

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΔΙΕΘΕΓΓΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΜΩΝΙΕΣ ΩΣ ΕΝΑ
ΠΑΙΓΝΙΟ «ΔΙΛΛΗΜΑΟ΄ΤΟΥ ΦΥΛΑΚΙΣΜΕΝΟΥ»**

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν N χώρες, όπου $N=\{1, \dots, n\}$, η κάθε μία από τις οποίες παράγει αγαθά και εκπέμπει e_i τόνους διοξειδίου του άνθρακα CO_2 . Υποθέτουμε ότι η παραγωγή αγαθών που συνδέεται με την εκπομπή ρύπων CO_2 δίνει οφέλη $B_i(e_i)$ στην χώρα i . Υποθέτουμε ότι οφέλη αυτά αυξάνονται με φθίνοντα ρυθμό, δηλαδή, $B'_i(e_i)>0$ και $B''_i(e_i)<0$. Ας υποθέσουμε μια συγκεκριμένη συνάρτηση οφελών με τα παραπάνω χαρακτηριστικά:

$$B(e_i) = b \left[ae_i - \frac{e_i^2}{2} \right],$$

όπου $b>0$, $a>0$ και $a>e_i$. Επομένως ισχύει: $B'_i(e_i)=ba - be_i>0$, και $B''_i(e_i)=-b<0$.

Καθώς οι εκπομπές CO_2 δημιουργούν το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής που είναι ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα, οι ζημιές που υφίσταται κάθε μία χώρα εξαρτώνται από τις συνολικές εκπομπές CO_2 , δηλαδή η ζημιά της κάθε χώρας είναι συνάρτηση των εκπομπών όλων των χωρών,

$$D_i(E) = \mu_i E, \quad E = \sum_1^n e_i .$$

1) Μη συνεργατική ισορροπία

Εάν η κάθε χώρα δρα μόνη της, χωρίς να υπάρχει κάποια συμφωνία για τον περιορισμό των εκπομπών CO_2 , τότε η κάθε χώρα επιλέγει το επίπεδο των ρύπων της έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την κοινωνική της ωφέλεια, δηλαδή την διαφορά οφελών και ζημιών,

$$\max_{e_i} W_i = B_i(e_i) - D_i(E).$$

Η συνθήκη πρώτης τάξης είναι:

$$\frac{\partial W_i}{\partial e_i} = 0 \Rightarrow ba - be_i - \mu_i = 0 \Rightarrow e_i^{nc} = a - \frac{\mu_i}{b}$$

όπου e_i^{nc} δείχνει τις εκπομπές της χώρας i στην ισορροπία της μη συνεργασίας. Επομένως, οι συνολικές εκπομπές είναι:

$$E^{nc} = \sum_1^n e_i^{nc} = na - \frac{\sum_1^n \mu_i}{b}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των εκπομπών στην ισορροπία, στην συνάρτηση της κοινωνικής ωφέλειας, παίρνουμε την τιμή της στην μη συνεργατική ισορροπία:

$$\begin{aligned}
V_i^{nc} &= b \left[a \left(a - \frac{\mu_i}{b} \right) - \frac{1}{2} \left(a - \frac{\mu_i}{b} \right)^2 \right] - \mu_i \left(na - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \\
&= \frac{b}{2} \left(a + \frac{\mu_i}{b} \right) \left(a - \frac{\mu_i}{b} \right) - \mu_i \left(na - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \\
&= \frac{b}{2} \left(a^2 - \frac{\mu_i^2}{b^2} \right) - \mu_i \left(na - \frac{\sum \mu_i}{b} \right)
\end{aligned}$$

2) Πλήρως συνεργατική ισορροπία

Υποθέτουμε τώρα ότι όλες οι χώρες αποφασίζουν να συνεργαστούν και να επιλέξουν τις εκπομπές τους έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το άθροισμα των ωφελειών όλων των χωρών, δηλαδή,

$$\max_{e_i} \sum_1^n W_i(e_i) = \sum_1^n b \left[ae_i - \frac{e_i^2}{2} \right] - \sum_1^n \mu_i E.$$

Η συνθήκη πρώτης τάξης είναι:

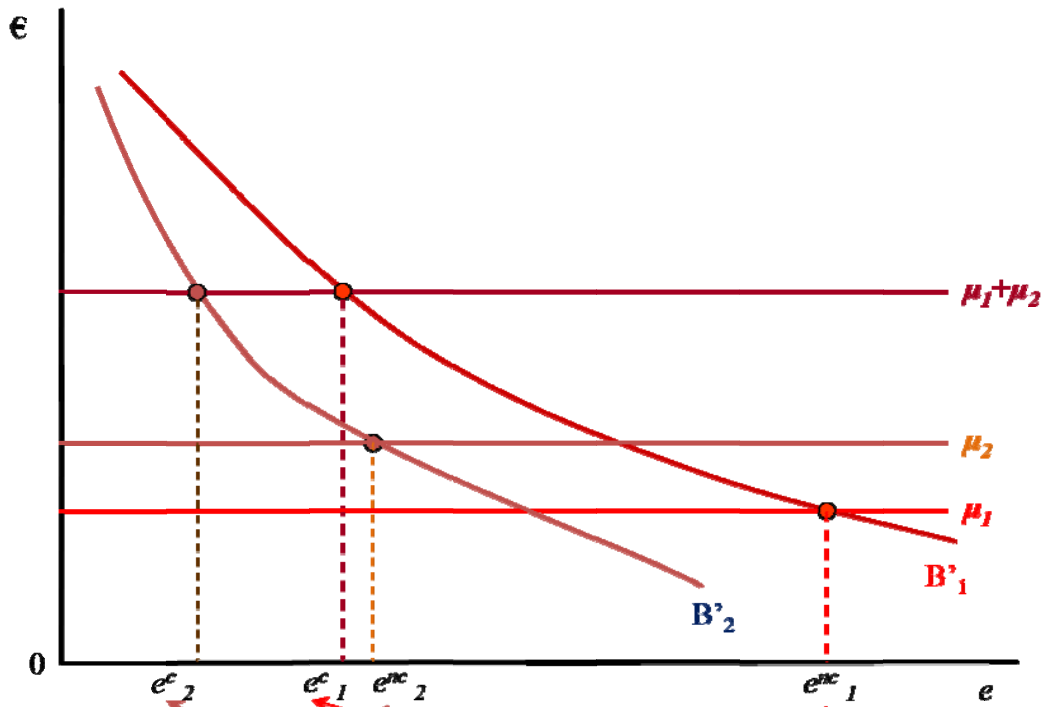
$$\frac{\partial \sum W_i}{\partial e_i} = 0 \Rightarrow ba - be_i - \sum \mu_i = 0 \Rightarrow e_i^c = a - \frac{\sum \mu_i}{b}.$$

όπου e_i^c δείχνει τις εκπομπές της χώρας i στην ισορροπία της πλήρους συνεργασίας. Καθώς $\sum \mu_i > \mu_i$ έχουμε ότι $e_i^c < e_i^{nc}$, δηλαδή η κάθε χώρα μειώνει τους ρύπους της περισσότερο στην περίπτωση της πλήρους συνεργασίας. Αυτό γίνεται καθώς η κάθε χώρα λαμβάνει υπόψη της το πλήρες κόστος των εκπομπών της, δηλαδή εκτός του κόστους στην ίδια την χώρα και το κόστος που έχουν οι εκπομπές της σε όλες τις άλλες χώρες. Επομένως, οι συνολικές εκπομπές είναι:

$$E^c = \sum_1^n e_i^c = na - n \frac{\sum_1^n \mu_i}{b}$$

και επομένως οι συνολικές εκπομπές όλων των χωρών είναι μικρότερες όταν όλες οι χώρες συνεργάζονται σε σχέση με την περίπτωση που η κάθε μία δρα μόνη της, $E^c < E^{nc}$

Την σύγκριση των εκπομπών της κάθε χώρας μεταξύ της μη συνεργατικής και της συνεργατικής ισορροπίας μπορούμε να την δούμε και στο διάγραμμα 1 παρακάτω, όπου υποθέτουμε ότι έχουμε μόνο δύο χώρες με διαφορετικά οφέλη και ζημιές. Υποθέτουμε ότι η χώρα 1 έχει μεγαλύτερα οριακά οφέλη ($B'(e_1) > B'(e_2)$) και μικρότερη οριακή ζημία ($\mu_1 < \mu_2$) από την εκπομπή ρύπων σε σχέση με την χώρα 2. Στην περίπτωση της μη συνεργασίας κάθε μία χώρα θέτει $B'(e_i) = \mu_i$ και ως εκ τούτου εκπέμπουν e_i^{nc} , ενώ στην περίπτωση που συνεργάζονται η κάθε χώρα θέτει $B'(e_i) = \mu_1 + \mu_2$ και ως εκ τούτου εκπέμπουν e_i^c . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1 και οι δύο χώρες εκπέμπουν μικρότερες ποσότητες ρύπων στην περίπτωση που δρουν συνεργατικά, δηλαδή, $e_i^c < e_i^{nc}$.



Διάγραμμα 1. Επίπεδα εκπομπών στην περίπτωση πλήρους και μη συνεργασίας (παράδειγμα με δύο χώρες)

Ας προχωρήσουμε τώρα να συγκρίνουμε την ωφέλεια των χωρών στις δύο ισορροπίες. Αντικαθιστώντας τις τιμές των εκπομπών στην ισορροπία πλήρους συνεργασίας, στην συνάρτηση της κοινωνικής ωφέλειας, παίρνουμε την τιμή της στην συνεργατική ισορροπία:

$$\begin{aligned}
 V_i^c &= b \left[a \left(a - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) - \frac{1}{2} \left(a - \frac{\sum \mu_i}{b} \right)^2 \right] - \mu_i \left(na - n \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \\
 &= \frac{b}{2} \left(a + \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \left(a - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) - \mu_i n \left(a - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \\
 &= \frac{b}{2} \left(a^2 - \frac{(\sum \mu_i)^2}{b^2} \right) - \mu_i n \left(a - \frac{\sum \mu_i}{b} \right)
 \end{aligned}$$

Μπορούμε τώρα να συγκρίνουμε την συνολική ωφέλεια κάθε χώρας στις περιπτώσεις πλήρους και μη συνεργασίας,

$$\begin{aligned}
V_i^c - V_i^{nc} &= \frac{b}{2} \left\{ \left(a^2 - \frac{(\sum \mu_i)^2}{b^2} \right) - \left(a^2 - \frac{\mu_i^2}{b^2} \right) \right\} - \mu_i \left\{ n \left(a - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) - \left(na - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \right\} \\
&= \frac{b}{2} \left(\frac{\mu_i^2}{b^2} - \frac{(\sum \mu_i)^2}{b^2} \right) + \mu_i \left(n \frac{\sum \mu_i}{b} - \frac{\sum \mu_i}{b} \right) \\
&= \frac{1}{2b} \left(\mu_i^2 - (\sum \mu_i)^2 + 2\mu_i(n-1)\sum \mu_i \right)
\end{aligned}$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα. Την διαφορά στην ωφέλεια $\frac{1}{2b} \left(\mu_i^2 - (\sum \mu_i)^2 \right)$

η οποία είναι αρνητική, δηλαδή η ωφέλεια κάθε χώρας είναι μεγαλύτερη στην ισορροπία μη συνεργασίας, καθώς εκπέμπει περισσότερους ρύπους. Και την διαφορά στις περιβαλλοντικές ζημιές

$$\frac{1}{2b} \left(2\mu_i(n-1)\sum \mu_i \right)$$

η οποία είναι θετική καθώς οι συνολικοί ρύποι είναι λιγότεροι στην συνεργατική ισορροπία και ως εκ τούτου οι ζημιές μικρότερες. Επομένως, το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από το πια από τις δύο παραπάνω επιδράσεις είναι η σημαντικότερη.

Για να κάνουμε πιο εύκολη την σύγκριση, ας υποθέσουμε ότι όλες οι χώρες έχουν ίδια οριακή ζημία, δηλαδή όλα τα μ είναι ίδια για όλες τις χώρες. Αυτό σημαίνει ότι $\sum_1^n \mu_i = n\mu$

Επομένως, η παραπάνω διαφορά της κοινωνικής ωφέλειας στις δύο ισορροπίες είναι:

$$\begin{aligned}
V_i^c - V_i^{nc} &= \frac{1}{2b} \left(\mu^2 - n^2 \mu^2 + 2\mu(n-1)n\mu \right) \\
&= \frac{1}{2b} \left(\mu^2(1-n^2) + 2\mu^2 n(n-1) \right) \\
&= \frac{\mu^2}{2b} \left((1-n^2) + 2n(n-1) \right) \\
&= \frac{\mu^2}{2b} \left(n^2 - 2n + 1 \right) \\
&= \frac{\mu^2}{2b} \left(n(n-2) + 1 \right)
\end{aligned}$$

Η παραπάνω σχέση είναι θετική υποθέτοντας ότι $n > 2$, δηλαδή ότι έχουμε περισσότερες από δύο χώρες, το οποίο είναι λογικό καθώς εξετάζουμε συμφωνίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Επομένως, η συνολική κοινωνική ωφέλεια κάθε χώρας αυξάνεται στην περίπτωση της πλήρους συνεργασίας για την μείωση των εκπομπών.

3) Θα συνεργαστούν οι χώρες τελικά;

Τότε γιατί οι χώρες δεν δρουν συλλογικά και έχουμε τόσο μεγάλα προβλήματα στην σύναψη συμφωνιών για τον περιορισμό των ρύπων; Για παράδειγμα, γιατί οι χώρες δεν συμφωνούν στην μείωση των εκπομπών CO₂ και οι συζητήσεις για το Πρωτόκολλο του Κιότο δεν οδηγούν πουθενά;

Μια απάντηση στο ερώτημα αυτό δίνει η οικονομική θεωρία, προτάσσοντας τα κίνητρα που έχει η κάθε χώρα να δράσει ως «τζαμπατζής» (free rider). Ας υποθέσουμε ότι μια χώρα υποθέτει ότι αν φύγει από την συμφωνία οι υπόλοιπες χώρες θα μείνουν σε αυτήν και θα συνεχίσουν να μειώνουν τις εκπομπές τους. Στην περίπτωση αυτή οι συνολικοί ρύποι θα είναι

$$\begin{aligned} E^{fr} &= e_{fr}^{nc} + \sum_1^{n-1} e_i^c = \left(a - \frac{\mu_i}{b} \right) + \sum_1^{n-1} \left(a - \frac{\sum_1^{n-1} \mu_i}{b} \right) \\ &= \left(a - \frac{\mu_i}{b} \right) + (n-1) \left(a - \frac{\sum_1^{n-1} \mu_i}{b} \right) = na - \frac{\mu_i}{b} - (n-1) \frac{\sum_1^{n-1} \mu_i}{b} \end{aligned}$$

όπου με $e_{fr}^{nc} = a - \frac{\mu_i}{b}$ συμβολίζουμε τις εκπομπές του «τζαμπατζή», ο οποίος δρα μη συνεργατικά ενώ όλες οι άλλες χώρες δρουν συνεργατικά. Υποθέτοντας πάλι για ευκολία στις πράξεις, ότι όλες οι χώρες έχουν ίδια οριακή ζημία, $\sum_1^{n-1} \mu_i = (n-1)\mu$

$$E^{fr} = na - \frac{\mu}{b} - (n-1) \frac{(n-1)\mu}{b} = na - \frac{\mu}{b} [(n-1)^2 + 1]$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των εκπομπών του τζαμπατζή e_{fr}^{nc} και τους συνολικούς ρύπους E^{fr} , στην συνάρτηση της κοινωνικής ωφέλειας του τζαμπατζή παίρνουμε την τιμή της στην ισορροπία με έναν τζαμπατζή και όλους τους άλλους να συνεργάζονται:

$$\begin{aligned}
V^{fr} &= b \left[a \left(a - \frac{\mu}{b} \right) - \frac{1}{2} \left(a - \frac{\mu}{b} \right)^2 \right] - \mu \left(na - \mu \frac{(n-1)^2 + 1}{b} \right) \\
&= \frac{b}{2} \left(a^2 - \frac{\mu^2}{b^2} \right) - \mu \left(na - \mu \frac{(n-1)^2 + 1}{b} \right)
\end{aligned}$$

Μπορούμε τώρα να συγκρίνουμε την συνολική ωφέλεια της χώρας αυτής όταν δρα ως τζαμπατζής και όταν συνεργάζεται με τις υπόλοιπες χώρες,

$$\begin{aligned}
V_i^c - V^{fr} &= \frac{b}{2} \left\{ \left(a^2 - \frac{n^2 \mu^2}{b^2} \right) - \left(a^2 - \frac{\mu^2}{b^2} \right) \right\} - \mu \left\{ n \left(a - \frac{n\mu}{b} \right) - \left(na - \mu \frac{(n-1)^2 + 1}{b} \right) \right\} \\
&= \frac{b}{2} \left(\frac{\mu^2 (1-n^2)}{b^2} \right) - \frac{\mu^2}{b} (2(1-n)) \\
&= \frac{\mu^2}{2b} \left[(1-n^2) - 4(1-n) \right] = \frac{\mu^2}{2b} (1-n)(1+n-4) = \frac{\mu^2}{2b} (1-n)(n-3)
\end{aligned}$$

Η παραπάνω σχέση είναι θετική υποθέτοντας ότι $n > 3$ δηλαδή ότι έχουμε περισσότερες από τρεις χώρες, το οποίο είναι λογικό καθώς εξετάζουμε συμφωνίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Δηλαδή χρειαζόμαστε τουλάχιστον δύο χώρες να είναι μέσα στην συμφωνία (έτσι ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή συμφωνία) και μία χώρα τζαμπατζή. Επομένως, η συνολική κοινωνική ωφέλεια της χώρας που δρα σαν τζαμπατζής είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα είχε η χώρα εάν ήταν μέρος της συμφωνίας. Καθώς όλες οι χώρες έχουν παρόμοια κίνητρα, κάθε μία χώρα ξεχωριστά θα δράσει ως τζαμπατζής και ως εκ τούτου δεν θα υπάρξει συμφωνία. Ενώ κάθε μία χώρα έχει όφελος από το να υπάρξει πλήρης συνεργασία, κάθε μία αναγνωρίζει ότι υπάρχουν σημαντικά κίνητρα τζαμπατζή και δεν εμπιστεύονται η μία την άλλη και καταλήγουν στην μη συνεργασία. Κατ' αυτήν την έννοια, οι χώρες «παίζουν» ένα παίγνιο παρόμοιο με αυτό του «διλήματος του φυλακισμένου» και καταλήγουν στην μη συνεργασία.

Σημαντική παρατήρηση:

Είναι προφανές από την παραπάνω ανάλυση ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται από την υπόθεση που κάναμε ότι όταν μια χώρα φεύγει από την συμφωνία όλες οι υπόλοιπες μένουν μέσα μειώνοντας τους ρύπους τους. Έτσι, η χώρα τζαμπατζής αυξάνει τα οφέλη της καθώς δεν μειώνει τους δικούς της ρύπους, ενώ ταυτόχρονα οι ζημιές της

αυξάνονται πολύ λίγο καθώς οι συνολικοί ρύποι δεν αυξάνονται κατά πολύ καθώς οι υπόλοιπες χώρες συνεχίζουν τις μειώσεις των δικών τους εκπομπών.

Αυτή είναι όμως απλά μια υπόθεση και δεν συμβαίνει αναγκαστικά στην πραγματικότητα. Θα μπορούσαμε για παράδειγμα να σκεφτούμε ότι όταν μια χώρα φεύγει εκτός της συμφωνίας, και άλλες χώρες βγαίνουν εκτός συμφωνίας αυξάνοντας και αυτές τις εκπομπές τους. Αν φύγουν αρκετές, τότε αυξάνεται σημαντικά το κόστος της χώρας τζαμπατζή καθώς αυξάνονται σημαντικά οι συνολικές εκπομπές και ως εκ τούτου οι ζημιές της. Επομένως, θα υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός χωρών που αν ακολουθήσουν την χώρα τζαμπατζή στην έξοδο από την συμφωνία, τότε η χώρα τζαμπατζής θα έχει καθαρές ζημιές από την έξοδό της από την συμφωνία και επομένως θα αποφασίσει να μείνει.