που είναι μία συνηθισμένη στρατηγική στον σχεδιασμό για την παραγωγή [*design for manufacturing*] και ένα κοινό κίνητρο για ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές (Ulrich and Eppinger 2011). Η ενοποίηση κομματιών, δηλαδή ο συνδυασμός πολλαπλών κομματιών σε ένα συνεχόμενο κομμάτι, ελαχιστοποιεί τη χρήση του υλικού και του χώρου που αφορούν τις διεπαφές δομικών μερών και μπορεί να βελτιώσει τη γεωμετρική ακρίβεια αλλά ακυρώνει την αντιστοίχιση ένα-προς-ένα των λειτουργικών στοιχείων με τα δομικά μέρη.

Ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές και μεταβλητό κόστος

Η ελαχιστοποίηση του μεγέθους και της μάζας είναι επίσης μέρος μίας στρατηγικής για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ανά μονάδα για προϊόντα υψηλού όγκου, διότι, όσο ο όγκος της παραγωγής αυξάνεται, το κόστος των υλικών γίνεται όλο και πιο σημαντικό. Αυτό εξηγεί γιατί οι ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές μερικές φορές χρησιμοποιούνται για την επίτευξη πολύ χαμηλού κόστους ανά μονάδα, όπως απαιτείται για τα προϊόντα μίας χρήσης, όπως τα στυλό διάρκειας, τα ξυραφάκια και οι φωτογραφικές μηχανές μίας χρήσης.

Τα παραδείγματα αυτής της ενότητας απεικονίζουν ακραίες συνθήκες. Τα περισσότερα αντικείμενα εμπεριέχουν υβριδικές αρθρωτές-ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές. Για παράδειγμα, αν και η μοτοσυκλέτα υψηλών επιδόσεων μπορεί να εμφανίζει χαμηλή αρθρωτότητα ως προς την αρχιτεκτονική του κινητήρα, του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του σκελετού, η αρχιτεκτονική του συστήματος ανάφλεξης μπορεί να είναι αρκετά αρθρωτή (π.χ. μπουζί, καλώδια, πηνίο κ.λπ.). Οι σχεδιαστές της μοτοσυκλέτας απέφυγαν την αρθρωτότητα μόνον εκεί όπου οι αρνητικές επιπτώσεις της στην απόδοση είναι οι πιο σοβαρές.

Σημειώστε ότι αυτό που μπορεί να θεωρηθεί ως δομικό μέρος ενός αντικειμένου είναι το ίδιο το τελικό προϊόν για τον προμηθευτή του εν λόγω δομικού μέρους (είτε ο προμηθευτής είναι εσωτερικός είτε εξωτερικός). Ως αποτέλεσμα, το ίδιο το δομικό μέρος μπορεί να είναι σχεδιασμένο με μία πολύ ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αλλά στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ένα εξαιρετικά αρθρωτό τρόπο ως μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος. Για παράδειγμα, τα ελαστικά παρουσιάζουν μία εξαιρετικά ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα δομικό μέρος σε ένα ρυμουλκούμενο με μία άκρως αρθρωτή αρχιτεκτονική.