

7. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΩΝ ΣΕΙΡΩΝ

Η δυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση εκτεταμένων προγραμμάτων H/Y είτε να μετρηθεί σε κατάλληλη πειραματική δεξαμενή. Αντίθετα όμως προς την περίπτωση της αντίστασης του πλοίου δεν υπάρχουν συστηματικές σειρές, βασισμένες σε πειράματα, για την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς. Μια τέτοια όμως εκτίμηση είναι απαραίτητη για το στάδιο της προκαταρκτικής σχεδίασης του πλοίου, όταν δηλαδή οι τελικές γραμμές του δεν είναι ακόμη επαρκώς προσδιορισμένες. Αυτό το κενό ήρθαν να γεμίσουν οι σχετικές συστηματικές σειρές (Loukakis and Chrysosostomidis, 1975 και Grigoropoulos et al, 1999), που αναπτύχθηκαν με χρήση υπολογιστικών μεθόδων και όχι με πειράματα.

Οι αρχικές συστηματικές σειρές αναφέρονταν σε 72 μορφές γάστρας, βασισμένες στις γάστρες της συστηματικής σειράς αντίστασης Series 60, που αφορούν εμπορικά πλοία με πρύμνη τύπου καταδρομικού (Cruiser-stern). Οι πινακοποιημένοι υπολογισμοί είχαν γίνει για συστηματικές αλλαγές στα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου: συντελεστής γάστρας C_B , λόγος μήκους-πλάτους L/B και πλάτους προς βύθισμα B/T . Τα αποτελέσματα δίνονταν για διάφορες **μετωπικές**, πλήρως αναπτυγμένες θάλασσες, εκφρασμένες με την αδιάστατη παράμετρο σημαντικό ύψος κύματος - μήκος πλοίου $H^{1/3}/L$ και την ταχύτητα του πλοίου, εκφρασμένη με τον αριθμό Froude $F_n = V_s / \sqrt{gL_{WL}}$, όπου L_{WL} είναι το μήκος της ισάλου πλεύσεως.

Από την παρουσίασή τους (1975) και μετά οι σειρές βρήκαν ευρεία χρήση στο επάγγελμα του ναυπηγού και ως εκπαιδευτικό εργαλείο. Από τους Grigoropoulos, et al (1999) δίνονται μερικές σχετικές αναφορές, οι οποίες όμως ζητούσαν επέκταση των σειρών. Έτσι, αποφασίστηκε η δημιουργία της νέας συστηματικής σειράς δυναμικών αποκρίσεων σε πλάγιες θάλασσες. Η νέα σειρά περιέχει επιπλέον: αποκρίσεις σε **πλάγιες** θάλασσες και αποκρίσεις σε μηδενική ταχύτητα, χρήσιμη π.χ. για μελέτη πλοίων αποθηκών και πλοίων γεωτρυπάνων. Επιπλέον, οι νέες αδιάστατες θάλασσες περιγράφουν πολύ καλύτερα το φυσικό πρόβλημα, με χρήση της παραμέτρου “αδιάστατη κομβική συχνότητα” $T'_p = T_p / \sqrt{L_{BP} / g}$, όπου T_p η κομβική περίοδος του φάσματος των κυματισμών. Οι σχετικοί υπολογισμοί έγιναν για τις εξής τιμές των παραμέτρων:

$$F_n = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, T'_p = 1.5(0.5) 5.0$$

$$C_B = 0.55 (0.05) 0.90, L/B = 5.5, 7.0, 8.5 \text{ και}$$

$B/T = 2.0, 3.0$ και 4.0

και για γωνίες πλεύσης από μετωπικούς κυματισμούς (180^0) μέχρι πρυμναίους κυματισμούς (0^0) σε διαστήματα 15^0 .

Οι υπολογισμένες αποκρίσεις είναι για: καθ' ύψος ταλάντωση (heaving motion), πρόνευση (pitching motion), καμπτική ροπή στο μέσο νομέα (bending moment), πρόσθετη αντίσταση (added resistance), σχετική κίνηση (relative motion) και (απόλυτη) κάθετη επιτάχυνση (vertical acceleration) στους σταθμούς 2,4 και 20 και σχετική ταχύτητα στους σταθμούς 2 & 4. Με βάση τα παραπάνω, μπορεί κανείς να υπολογίσει και τις πιθανότητες να συμβούν τα ακόλουθα “γεγονότα δυναμικής συμπεριφοράς” (seakeeping events): σφυρόκρουση πλώρας (bow slamming), διαβροχή καταστρώματος (deck wetness) και ανάδυση έλικας (propeller emergence).

Δεδομένου τώρα, ότι οι κάθετες αποκρίσεις πλοίου εξαρτώνται γραμμικά από το σημαντικό ύψος κύματος, ενώ η πρόσθετη αντίσταση εξαρτάται από το τετράγωνο του ύψους κύματος, όλοι οι υπολογισμοί έχουν γίνει για $H_{1/3}=1\text{m}$.

Τα αποτελέσματα των πινάκων είναι σε μορφή ακέραιων με πεδίο 0-9999 και γι' αυτό το λόγο έχουν αδιαστατοποιηθεί ως κατωτέρω:

$$\text{Heaving motion} = (\text{RMS heave at amidships}) * 10^5 / (L_{BP} H_{1/3})$$

$$\text{Pitching motion} = (\text{RMS pitch in degrees}) * 10^4 / H_{1/3}$$

$$\text{Bending moment} = (\text{RMS bending moment at amidships}) * 10^9 / (\rho g L_{BP}^4 H_{1/3})$$

$$\text{Added resistance} = (\text{mean added resistance}) * 10^{10} / (\rho g L_{BP}^3 H_{1/3})$$

$$\text{Relative motion} = (\text{RMS relative motion}) * 10^6 / (L_{BP} H_{1/3})$$

$$\text{Relative velocity} = (\text{RMS relative velocity}) * 10^5 / (\sqrt{gL_{BL}} H_{1/3})$$

$$\text{Acceleration} = (\text{RMS acceleration}) * 10^5 / (g H_{1/3})$$

όπου όλα τα αποτελέσματα αναφέρονται σε μοναδιαίο σημαντικό ύψος κύματος.

Για την παραγωγή των σειρών χρησιμοποιήθηκε η θεωρία λωρίδων (Salvesen et al, 1970), μαζί με τριπαραμετρική παράσταση των επιφανειών των νομέων (Athanasoulis and Loukakis, 1985) και την εκτεταμένη μέθοδο υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς (Loukakis and Sclavounos, 1978).

Τα “καλά” για σκοπούς μηχανικού αποτελέσματα της χρήσης του παραπάνω συνδυασμού θεωριών για την πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς, φαίνονται από τη σύγκρισή τους με πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι στα σχήματα 7.1, 7.2, 7.3 και 7.4 δείχνονται οι σχετικές συγκρίσεις για πρόνευση, σχετική κίνηση στην πλώρη, καμπτική ροπή και πρόσθετη αντίσταση, για ένα πλοίο των σειρών 60 με $L_{BP} = 120\text{m}$, $C_B = 0.7$, $L/B = 7$ και $B/T = 3$, όπου τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα είναι από τους Vossers et al (1960, 1961).

Περαιτέρω, οι αναλυτικές προβλέψεις της κάθετης επιτάχυνσης στην πλώρη και η πρόσθετη αντίσταση για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ship) συγκρίνονται στα σχήματα 7.5 και 7.6 με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής & Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. Τέλος, στον πίνακα 7.1 δείχνεται ένα δείγμα από τους πίνακες με τις υπολογισμένες αποκρίσεις για ένα πλοίο των Series 60 με $C_B = 0.7$, $L/B = 7.0$ και $B/T = 3.0$.

Εφαρμογές της συστηματικής σειράς

Με τις μεθόδους παρεμβολών που περιγράφονται από τους Loukakis and Chrysostomidis (1975), ο ναυπηγός μπορεί να πάρει εκτιμήσεις δυναμικής συμπεριφοράς σε κυματισμούς για κάθε πλοίο, του οποίου η γάστρα “μοιάζει” με την αντίστοιχη της σειράς. Μεγάλη ακρίβεια δεν απαιτείται γιατί ούτε τα “κριτήρια”, ως προς τα οποία μετριέται το καλοθάλασσο του πλοίου, είναι ακόμη επαρκώς συμφωνημένα, ούτε η δυναμική συμπεριφορά αυτή καθ’ εαυτή είναι πρωταρχικής σημασίας στην σπειροειδή διαδικασία σχεδίασης ενός πλοίου. Τα εμπορικά πλοία σχεδιάζονται βασικά για να μεταφέρουν ορισμένο φορτίο (deadweight) σε προκαθορισμένη ταχύτητα. Όμως, πρέπει να ταξιδεύουν και μέσα από τρικυμισμένες θάλασσες και επομένως το “καλοθάλασσό” τους (seaworthiness) μετράει ως “διατηρούμενη ταχύτητα θάλασσας” (sustained sea speed), η οποία πρέπει να παίρνει υπ’ όψη της τόσο την “αθελήτη μείωση ταχύτητας” (involuntary speed reduction), όσο και την “ηθελήμενη μείωση ταχύτητας” (voluntary speed reduction). Από αυτές η πρώτη οφείλεται στην πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμό, ενώ η δεύτερη σε αποκρίσεις του πλοίου που, είτε θέτουν σε κίνδυνο την κατασκευή του πλοίου (π.χ. σφυροκρούσεις), είτε ταλαιπωρούν τους επιβάτες και το πλήρωμα (π.χ. κάθετες και πλάγιες επιταχύνσεις). Τα παραπάνω, που περιγράφονται εκτενέστερα από τους Αθανασούλη και Λουκάκη (1997), [σελ. 306-311], μπορούν να προβλεφθούν με χρήση των αποτελεσμάτων της συστηματικής σειράς, τώρα και για πλάγιες θάλασσες.

Με αυτόν τον τρόπο και κατά τη φάση της προκαταρκτικής σχεδίασης, ο ναυπηγός μπορεί να ελέγξει εάν μία προτεινόμενη σχεδίαση είναι κατάλληλη για τη θαλάσσια περιοχή, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και, ακόμη, εάν δεν είναι κατάλληλη, να προσδιορίσει τις απαιτούμενες αλλαγές στα κύρια χαρακτηριστικά της σχεδίασης.

Ως παράδειγμα των περιεχομένων των πινάκων της σειράς, τα περιεχόμενα τους για το κεντρικό πλοίο ($C_B=0.7$, $L/B=7.0$, $B/T=3.0$) και για $Fr.No = 0.2$ έχουν σχεδιαστεί ως εξής: καθ' ύψος ταλάντωση (Σχήμα 7.7), πρόνευση (Σχήμα 7.8), καμπτική ροπή (Σχήμα 7.9) και πρόσθετη αντίσταση (Σχήμα 7.10). Επιπλέον, η επιτάχυνση στην πλώρη και για $Fr.Nos = 0, 0.1, 0.2 \text{ \& } 0.3$, έχει σχεδιαστεί στα σχήματα 7.11, 7.12, 7.13 και 7.14.

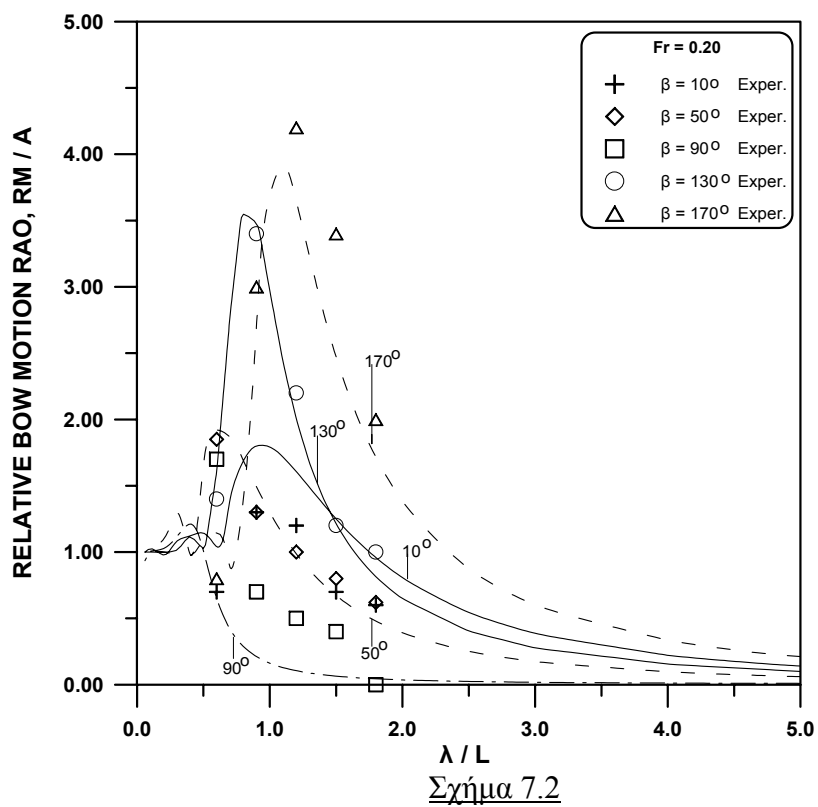
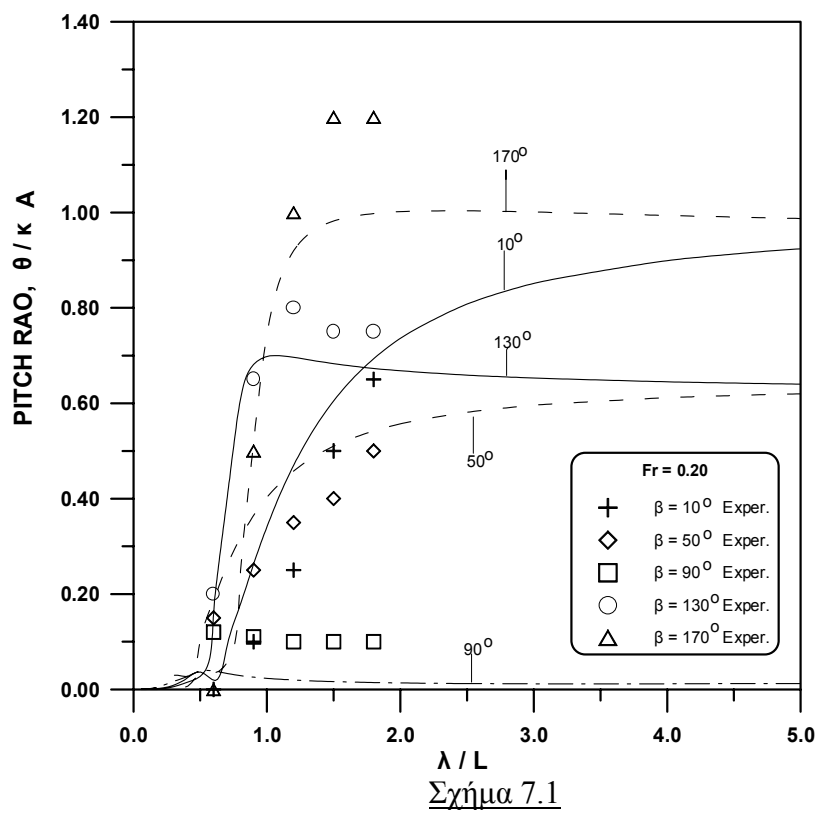
Τα αδιάστατα αποτελέσματα έρχονται στη ζωή, στα φυσικά δηλαδή μεγέθη, με χρήση του μήκους του πλοίου και του σημαντικού ύψους κύματος. Εν πάση όμως περιπτώσει, το σχήμα των αντίστοιχων καμπύλων είναι ενδιαφέρον και από μόνο του. Έτσι, ο συντονισμός της καθ' ύψος ταλάντωσης συμβαίνει σε γωνία πλεύσεως περίπου 100° (Σχήμα 7.7) και ο συντονισμός της πρόνευσης για τις χαμηλές καταστάσεις θάλασσας (χαμηλές τιμές του T_p) δεν είναι για μετωπικές θάλασσες, αλλά για γωνίες πλεύσεως κοντά στις 90° (Σχήμα 7.8). Παρεμφερή συμπεριφορά δείχνει και η καμπτική ροή (Σχήμα 7.9) και ακόμη και η πρόσθετη αντίσταση δεν είναι μεγίστη για μετωπική γωνία πλεύσης στις χαμηλότερες θάλασσες (Σχήμα 7.10).

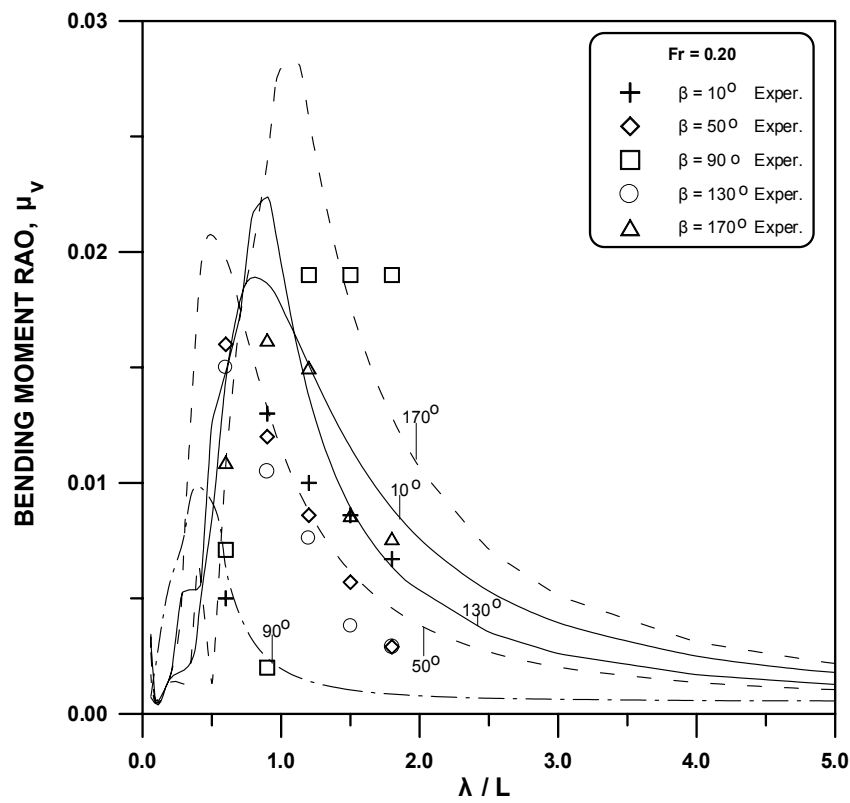
Για την περίπτωση της (κάθετης) επιτάχυνσης στην πλώρη, τ' αποτελέσματα (Σχήματα 7.11, 7.12, 7.13 και 7.14) είναι ιδιαίτερος ενδιαφέροντα. Σ' αυτή την περίπτωση ο συντονισμός συμβαίνει στη μηδενική ταχύτητα περίπου στις 90° . Με την αύξηση της ταχύτητας, ο συντονισμός τείνει να συμβεί κοντά στις μετωπικές θάλασσες (180°), με εξαίρεση τις χαμηλότερες θάλασσες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Δυναμικές αποκρίσεις ανά μέτρο $H_{1/3}$ για τη Σειρά 60 με $C_B=0.700$, $L/B=7.0$,

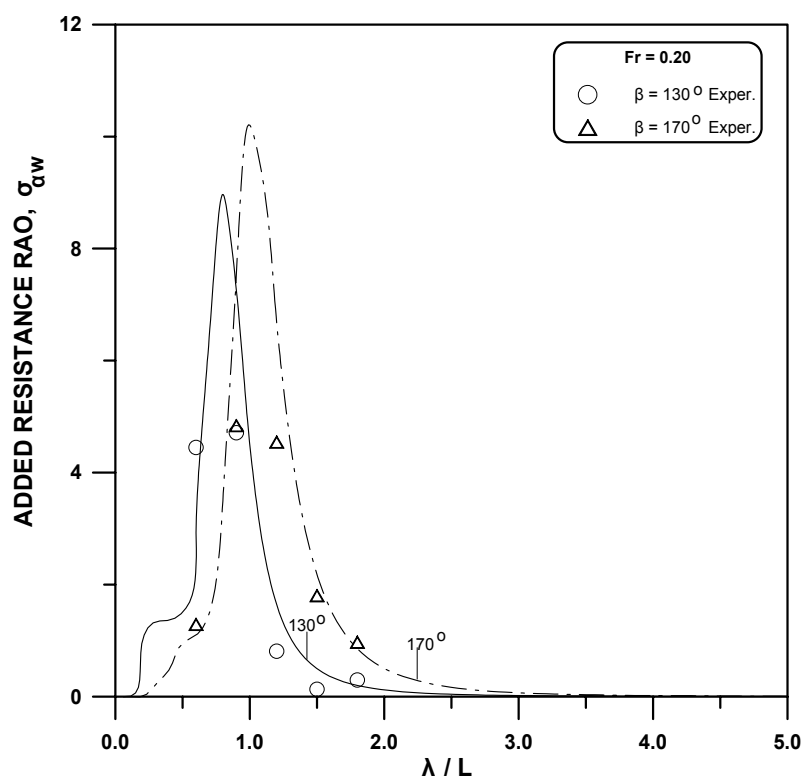
B/T=3.0 και LCB=1.0% L

	SHIP HEADING ANGLE IN DEGREES															SHIP HEADING ANGLE IN DEGREE														
	HEAD					BEAM					FOLLOW					HEAD					BEAM					FOLLOW				
	Fn	Tp	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0	Fn	Tp	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0
HEAVE	0.0	1.5	238	253	286	286	428	1085	1348	754	320	222	201	186	187	0.1	1.5	123	124	136	224	486	992	1335	877	343	172	131	107	100
	2.0	411	427	471	571	989	1798	2118	1517	845	506	382	335	330		2.0	403	427	534	801	1279	1877	2104	1508	788	437	294	239	223	
	2.5	631	662	761	958	1370	2002	2263	1835	1283	915	712	612	584		2.5	770	812	956	1241	1673	2137	2254	1774	1194	842	645	546	516	
	3.0	946	980	1087	1279	1605	2046	2235	1954	1555	1253	1060	954	922		3.0	1102	1142	1273	1512	1845	2168	2231	1888	1469	1179	995	893	861	
	3.5	1222	1253	1346	1506	1749	2056	2189	2001	1720	1490	1331	1237	1207		3.5	1360	1394	1500	1681	1922	2149	2186	1945	1647	1422	1268	1179	1149	
	4.0	1432	1458	1534	1660	1840	2055	2149	2021	1822	1650	1523	1447	1422		4.0	1545	1572	1655	1792	1967	2125	2147	1978	1762	1591	1467	1393	1368	
	4.5	1585	1606	1667	1765	1889	2053	2119	2032	1888	1758	1660	1599	1578		4.5	1677	1698	1762	1865	1994	2107	2119	1997	1839	1708	1610	1550	1530	
	5.0	1696	1712	1760	1837	1939	2049	2096	2037	1931	1832	1756	1707	1691		5.0	1770	1787	1837	1915	2011	2091	2096	2009	1892	1791	1713	1665	1648	
	0.2	1.5	64	68	99	182	389	876	1332	1045	274	121	86	74	70	0.3	1.5	38	41	47	110	275	768	1353	966	245	100	80	77	76
	2.0	555	597	733	1001	1429	1910	2077	1490	722	399	261	205	191		2.0	547	589	725	1002	1434	1941	2046	1387	683	377	249	200	187	
2.5	1177	1226	1373	1631	1958	2242	2230	1711	1122	795	611	518	489		2.5	1437	1490	1647	1877	2156	2341	2199	1625	1076	764	588	500	473		
3.0	1521	1561	1683	1877	2103	2280	2215	1827	1403	1128	954	857	827		3.0	1957	1990	2078	2206	2336	2387	2193	1763	1359	1093	925	832	802		
3.5	1703	1736	1829	1974	2131	2238	2177	1896	1590	1373	1225	1139	1111		3.5	2128	2148	2201	2275	2343	2322	2162	1847	1551	1338	1194	1111	1083		
4.0	1839	1833	1904	2010	2124	2194	2142	1938	1716	1547	1426	1354	1330		4.0	2178	2191	2219	2257	2285	2263	2132	1902	1682	1515	1396	1325	1302		
4.5	1878	1896	1950	2028	2111	2160	2115	1965	1801	1670	1573	1514	1494		4.5	2161	2169	2192	2224	2237	2212	2109	1937	1773	1641	1545	1487	1467		
5.0	1924	1938	1979	2039	2101	2133	2093	1983	1861	1758	1680	1632	1616		5.0	2146	2152	2169	2189	2197	2174	2088	1962	1837	1733	1655	1607	1591		
PITCH	0.0	1.5	746	793	840	1088	1901	2030	975	2929	1977	1169	983	834	798	0.1	1.5	442	490	629	948	1519	1713	636	3247	1822	1000	632	517	477
	2.0	1629	1711	1958	2495	3174	2575	1034	3542	3274	2440	1969	1719	1647		2.0	1911	2013	2318	2786	3121	2451	651	3406	2740	1981	1513	1281	1208	
	2.5	2540	2665	2794	3096	3304	2397	813	3091	3382	3047	2762	2571	2509		2.5	3122	3195	3379	3665	3441	2360	511	2893	2872	2555	2285	2115	2057	
	3.0	2952	2984	3049	3120	3012	2046	606	2517	3068	3088	3020	2946	2917		3.0	3537	3563	3609	3568	3191	2027	382	2356	2664	2667	2596	2529	2503	
	3.5	3002	2999	2979	2903	2639	1718	459	2050	2681	2882	2958	2976	2977		3.5	3514	3505	3452	3271	2795	1708	290	1923	2368	2547	2607	2621	2621	
	4.0	2867	2848	2775	2617	2285	1424	362	1691	2315	2604	2761	2831	2851		4.0	3284	3256	3152	2917	2415	1439	227	1577	2077	2346	2476	2538	2556	
	4.5	2657	2627	2526	2333	1980	1211	273	1390	2002	2323	2516	2616	2646		4.5	2996	2959	2832	2572	2087	1216	171	1283	1815	2111	2287	2378	2405	
	5.0	2429	2393	2280	2075	1713	1013	186	1125	1731	2066	2273	2386	2422		5.0	2706	2665	2529	2268	1809	1024	117	1034	1583	1897	2088	2192	2225	
	0.2	1.5	268	294	400	596	1112	1505	366	3146	1424	689	415	333	303	0.3	1.5	141	155	217	371	773	1382	335	2743	1220	571	365	373	382
	2.0	1796	1888	2162	2585	2953	2455	399	3151	2315	1662	1267	1071	1009		2.0	1463	1548	1820	2279	2775	2580	449	2849	2111	1500	1173	1059	1045	
2.5	3347	3407	3561	3676	3481	2415	332	2669	2524	2245	2010	1866	1816		2.5	3271	3340	3515	3672	3561	2698	397	2473	2354	2077	1879	1790	1772		
3.0	3917	3924	3915	3764	3303	2087	260	2193	2399	2400	2338	2283	2262		3.0	4075	4079	4054	3913	3427	2268	317	2063	2267	2250	2203	2181	2179		
3.5	3897	3870	3768	3498	2898	1760	203	1803	2168	2328	2386	2402	2404		3.5	4116	4083	3957	3672	3051	1887	251	1714	2066	2202	2263	2298	2312		
4.0	3630	3585	3432	3105	2513	1471	159	1475	1924	2163	2292	2352	2370		4.0	3871	3813	3621	3268	2629	1572	201	1419	1844	2060	2185	2257	2281		
4.5	3290	3238	3066	2732	2166	1247	125	1204	1697	1972	2137	2223	2250		4.5	3487	3428	3241	2877	2262	1325	162	1173	1634	1888	2047	2139	2171		
5.0	2950	2896	2724	2403	1877	1055	96	990	1492	1785	1965	2064	2095		5.0	3124	3063	2873	2518	1961	1121	130	974	1444	1715	1889	1992	2026		
BEND. MOMENT	0.0	1.5	1183	1254	1675	2289	2808	1882	2071	2245	2625	1997	1503	1283	1230	0.1	1.5	1382	1388	1638	2137	2232	1679	2168	2495	3150	2455	1785	1394	1295
	2.0	3246	3300	3545	3814	3592	2197	2039	1961	3005	3261	3202	3087	3060		2.0	3676	3739	3893	3957	3420	2224	2146	2189	3578	3901	3694	3394	3318	
	2.5	4228	4202	4150	3954	3303	1924	1614	1608	2742	3440	3791	3934	3980		2.5	4799	4776	4669	4312	3397	2046	1696	1768	3152	3837	4095	4172	4187	
	3.0	4229	4153	3938	3523	2755	1538	1222	1277	2310	3115	3635	3910	4001		3.0	4748	4676	4426	3905	2930	1670	1283	1368	2585	3375	3830	4059	4130	
	3.5	3825	3731	3458	2988	2251	1220	936	1006	1901	2671	3218	3633	3639		3.5	4268	4175	3872	3307	2406	1339	982	1051	2094	2844	3338	3619	3711	
	4.0	3333	3236	2957	2502	1834	983	727	780	1564	2254	2768	3077	3181		4.0	3687	3591	3294	2772	1979	1076	765	819	1695	2373	2844	3126	3219	
	4.5	2867	2777	2515	2097	1500	803	562	622	1280	1900	2364	2648	2745		4.5	3154	3064	2789	2318	1632	886	589	656	1368	1984	2414	2675	2763	
	5.0	2464	2382	2144	1758	1223	650	424	516	1040	1604	2022	2277	2363		5.0	2699	2617	2371	1950	1348	730	440	534	1098	1655	2052	2291	2371	
	0.2	1.5	1375	1419	1480	1904	1975	1564	2118	3136	4255	3039	2096	1565	1404	0.3	1.5	1390	1444	1509	1899	1902	1687	1949	4731	5646	3997	2711	1982	1744
	2.0	3724	3780	3881	3932	3423	2209	2042	2706	4561	4404	3876	3487	3349		2.0	3593	3656	3807	3929	3525	2271	1781	3846	5980	5517	4575	3924	3690	
2.5	5357	5323	5150	4700	3654	2100	1605	2109	3852	4272	4241	4146	4102																	

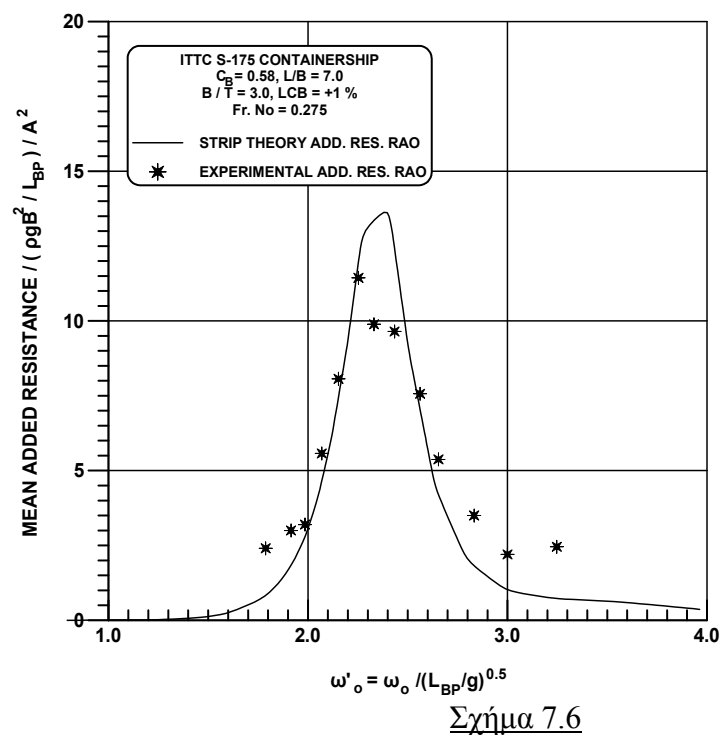
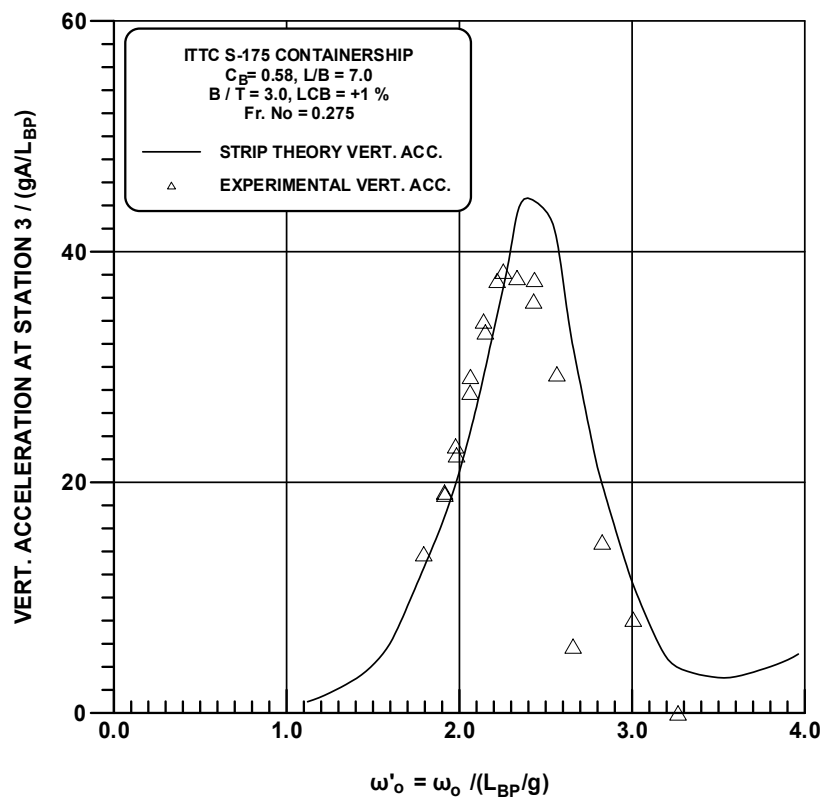


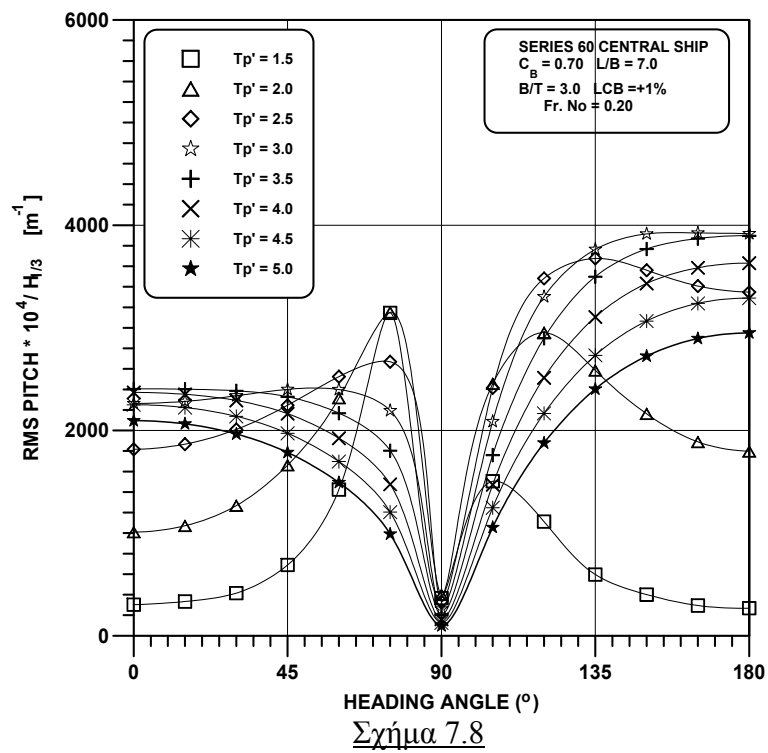
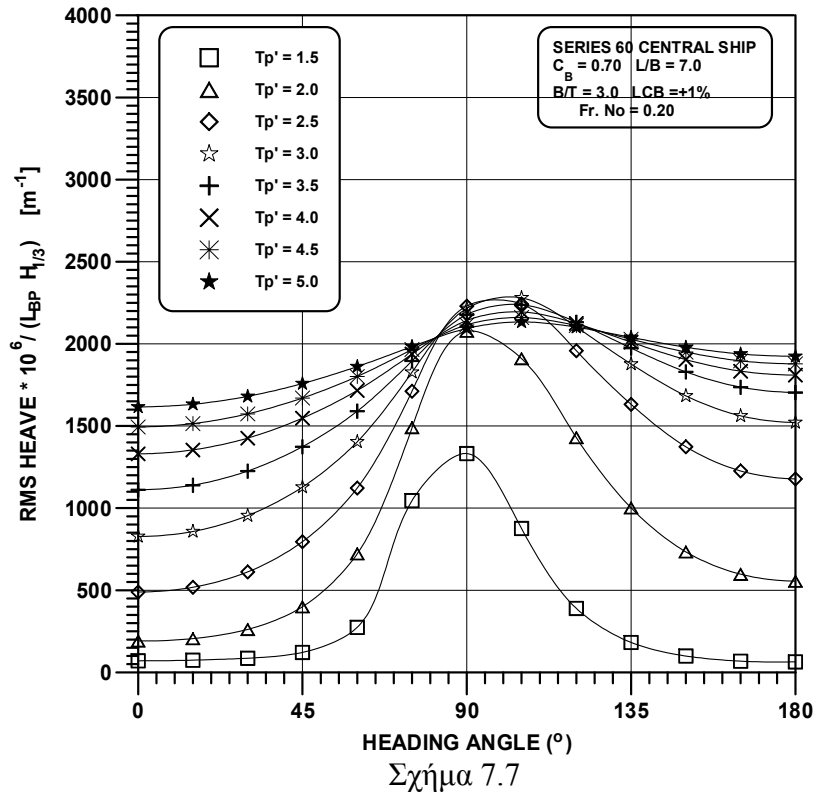


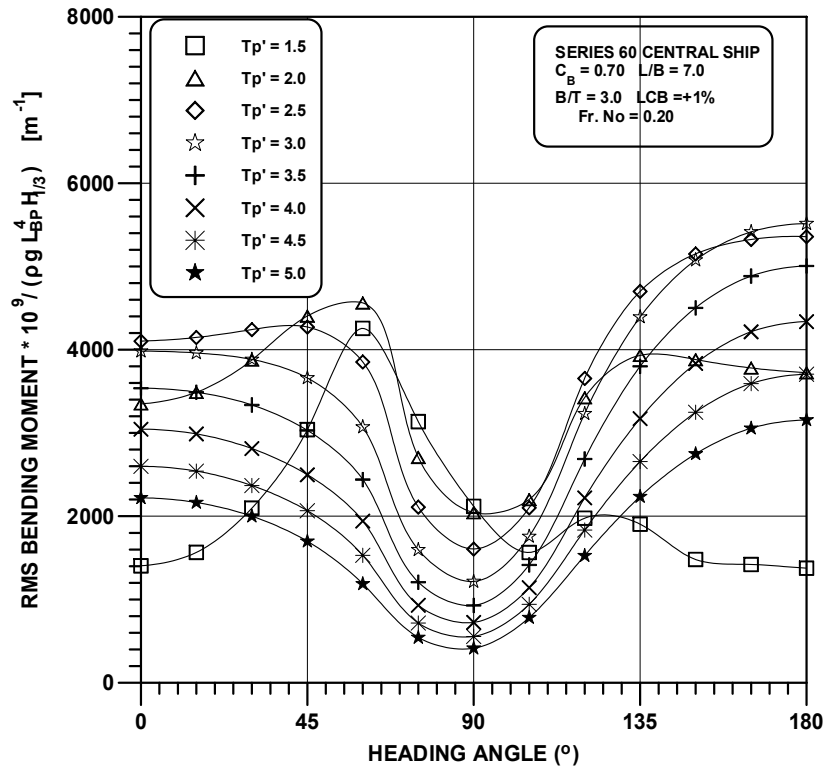
Σχήμα 7.3



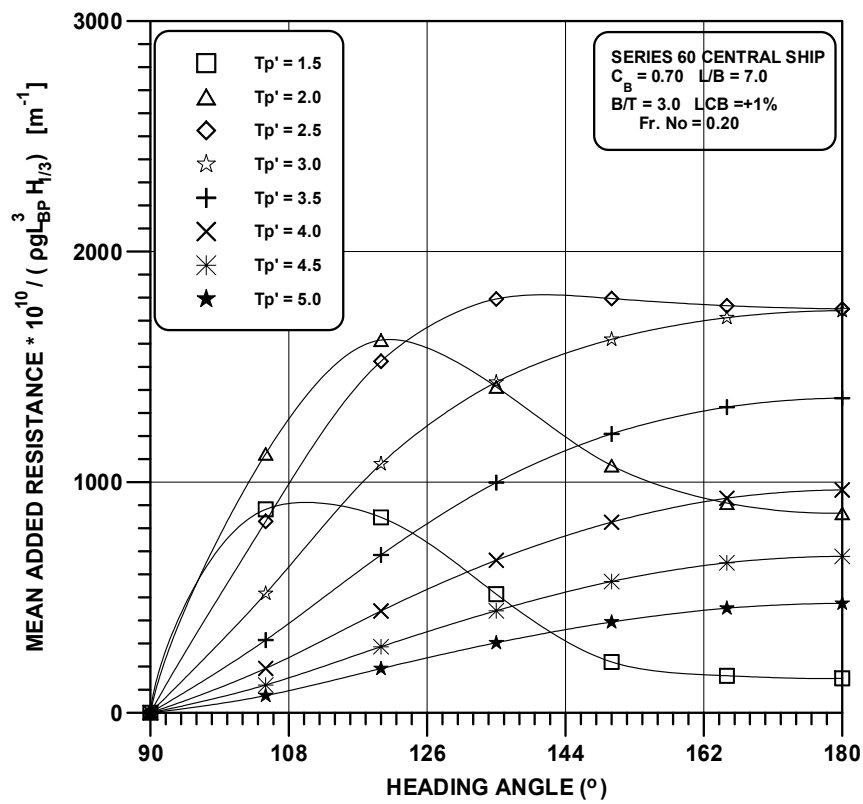
Σχήμα 7.4



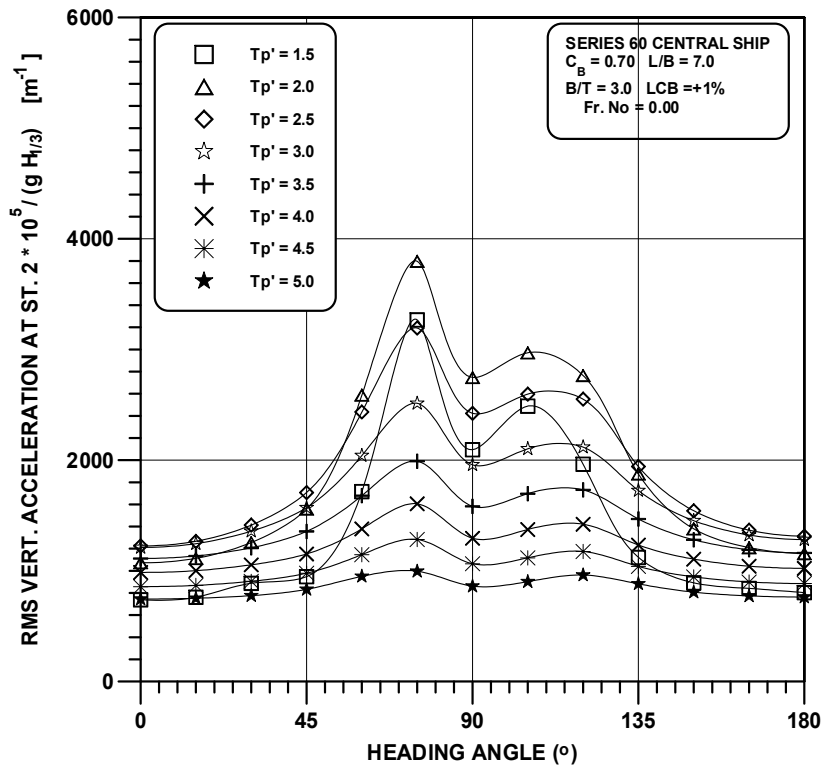




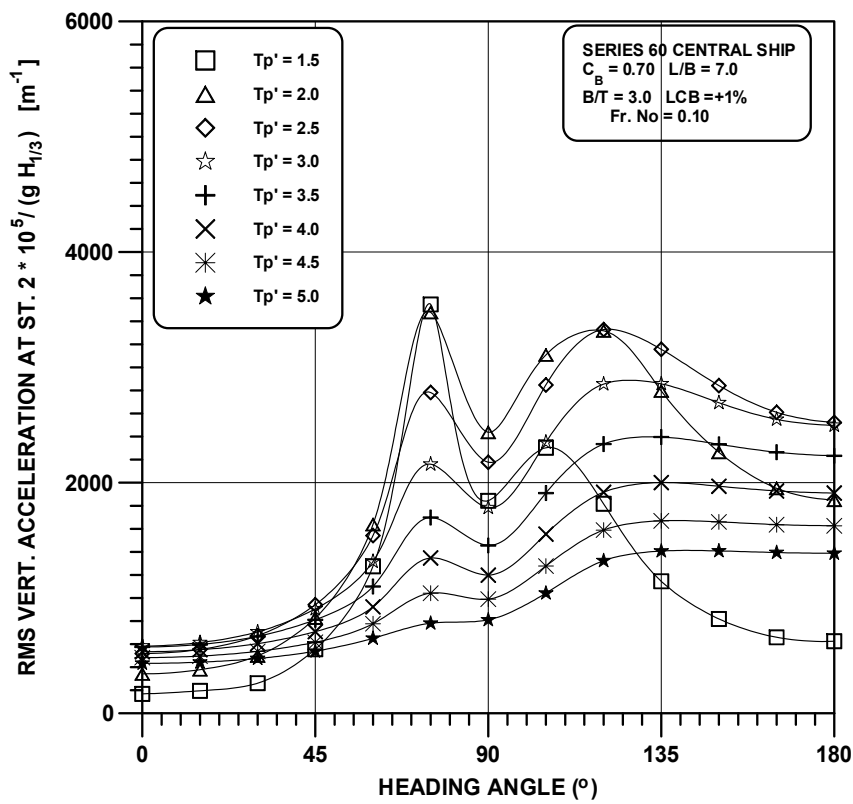
Σχήμα 7.9



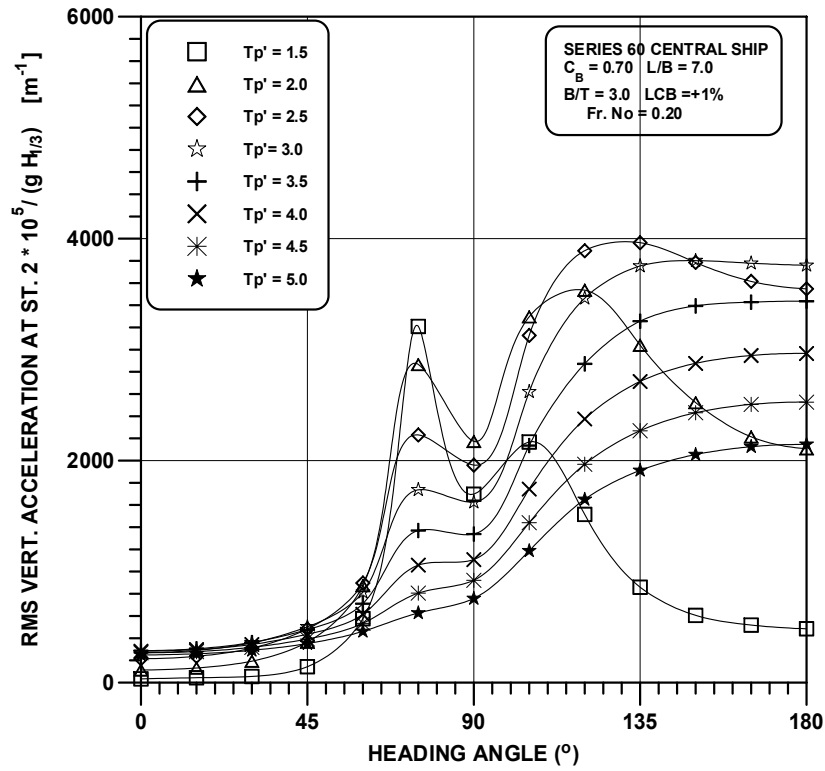
Σχήμα 7.10



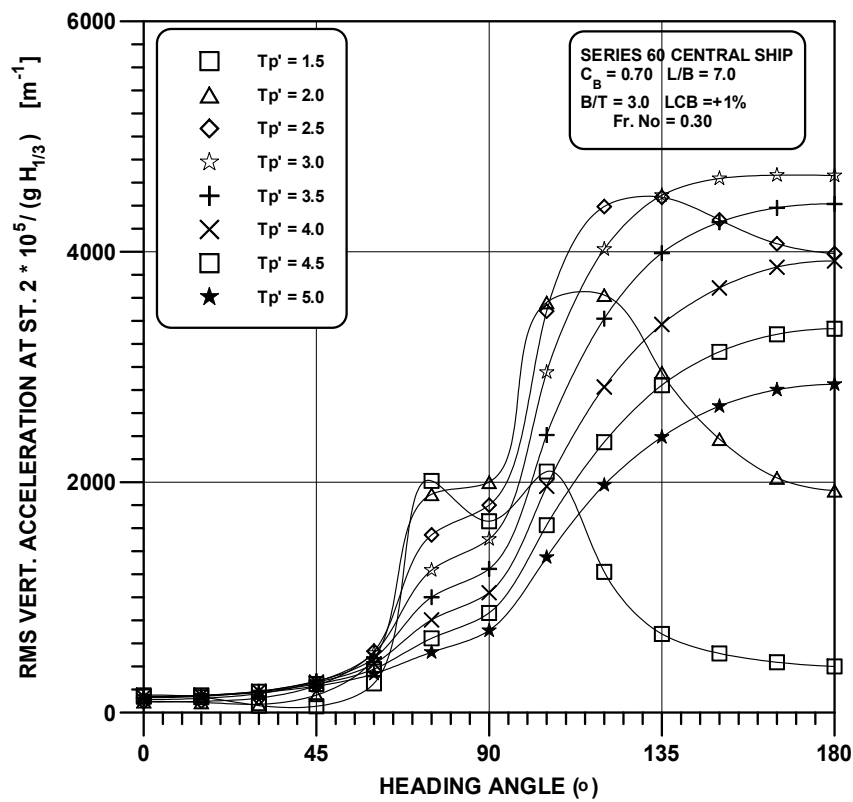
Σχήμα 7.11



Σχήμα 7.12



Σχήμα 7.13



Σχήμα 7.14