

Ανάλυση Απόδοσης του Greenplum DBMS.

Στυλιανός Κανδυλάκης
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
el17088@mail.ntua.gr

Χαράλαμπος Κλειτσίκας
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
el17643@mail.ntua.gr

Θεοδόσιος Πουντρίδης
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
el17093@mail.ntua.gr

Πηγαίος Κώδικας

Περίληψη—Με τη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη των οργανισμών να υιοθετήσουν βέλτιστες πρακτικές για τη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε δεδομένα (data-driven), που στηρίζονται σε κλάδους όπως η Επιχειρηματική Ευφυΐα (BI), προκειμένου να επιβιώσουν στο ανταγωνιστικό περιβάλλον της αγοράς εργασίας, η ζήτηση σε αποθήκες δεδομένων (Data Warehouses) για την υποστήριξη ερωτημάτων (queries) τύπου Online Transaction Processing (OLTP) καθώς και φόρτων εργασίας τύπου Online Analytical Processing (OLAP) σε πραγματικό χρόνο αυξάνεται διαρκώς. Η βάση δεδομένων Greenplum είναι μια OLAP Data Warehouse αλλά παρέχει και τη δυνατότητα επεξεργασίας φόρτων εργασίας τύπου OLTP. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι με χρήση του καθιερωμένου στη βιομηχανία Benchmark TPC-DS, το οποίο μοντελοποιεί διάφορες εφαρμόσιμες πτυχές ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, συμπεριλαμβανομένων των ερωτημάτων και της συντήρησης δεδομένων, να μετρήσουμε την απόδοση της βάσης δεδομένων του Greenplum πάνω σε μεγάλο όγκο δεδομένων μέσω των ερωτημάτων του TPC-DS και να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητά του.

Λέξεις Κλειδιά—OLAP, Greenplum, Benchmarking, Data Warehouse, Performance Analysis, Data, TCP-DS, MPP Database, απόδοση βάσης δεδομένων, μαζικά δεδομένα, μαζική παράλληλη επεξεργασία

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφεύρεση του συστήματος διαχείρισης βάσεων δεδομένων (database management system - DBMS) βασίζεται στην απαίτηση αποτελεσματικής διαχείρισης και αναζήτησης δεδομένων. Πριν από την ύπαρξη συστήματος διαχείρισης βάσεων δεδομένων, χρησιμοποιούνταν αποθήκευση με βάση αρχεία (file-based), η οποία όμως είχε πολλά προβλήματα μεταξύ των οποίων τα σημαντικότερα ήταν η ασυνέπεια δεδομένων (ύπαρξη μη έγκυρων δεδομένων), η δυσκολία τροποποίησης των εγγραφών ειδικά σε μεταβλητές τύπου συμβολοσειράς, η αλγοριθμική πολυπλοκότητα, και η μη αποδοτική εφαρμογή των ερωτημάτων (κάθε ερώτημα χρειάζεται να γράψει ένα πρόγραμμα διάσχισης, και το πρόγραμμα διάσχισης είναι ιδιαίτερα υπεύθυνο για τον χρόνο εκτέλεσης και τον χώρο), και οι υψηλές τεχνικές απαιτήσεις [1].

Έτσι προέκυψε το σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων (database management system). Παρόλου που οι όροι Βάση Δεδομένων και Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων συχνά χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν το ίδιο πράγμα στην πραγματικότητα, είναι δύο ξεχωριστές έννοιες. Μια βάση δεδομένων αναφέρεται σε μια συλλογή οργανωμένων, σχετικών μεταξύ τους δεδομένων για αποτελεσματική αποθήκευση και αναζήτηση. Το σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων είναι ένα είδος λογισμικού

που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των δεδομένων στη βάση δεδομένων. Μπορεί όχι μόνο να παρέχει τη βασική διεπαφή προσθήκης, διαγραφής και τροποποίησης, αλλά και να παρέχει αποτελεσματική γλώσσα ερωτημάτων. Το σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων που βασίζεται στο σχεσιακό μοντέλο ως το υποκείμενο μοντέλο δεδομένων ονομάζεται σχεσιακό σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Το Greenplum είναι ένα είδος σχεσιακού συστήματος διαχείρισης βάσεων δεδομένων, που αναφέρεται ως σχεσιακή βάση δεδομένων. Στις επόμενες ενότητες όπου χρησιμοποιούμε τον όρο “Βάση Δεδομένων Greenplum”, του αποδίδουμε τις ιδιότητες που περιγράφονται στην παρούσα ενότητα.

Η αξιολόγηση των επιδόσεων αποτελεί βασικό ζήτημα για τους σχεδιαστές και τους χρήστες των συστημάτων διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Η απόδοση αξιολογείται γενικά με benchmarks λογισμικού που βοηθούν, για παράδειγμα, στη δοκιμή αρχιτεκτονικών επιλογών, στη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών ή στη ρύθμιση ενός συστήματος [2]. Στη παρούσα εργασία στο πλαίσιο της αξιολόγησης της επίδοσης του Greenplum χρησιμοποιήσαμε το καθιερωμένο για αυτό το σκοπό στη βιομηχανία OLAP Benchmark TPC-DS, το οποίο μοντελοποιεί συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων συμπεριλαμβανομένων των ερωτημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων [3].

II. ΥΠΟΔΟΜΗ ΤΟΥ GREENPLUM

A. Greenplum και PostgreSQL

Το Greenplum είναι ένα καθιερωμένο σύστημα αποθήκευσης δεδομένων μεγάλης κλίμακας με εφαρμογές τόσο σε επιχειρήσεις όσο και σε εφαρμογές ανοικτού κώδικα. Η αρχιτεκτονική μαζικής παράλληλης επεξεργασίας (MPP) του Greenplum χωρίζει τα δεδομένα σε διακριτά μέρη που αποθηκεύονται σε μεμονωμένα τμήματα εργατών (workers). Αυτό είναι παρόμοιο με τα data-warehouse systems μεγάλης κλίμακας, όπως της Oracle Exadata [5], Teradata [4] και Vertica [6], συμπεριλαμβανομένων συστημάτων DWaaS όπως τα AWS Redshift [7] και AnalyticDB [8]. Αυτά τα συστήματα αποθηκών δεδομένων είναι σε θέση να διαχειρίζονται αποτελεσματικά και να υποβάλλουν ερωτήματα σε petabytes δεδομένων με κατανεμημένο τρόπο.

Η βάση δεδομένων Greenplum όπως ήδη αναφέραμε περιγράφεται ως τεχνολογία μεγάλων δεδομένων με βάση την αρχιτεκτονική MPP. Παράλληλα όμως χρησιμοποιεί και την τεχνολογία βάσεων δεδομένων ανοικτού κώδικα PostgreSQL.

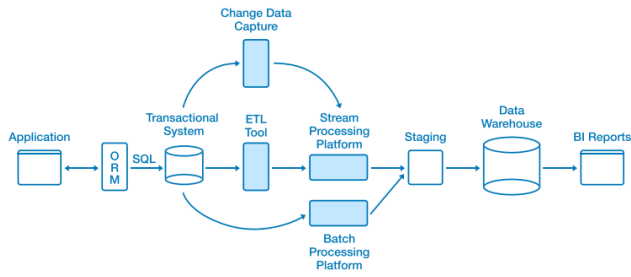
Η PostgreSQL είναι ένα δημοφιλές ελεύθερο και ανοικτού κώδικα σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων που δίνει έμφαση στην επεκτασιμότητα και τη συμβατότητα με την SQL. Έχοντας ως βάση την PostgreSQL, η Greenplum παρέχει επαρκή έλεγχο επί του υπό ανάπτυξη λογισμικού. Η σχέση μεταξύ PostgreSQL και Greenplum στηρίζεται στο ότι η Greenplum είναι ουσιαστικά μια προσαρμογή MPP της PostgreSQL. Η Greenplum έχει βελτιστοποιηθεί για αποθήκευση και ανάλυση μεγάλων δεδομένων σε μεγάλες βάσεις δεδομένων και αποδίδει καλά σε περιβάλλον συναλλαγών. Όσον αφορά το επίπεδο επιδόσεων τόσο της Greenplum όσο και της PostgreSQL, η υπεροχή της Greenplum βασίζεται στο γεγονός ότι είναι εφαρμόσιμη σε περιβάλλον μεγάλου Data Warehouse περιβάλλοντος. Η χρήση της PostgreSQL θεωρείται αξιόπιστη όταν απαιτεί OLTP σε μικρότερα μεγέθη βάσεων δεδομένων. Αυτό περιγράφει την PostgreSQL ως OLTP για συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων κομμάτι στο οποίο υστερεί η τεχνολογία του Greenplum καθώς χαρακτηρίζεται ως κατανεμημένο σύστημα και ούτως ή άλλως κατασκευάστηκε για εργασίες OLAP. Έτσι η χρήση της PostgreSQL καθίσταται δύσκολη όταν κάποιος χρειάζεται φόρτο εργασίας OLAP αφού δεν παρέχει κανένα χαρακτηριστικό συμπίεσης δεδομένων, αποθήκευσης στηλών όταν χρειάζεται σε φόρτο εργασίας OLAP ούτε αυτόματη διαίρεση ή επεκτασιμότητα και καμία παράλληλη εκτέλεση ερωτημάτων για βαθιά αναλυτικά ερωτήματα σε μεγάλα σύνολα δεδομένων. Αντίθετα, η εφαρμοσιμότητα του Greenplum γίνεται εμφανής με τον τρόπο που η τεχνολογία τεμαχίζει τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε παράλληλη μορφή στο cluster. Το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι ο τρόπος με τον οποίο η Greenplum χρησιμοποιεί παράλληλη επεξεργασία, εκτελώντας έτσι ερωτήματα σε μεγάλα σύνολα δεδομένων τάξεις μεγέθους ταχύτερα από ό,τι μπορεί να επιτευχθεί σε συστήματα χωρίς MPP όπως η PostgreSQL. Το πιο σημαντικό είναι ότι η Greenplum ως εργαλείο βάσης δεδομένων χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική shared-nothing σε σύγκριση με την PostgreSQL. Αυτό εξηγεί πώς το Greenplum διαθέτει διακομιστές ή κόμβους στο cluster και έχει ανεξάρτητο λειτουργικό σύστημα, υποδομή αποθήκευσης και μνήμη. Το εργαλείο βάσης δεδομένων, με την αρχιτεκτονική του, μοιράζεται μόνο την υποδομή δικτύου μεταξύ των κόμβων, η οποία είναι απαραίτητη για να επιτρέπεται η ταυτόχρονη επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων στο σύστημα. Μεταξύ πολλών ακόμα διαφορών, το πιο σημαντικό είναι ότι το Greenplum διαθέτει τη δυνατότητα αξιοποίησης της αποθήκευσης στηλών. Αυτή η αποθήκευση δεδομένων έχει οργανωθεί λογικά σε έναν πίνακα, για παράδειγμα, γραμμές και στήλες. Αυτό κατηγοριοποιεί το Greenplum ως ένα εργαλείο βάσης δεδομένων που διαθέτει διατάξεις για χαρακτηριστικά συμπίεσης σε όλους τους πίνακες που χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση στηλών σε σχεσιακά συστήματα βάσεων δεδομένων. Παρά τις διαφορές στην

αρχιτεκτονική και τα χαρακτηριστικά, τόσο το Greenplum όσο και η PostgreSQL θεωρούνται ως συναφή εργαλεία βάσεων δεδομένων. Η σχέση μεταξύ PostgreSQL και Greenplum εξηγεί πώς η Greenplum αποτελεί επέκταση ή μάλλον προσαρμογή της PostgreSQL [10]. Η λειτουργικότητα και των δύο εργαλείων βάσεων δεδομένων στην παράλληλη και μεμονωμένη επεξεργασία υπολογιστικών προβλημάτων και στην ανάλυση δεδομένων παρέχει μια προτίμηση για το ποιο εργαλείο πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Και τα δύο εργαλεία εφαρμόζονται καλύτερα στο υπολογιστικό περιβάλλον ανάλογα με τη φύση της εργασίας. Η PostgreSQL ενδείκνυται καλύτερα σε βάσεις δεδομένων μικρού μεγέθους που χρησιμοποιούν OLTP, ενώ η Greenplum εφαρμόζεται καλύτερα σε εκτεταμένες αναλύσεις δεδομένων που χρησιμοποιούν OLAP, οι οποίες είναι και αυτές που εξετάζουμε στη παρούσα εργασία.

B. Βασικά στοιχεία αρχιτεκτονικής του Greenplum

Οι χρήστες του Greenplum αλληλεπιδρούν με το σύστημα μέσω ενός κόμβου συντονιστή και η υποκείμενη κατανεμημένη αρχιτεκτονική είναι διαφανής για τους χρήστες. Για ένα δεδομένο ερώτημα, ο συντονιστής το βελτιστοποιεί για παράλληλη επεξεργασία και αποστέλλει το παραγόμενο σχέδιο στους εργάτες οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός υψηλής ταχύτητας δικτύου. Κάθε τμήμα εκτελεί το σχέδιο παράλληλα και όταν χρειάζεται ανακατεύει πλειάδες μεταξύ των τμημάτων. Η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνει σημαντική επιτάχυνση για αναλυτικά ερωτήματα που έχουν σημαντικό χρόνο εκτέλεσης. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται από τον συντονιστή και στη συνέχεια διαβιβάζονται στους πελάτες. Οι λειτουργίες της Data manipulation language (DML) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροποποίηση δεδομένων που φιλοξενούνται στα τμήματα των εργατών. Η ατομικότητα (atomicity) εξασφαλίζεται μέσω του two-phase commit πρωτοκόλλου. Οι χρονικά ταυτόχρονες συναλλαγές απομονώνονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κατανεμημένα στιγμιότυπα (snapshots). Το Greenplum υποστηρίζει πίνακες βελτιστοποιημένους για εισαγωγή στηλών με μια ποικιλία αλγορίθμων συμπίεσης. Αυτοί οι πίνακες είναι κατάλληλοι για μαζικές λειτουργίες εγγραφής και ανάγνωσης οι οποίες είναι τυπικές σε φόρτους εργασίας OLAP [9].

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται μια τυπική ροή εργασίας επεξεργασίας δεδομένων που περιλαμβάνει επιχειρησιακές βάσεις δεδομένων που διαχειρίζονται τα πιο πολύτιμα δεδομένα συναλλαγών για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια μετασχηματίζονται περιοδικά, με τη χρήση εργαλείων εξαγωγής, μετασχηματισμού και φόρτωσης (ETL), και φορτώνονται στο Data Warehouse για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία (Analytics/BI).



Σχήμα 1: Μια τυπική ροή εργασίας επεξεργασίας δεδομένων.

Στα Σχήματα 4 και 5 αντίστοιχα παρατίθενται τα διάγραμμα που αντιστοιχούν στην λογική της αρχιτεκτονικής που περιγράφηκε στην παρούσα ενότητα σε διαφορετικά επίπεδα εποπτείας για καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του Greenplum σε επίπεδο αρχιτεκτονικής.

Γ. Αποθήκευση Δεδομένων στο Greenplum

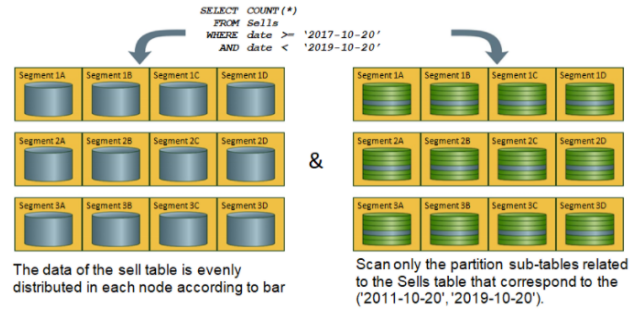
Στο Greenplum, κάθε φυσική μηχανή αντιστοιχεί σε πολλαπλούς δίσκους, κάθε δίσκος συνδέεται με έναν φυσικό δίσκο και κάθε δίσκος έχει πολλαπλές κατατμήσεις δεδομένων (partitions). Η οργάνωση των δεδομένων στο Greenplum υιοθετεί τις ακόλουθες στρατηγικές.

Πρώτα απ' όλα, τα δεδομένα κατανέμονται ομοιόμορφα σε κάθε τμήμα σύμφωνα με τη στρατηγική κατανομής που έχει οριστεί. Οι στρατηγικές διανομής που υποστηρίζονται από το Greenplum περιλαμβάνουν τον κατακερματισμό, την τυχαία κατανομή και τη νέα κατανομή αντιγράφων στο Greenplum 6. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται κατακερματισμός δεδομένων.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα σε κάθε κόμβο χωρίζονται σε μικρότερα υποσύνολα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται κατάτμηση δεδομένων.

Ας χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα ενός Bar όπως παρατίθεται στο Σχήμα 2. Στα αριστερά είναι η επεξεργασία κατακερματισμού δεδομένων. Ο πίνακας πωλήσεων διαμερίζεται σύμφωνα με μια στήλη ("bar") και χωρίζεται σε διαφορετικούς κόμβους. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος διαμερίζεται σύμφωνα με την "ημερομηνία" και χωρίζεται σε μικρότερους υποπίνακες. Μέσω της δήλωσης ερωτήματος στο σχήμα, μόνο το μπλε τμήμα του σχήματος σαρώνεται τελικά για να ολοκληρωθεί η εργασία του ερωτήματος, γεγονός που μειώνει σημαντικά τον όγκο σάρωσης δεδομένων και επομένως και την ταχύτητα εκτέλεσης του ερωτήματος [11].

Data distribution and partition



Σχήμα 2: Παράδειγμα κατακερματισμού και αποθήκευσης δεδομένων στο Greenplum.

Δ. Εκτέλεση Ερωτημάτων

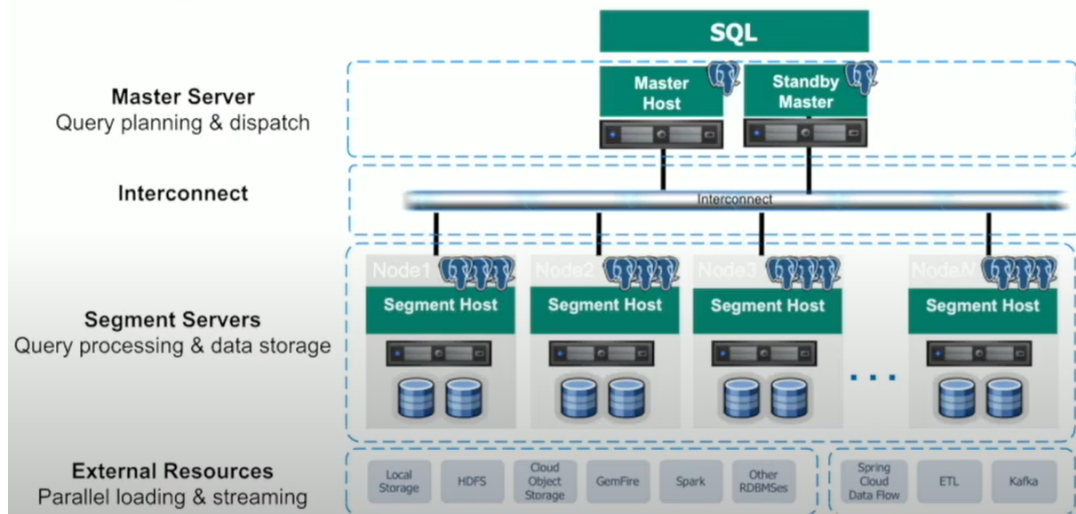
Στο Greenplum η προσθήκη, η διαγραφή, ο έλεγχος και η τροποποίηση πλειάδων υποστηρίζεται, αλλά αυτό δεν είναι αρκετό. Προκειμένου να διευκολυνθεί η χρήση από τους χρήστες και να παρέχονται πιο ισχυρές και χρήσιμες λειτουργίες, το Greenplum παρέχει μια μηχανή εκτέλεσης. Όταν εκτελείται το ερώτημα, η SQL περνάει από τον αναλυτή και η SQL της συμβολοσειράς αναλύεται σε ένα δομημένο δέντρο, μέσω του βελτιστοποιητή γίνεται το πιο αποτελεσματικό σχέδιο εκτέλεσης και ο εκτελεστής εκτελεί το αποτέλεσμα του ερωτήματος. Στο Greenplum, ο εκτελεστής εκτελεί το σχέδιο του ερωτήματος μέσω iterators, δηλαδή από πάνω προς τα κάτω, μία πλειάδα κάθε φορά. Κάθε κόμβος εκτελεστής παρέχει την επόμενη πλειάδα προς τα πάνω και λαμβάνει την επόμενη πλειάδα προς τα κάτω. Μπορεί να υπάρχουν πολλαπλά σχέδια ερωτημάτων για μια δήλωση, όπως η διαδοχική σάρωση και η σάρωση ευρετηρίου. Ο βελτιστοποιητής ερωτημάτων θα είναι αρκετά έξυπνος ώστε να επιλέγει το λιγότερο ακριβό σχέδιο εκτέλεσης [10]. Η δομή της εκτέλεσης ερωτημάτων του Greenplum παρατίθεται στο Σχήμα 3.

Query execution process

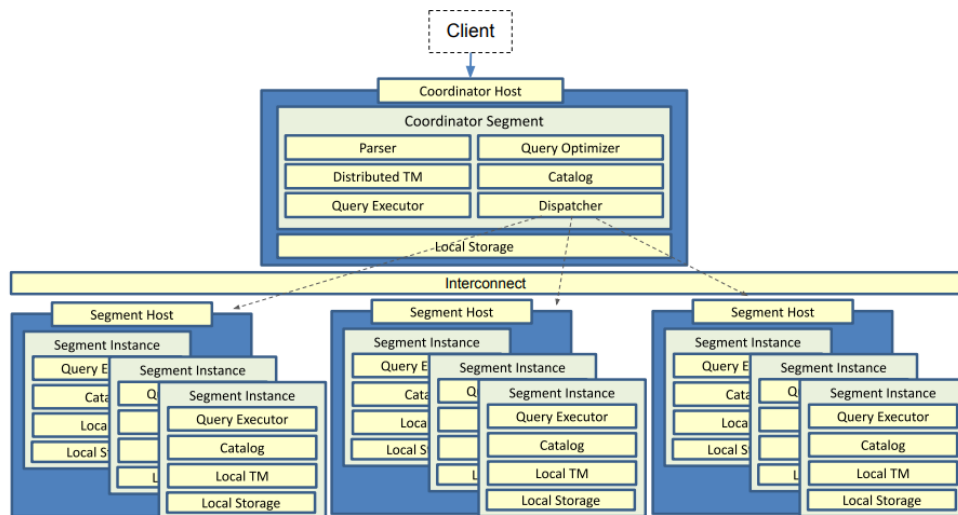


Σχήμα 3: Δομή εκτέλεσης ερωτημάτων στο Greenplum.

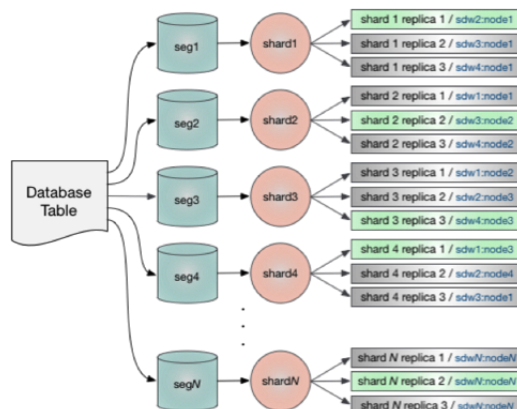
Greenplum is MPP for Analytics



Σχήμα 4: Η αρχιτεκτονική του Greenplum - High level



Σχήμα 5: Η αρχιτεκτονική του Greenplum - Low level



Σχήμα 6: Κατακερματισμός δεδομένων και διαχωρισμός τους σε μικρότερα υποσύνολα σε κάθε κόμβο.

III. ΥΠΟΔΟΜΗ ΤΟΥ TCP-DS

A. Business και Benchmark Μοντέλο

Το TPC-DS είναι ένα μέτρο σύγκρισης για την υποστήριξη αποφάσεων που μοντελοποιεί διάφορες γενικά εφαρμόσιμες πτυχές ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, συμπεριλαμβανομένων των ερωτημάτων και της συντήρησης δεδομένων. Το benchmark παρέχει μια αντιπροσωπευτική αξιολόγηση των επιδόσεων του υπό δοκιμή συστήματος (SUT) ως ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων γενικού σκοπού. Αντιπροσωπεύει συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που:

- Εξετάζουν μεγάλους όγκους δεδομένων,
- Δίνουν απαντήσεις σε πραγματικές επιχειρηματικές ερωτήσεις,
- Εκτελούν ερωτήματα διαφόρων επιχειρησιακών απαιτήσεων και πολυπλοκότητας (ad-hoc, επαναληπτικά, OLAP, εξόρυξης δεδομένων)
- Χαρακτηρίζονται από υψηλό CPU και IO φορτίο,
- Συγχρονίζονται περιοδικά με τις αρχικές βάσεις δεδομένων OLTP μέσω λειτουργιών συντήρησης βάσεων δεδομένων.
- Τρέχουν σε λύσεις "μεγάλων δεδομένων", όπως RDBMS καθώς και συστήματα βασισμένα στο Hadoop/Spark.

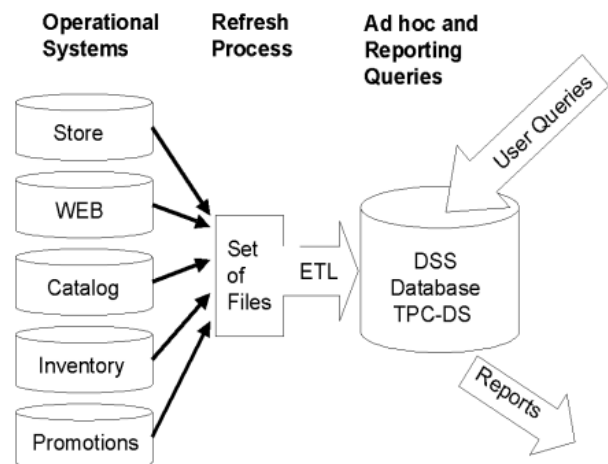
Ένα αποτέλεσμα του benchmark μετρά το χρόνο απόκρισης ερωτημάτων σε λειτουργία ενός χρήστη, την απόδοση ερωτημάτων σε λειτουργία πολλαπλών χρηστών και την απόδοση συντήρησης δεδομένων για το συγκεκριμένο υλισμικό, λειτουργικό σύστημα και σύστημα επεξεργασίας δεδομένων. Ενώ αυτή η συγκριτική αξιολόγηση προσφέρει ένα πλούσιο περιβάλλον αντιπροσωπευτικό πολλών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, δεν αντικατοπτρίζει όλο το φάσμα των απαιτήσεων των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Επιπλέον, ο βαθμός στον οποίο ένας πελάτης μπορεί να επιτύχει τα αποτελέσματα που αναφέρει ένας προμηθευτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο κοντά προσεγγίζει το TPC-DS το σύστημα του πελάτη. Τα αποτελέσματα του benchmark εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το φόρτο εργασίας, τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, το σχεδιασμό των συστημάτων και την υλοποίηση [12].

Πιο συγκεκριμένα το TPC-DS μοντελοποιεί τις λειτουργίες υποστήριξης αποφάσεων ενός προμηθευτή προϊόντων λιανικής πώλησης. Το υποστηρικτικό σχήμα περιέχει ζωτικές επιχειρηματικές πληροφορίες, όπως δεδομένα πελατών, παραγγελιών και προϊόντων. Το benchmark μοντελοποιεί τα δύο πιο σημαντικά στοιχεία κάθε ώριμου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων:

- Τα ερωτήματα των χρηστών, τα οποία μετατρέπουν τα επιχειρησιακά δεδομένα σε επιχειρηματικές πληροφορίες.
- Τη συντήρηση των δεδομένων, η οποία συγχρονίζει τη διοικητική ανάλυση με τα επιχειρησιακά δεδομένα των εξωτερικών πηγών δεδομένων στα οποία βασίζεται.

Το benchmark προσομοιώνει την ποικιλομορφία των λειτουργιών που απαντώνται σε μια εφαρμογή ανάλυσης πληροφοριών. Όλα τα παραπάνω μπορούν να

απεικονιστούν διαγραμματικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Αν και το TPC-DS δεν δημιουργήθηκε με σκοπό να αποτελέσει πρότυπο για τον τρόπο κατασκευής μιας πραγματικής εφαρμογής ανάλυσης πληροφοριών, ο φόρτος εργασίας έχει λάβει ένα ρεαλιστικό πλαίσιο. Συγκεκριμένα, μιμείται τη δραστηριότητα ενός πολυκαναλικού λιανοπωλητή ο οποίος παρακολουθεί τα κανάλια πωλήσεων καταστήματος, διαδικτύου και καταλόγου. Παρόλο που η έμφαση δίνεται στην ανάλυση των πληροφοριών, το benchmark αναγνωρίζει την ανάγκη περιοδικής ανανέωσης της δεδομένων έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν μια ρεαλιστική εικόνα της λειτουργίας μιας επιχείρησης καθώς εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 7: TPC-DS benchmark components

Το TPC-DS έχει ορίσει τέσσερις μεγάλες κατηγορίες που χαρακτηρίζουν τα περισσότερα ερωτήματα υποστήριξης αποφάσεων:

1) Ερωτήματα αναφοράς:

Αυτά τα ερωτήματα αποτυπώνουν τη φύση "αναφοράς" ενός συστήματος DSS. Περιλαμβάνουν ερωτήματα που εκτελούνται περιοδικά για να απαντήσουν σε γνωστές, προκαθορισμένες ερωτήσεις σχετικά με την οικονομική και λειτουργική υγεία ενός επιχείρησης. Αν και τα ερωτήματα αναφοράς τείνουν να είναι στατικά, μικρές αλλαγές είναι συνηθισμένες.

2) Ερωτήματα Ad Hoc:

Αυτά τα ερωτήματα αποτυπώνουν τη δυναμική φύση ενός συστήματος DSS στο οποίο κατασκευάζονται αυτοσχέδια ερωτήματα για να για να απαντηθούν άμεσα και συγκεκριμένα επιχειρηματικά ερωτήματα.

3) Επαναληπτικά Ερωτήματα OLAP:

Τα ερωτήματα OLAP επιτρέπουν την εξερεύνηση και την ανάλυση των επιχειρηματικών δεδομένων για την ανακάλυψη νέων και ουσιαστικών σχέσεων και τάσεων. Ενώ αυτή η κατηγορία ερωτημάτων είναι παρόμοια με την κατηγορία "Ad hoc Queries", διακρίνεται από μια συνεδρία χρήστη βάσει σεναρίου στην οποία υποβάλλεται μια σειρά ερωτημάτων, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τόσο σύνθετα και απλά ερωτήματα.

4) Ερωτήματα Εξόρυξης Δεδομένων:

Η εξόρυξη δεδομένων είναι η διαδικασία ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων για την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας. Μπορεί προβλέψει μελλοντικές τάσεις και συμπεριφορές, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να λαμβάνουν προληπτικές αποφάσεις με γνώμονα τη γνώση. Αυτή η κατηγορία ερωτημάτων αποτελείται συνήθως από ενώσεις (joins) και μεγάλα aggregations, τα οποία επιστρέφουν μεγάλα σύνολα αποτελεσμάτων δεδομένων.

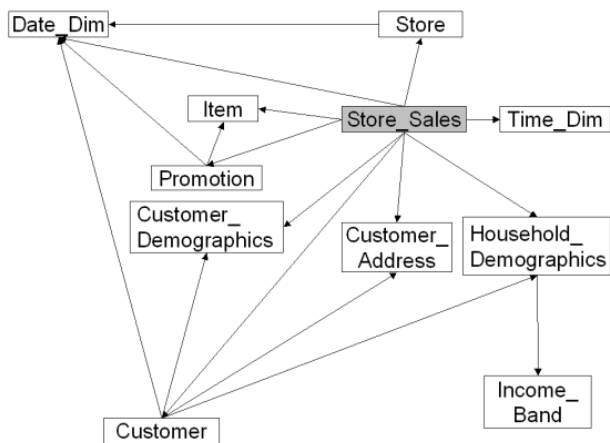
Το TPC-DS παρέχει μια μεγάλη ποικιλία ερωτημάτων στο benchmark για την εξομίωση αυτών των διαφορετικών κατηγοριών ερωτημάτων.

B. Λογική Σχεδίαση της Βάσης Δεδομένων

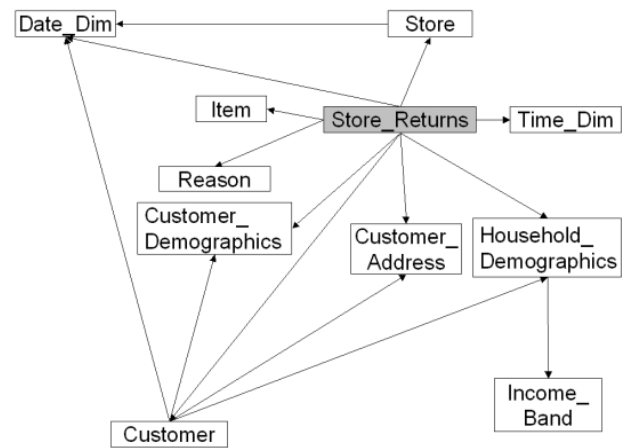
Το σχήμα TPC-DS μοντελοποιεί τη διαδικασία πωλήσεων και επιστροφών πωλήσεων για έναν οργανισμό που χρησιμοποιεί τρεις κύριες κανάλια πωλήσεων: τα καταστήματα, τους καταλόγους και το διαδίκτυο. Το σχήμα περιλαμβάνει επτά πίνακες γεγονότων:

- Ένα ζεύγος πινάκων γεγονότων που εστιάζουν στις πωλήσεις και τις επιστροφές προϊόντων για καθένα από τα τρία κανάλια
- Έναν ενιαίο πίνακα γεγονότων που μοντελοποιεί τα αποθέματα για τα κανάλια πωλήσεων μέσω καταλόγου και διαδικτύου.

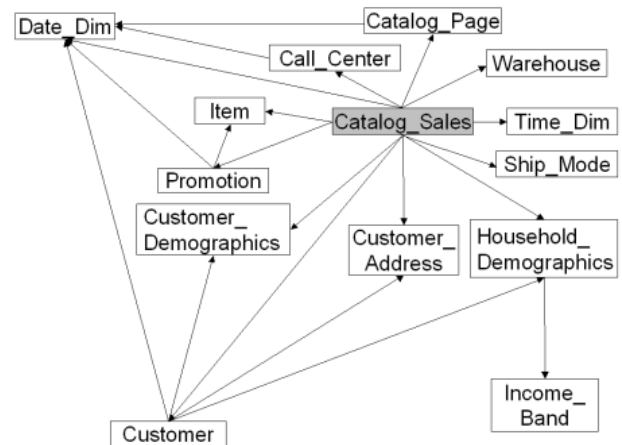
Στα Σχήματα 8-14 παρατίθενται τα ER διαγράμματα των οντοτήτων της βάσης δεδομένων [13].



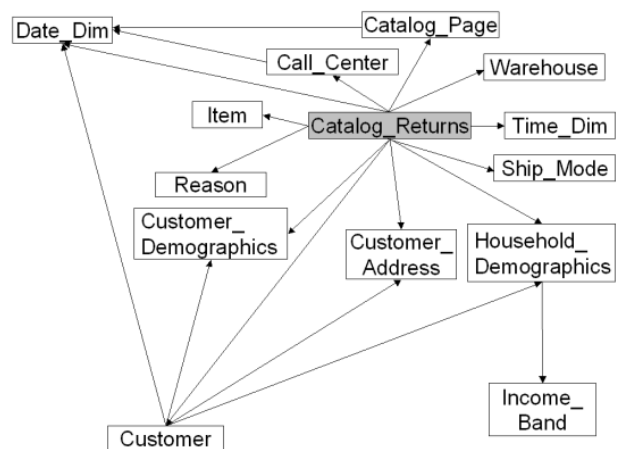
Σχήμα 8: ER διάγραμμα του Store Sales



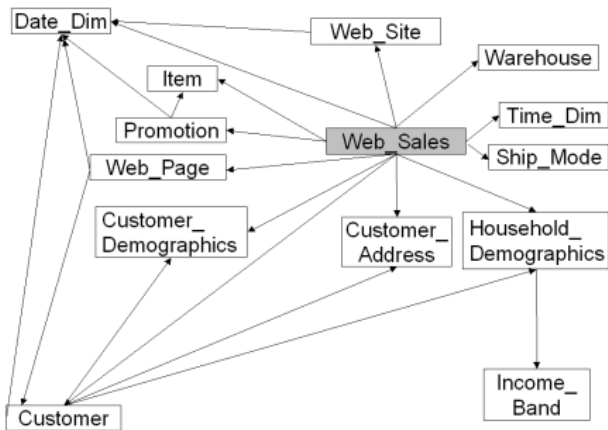
Σχήμα 9: ER διάγραμμα του Store Returns



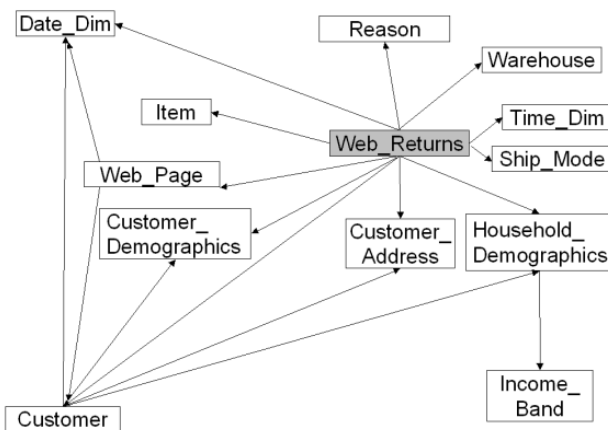
Σχήμα 10: ER διάγραμμα του Catalog Sales



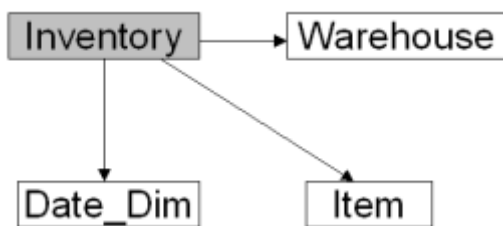
Σχήμα 11: ER διάγραμμα του Catalog Returns



Σχήμα 12: ER διάγραμμα του Web Sales



Σχήμα 13: ER διάγραμμα του Web Returns



Σχήμα 14: ER διάγραμμα του Inventory

Γ. Scaling και Database Population

Το TPC-DS ορίζει ένα σύνολο διακριτών σημείων κλιμάκωσης ("συντελεστές κλίμακας") με βάση το κατά

προσέγγιση μέγεθος των ακατέργαστων δεδομένων που παράγονται από το dsdgen.

Το σύνολο των συντελεστών κλίμακας που ορίζονται για το TPC-DS είναι τα 1TB, 3TB, 10TB, 30TB και 100TB αντίστοιχα. Κάθε καθορισμένος συντελεστής κλίμακας έχει μια σχετική τιμή SF, που είναι καθαρός αριθμός και ισοδυναμεί περίπου με τον αριθμό των gigabytes δεδομένων που υπάρχουν στο data warehouse. Η σχέση μεταξύ των συντελεστών κλίμακας και του SF δίνεται στον Πίνακα 1.

Συντελεστής Κλίμακας	SF
1 TB	1000
3 TB	3000
10 TB	10000
30 TB	30000
100 TB	100000

Δ. Επισκόπηση των ερωτημάτων

Κάθε ερώτημα περιγράφεται από τα ακόλουθα στοιχεία:

α) Ένα επιχειρηματικό ερώτημα, το οποίο απεικονίζει το επιχειρηματικό πλαίσιο στο οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το ερώτημα.

β) Τον ορισμό του ερωτήματος, όπως ορίζεται στο πρότυπο ερωτήματος που παρέχεται από την TPC.

γ) Τις παραμέτρους υποκατάστασης, οι οποίες περιγράφουν τις τιμές υποκατάστασης που απαιτούνται για τη δημιουργία του εκτελέσιμου ερωτήματος.

δ) Το σύνολο απαντήσεων, το οποίο χρησιμοποιείται στην επικύρωση ερωτημάτων

Τα ερωτήματα σχεδιάζονται για να ελέγχουν διάφορες πτυχές ενός τυπικού συστήματος αποθήκευσης δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει την ικανότητα του βελτιστοποιητή του ερωτήματος στο να μετατρέπει οποιαδήποτε έγκυρα ερωτήματα SQL, όπως αυτά μπορεί να γράφονται από ανθρώπους ή προγράμματα, στη βέλτιστη μορφή τους. Ως εκ τούτου, τα παρεχόμενα από το TPC-DS templates ερωτημάτων ενδέχεται να περιλαμβάνουν περιττές ή μη βέλτιστες SQL δομές.

Ε. Μετρικές Επιδόσεων και Κανόνες Εκτέλεσης

Βασικές έννοιες:

- Ως Benchmark ορίζεται η εκτέλεση της δοκιμής φόρτωσης (Load Test) και στη συνέχεια της δοκιμής επιδόσεων (Performance Test).
- Το Load Test ορίζεται ως όλη η δραστηριότητα που απαιτείται για να φτάσει το υπό δοκιμή σύστημα

στη διαμόρφωση που πρέπει αμέσως πριν από την έναρξη του Performance Test. Το Load Test δεν πρέπει να περιλαμβάνει την εκτέλεση οποιουδήποτε από τα ερωτήματα της δοκιμής ισχύος (Power Test) ή της δοκιμής απόδοσης (Throughput Test) ή οποιουδήποτε παρόμοιου ερωτήματος.

- Το Performance Test ορίζεται ως το Power Test, μαζί με τα Throughput Tests τις δοκιμές συντήρησης δεδομένων (Data Maintenance Tests).
- Ως ροή ερωτημάτων (query stream) ορίζεται η διαδοχική εκτέλεση μιας μετάθεσης ερωτημάτων που υποβάλλονται από ένα μόνο χρήστη. Μια ροή ερωτημάτων αποτελείται από τα 99 ερωτήματα που ορίζει το TPC-DS.
- Ως σύνοδος (session) ορίζεται ένα μοναδικά αναγνωρισμένο πλαίσιο διεργασίας ικανό να υποστηρίξει την εκτέλεση ενεργειών της βάσης δεδομένων που ξεκινά ο χρήστης.
- Μια σύνοδος ερωτημάτων (query session) είναι μια σύνοδος που εκτελεί ενέργειες για λογαριασμό ενός Power Test ή ενός Throughput Test.
- Μια εκτέλεση ανανέωσης (refresh run) ορίζεται ως η εκτέλεση ενός συνόλου λειτουργιών συντήρησης δεδομένων.
- Μια σύνοδος ανανέωσης (refresh session) είναι μια σύνοδος που εκτελεί ενέργειες για λογαριασμό ενός refresh run.
- Ένα Throughput Test αποτελείται από S_q συνεδρίες ερωτημάτων, κάθε μία από τις οποίες εκτελεί μία μόνο ροή ερωτημάτων.
- Ένα Power Test αποτελείται από ακριβώς μία σύνοδο ερωτημάτων που εκτελεί μία μόνο ροή ερωτημάτων.
- Μια δοκιμή συντήρησης δεδομένων (Data Maintenance Test) αποτελείται από την εκτέλεση μιας σειράς ροών ανανέωσης.
- Ένα ερώτημα είναι ένα διατεταγμένο σύνολο από μία ή περισσότερες έγκυρες εντολές SQL που προκύπτουν από την εφαρμογή των απαιτούμενων αντικαταστάσεων των παραμέτρων σε ένα δεδομένο template ερωτήματος. Η σειρά των εντολών SQL ορίζεται σε αυτό το template.
- Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την υποβολή ερωτημάτων στο SUT και τη μέτρηση του χρόνου εκτέλεσής τους ονομάζεται οδηγός (driver).
- Πρέπει να λαμβάνεται μια χρονοσφραγίδα (timestamp) στη ζώνη ώρας στην οποία βρίσκεται το SUT. Ο χρόνος που έχει παρέλθει (Elapsed time) μετρίεται σε δευτερόλεπτα στρογγυλοποιημένα στο πλησιέστερο 0.1 s.
- Βάση δεδομένων δοκιμής (Test Database) είναι τα φορτωμένα δεδομένα και τα δημιουργημένα μεταδεδομένα (metadata) που απαιτούνται για την εκτέλεση του συγκριτικού δείκτη TPC-DS, δηλαδή Load test, Power test, Throughput test και Data maintenance test.

- Η τοποθεσία της βάσης δεδομένων (Database Location) είναι η θέση των φορτωμένων δεδομένων που είναι άμεσα προσβάσιμα (ανάγνωση/εγγραφή) από τη test database για την υποβολή ερωτημάτων ή την εφαρμογή λειτουργιών DML στους πίνακες TPC-DS [13].

Το TPC-DS ορίζει τρεις βασικές μετρικές:

- Μια μετρική επιδόσεων $QphDS@SF$, η οποία αντικατοπτρίζει την απόδοση των ερωτημάτων του TPC-DS
- Μια μετρική απόδοσης-τιμής $\$/kQphDS@SF$
- Ημερομηνία διαθεσιμότητας του συστήματος

Το TPC-DS ορίζει επίσης διάφορες δευτερεύουσες μετρικές. Οι δευτερεύουσες μετρικές είναι οι εξής:

- Χρόνος φόρτωσης (Load Time)
- Χρόνος που παρήλθε κατά τη δοκιμή ισχύος (Power Test Elapsed time), και ο χρόνος που παρήλθε για κάθε ερώτημα στο Power Test
- Χρόνοι που παρήλθαν κατά τη δοκιμή απόδοσης 1 και τη δοκιμή απόδοσης 2.
- Όταν επιλέγεται η επιλογή TPC_Energy, η μετρική ενέργειας TPC-DS αναφέρει την ισχύ ανά απόδοση και εκφράζεται ως $Watts/kQphDS@SF$.

Κάθε δευτερεύουσα μετρική αναφέρεται σε συνδυασμό με τον συντελεστή κλίμακας με τον οποίο επιτεύχθηκε. Για παράδειγμα, οι αναφορές στο χρόνο φόρτωσης πρέπει να έχουν τη μορφή Load Time @ SF, ή "Load Time = 10 hours @ 1000".

Η κύρια μετρική απόδοσης του Benchmark είναι η $QphDS@SF$ και ορίζεται ως εξής [14]:

$$QphDS@SF = \left[\frac{SF * Q}{\sqrt[4]{T_{PT} * T_{TT} * T_{DM} * T_{LD}}} \right]$$

Όπου:

- Το SF ορίζεται στην υποενοότητα Γ και βασίζεται στον συντελεστή κλίμακας που χρησιμοποιείται στο benchmark.
- Q είναι ο συνολικός αριθμός των σταθμισμένων ερωτημάτων: $Q = S_q * 99$, με το S_q να ισούται με τον αριθμό των ροών που εκτελούνται σε ένα Throughput Test.
- $T_{PT} = T_{POWER} * S_q$, όπου T_{POWER} είναι ο συνολικός χρόνος που παρήλθε για την ολοκλήρωση του Power Test, και S_q είναι ο αριθμός των ροών που εκτελούνται σε ένα Throughput Test.
- $T_{TT} = T_{TT1} + T_{TT2}$, όπου T_{TT1} είναι ο συνολικός χρόνος που παρήλθε στο Throughput Test 1 και T_{TT2} είναι ο συνολικός χρόνος που παρήλθε στο Throughput Test 2.
- $T_{DM} = T_{DM1} + T_{DM2}$, όπου T_{DM1} είναι ο συνολικός χρόνος που παρήλθε κατά το Data Maintenance Test 1 και T_{DM2} είναι ο συνολικός χρόνος που παρήλθε κατά το Data Maintenance Test 2.
- T_{LD} είναι ο συντελεστής φόρτισης που υπολογίζεται ως $T_{LD} = 0,01 * S_q * T_{Load}$, όπου S_q είναι ο αριθμός των ροών που εκτελούνται στο Throughput Test και T_{Load} είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης της φόρτωσης.
- Οι ποσότητες T_{PT} , T_{TT} , T_{DM} και T_{LD} είναι σε μονάδες δεκαδικών ωρών με ακρίβεια τουλάχιστον 1/3600 της ώρας (δηλ. 1 δευτερόλεπτο)

Ορίζεται επίσης η μετρική απόδοσης τιμής (Price Performance Metric) $\$/kQphDS@SF$ η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\$/kQphDS@SF = \frac{1000 * P}{QphDS@SF}$$

Όπου P είναι η τιμή του τιμολογημένου συστήματος και $kQphDS@SF$ είναι η $QphDS@SF$ πολλαπλασιασμένη επί 1000.

IV. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία ήταν:

- Τρία εικονικά μηχανήματα (1 master - 2 workers) του *okeanos* με 4 CPUs, 8GB RAM και 30GB σκληρό δίσκο ανά μηχανήμα, στα οποία στήσαμε το Greenplum [15].
- Ubuntu 16.04 LTS Xenial [15]
- Greenplum 5.28.5 [16]
- TPC-DS 3.0.0 [17, 18]

Η θεωρητική θεμελίωση και υποδομή των βασικών τεχνολογιών για το παρόν project αναφέρθηκε στις ενότητες II. και III. αντίστοιχα ενώ η διαδικασία για την εγκατάσταση τους παρατίθεται στην ενότητα V.

V. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν προκειμένου να εγκατασταθούν τα απαραίτητα προγράμματα για την υλοποίηση του project.

- Α. Ρύθμιση των VMs και σύνδεση τόσο μεταξύ τους μέσω τοπικού υποδικτύου όσο και με το διαδίκτυο μέσω *public ip* [19].
- Β. Ρύθμιση των προτεινόμενων OS παραμέτρων σε κάθε κόμβο [20,22,23].
- Γ. Εγκατάσταση των Greenplum binaries στον κόμβο master [20-25].
- Δ. Εγκατάσταση και ρύθμιση του Greenplum σε όλους τους κόμβους [20,22-25]
- Ε. Επαλήθευση της εγκατάστασης.
- Φ. Δημιουργία των data storages [20,24,25].
- Γ. Clone TPC-DS repository [26]
- Η. Προσθήκη όλων των εξαρτήσεων και προσθήκη ειδικού *bash* κώδικα έτσι ώστε να ταιριάζουν στις απαιτήσεις του συστήματός μας [24,25].
- Ι. Εκτέλεση του TPC-DS και αποθήκευση των αποτελεσμάτων μας.

Αναλυτική περιγραφή καθώς και οι εντολές που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων, βρίσκονται [εδώ](#).

V. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων της εργασίας μας παρατίθενται εδώ. Συγκεκριμένα τρέξαμε δύο TPC-DS για 1 GB και 10 GB φόρτου εργασίας αντίστοιχα στη βάση δεδομένων Greenplum. τα συνοπτικά αποτελέσματα των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν βρίσκονται στο Πίνακα 2.

Πίνακας 2:

	1GB	10 GB
Scale Factor	1(Random) /1(Hash)	10
Load	937/454	1609.898737
Analyze	51/63	145.14586
1 User Queries	205/190	1083.941296
Concurrent Queries	425/384	2451.558825
Q	594/594	594
TPT	410/380	2167.882592
TTT	425/384	2451.558825
TLD	18/9	32.197974
Score_1	4.05793/5.4246	1.072
Score_2	0.4648/0.5133	0.0836

Τα αναλυτικά αποτελέσματα για Generate Data, Data Loads και Queries του κάθε TCP-DS βρίσκονται [εδώ](#).

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθεί στην ενότητα VI. παρακάτω.

VI. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι η μετρική απόδοσης TPC-DS $QphDS@SF$ μετρά τη συνολική απόδοση του Greenplum. Η ποσοτικοποίηση του scalability αποτελεί δύσκολο πρόβλημα. Στην παρούσα εργασία, διερευνήσαμε ένα μικρό κομμάτι του προβλήματος αυτού. Συγκεκριμένα υπολογίσαμε το $QphDS@SF$ για φόρτο εργασίας 1GB και 10GB αντίστοιχα. Παρατηρήσαμε, όπως ήταν αναμενόμενο ότι με την αύξηση του φόρτου εργασίας το $QphDS@SF$ μειώθηκε παρόλου που το Greenplum γενικά βελτιώνει την απόδοσή του όσο αυξάνεται η κλιμακωσιμότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρόλου που αυξήθηκε το workload συνεχίζουμε να έχουμε μόνο 2 segments οπότε δεν προκύπτει παράλληλα με την αύξηση του φόρτου εργασίας και βελτιστοποίηση στη διαμερίστικη και τον διαμοιρασμό των δεδομένων στους workers. Τα αποτελέσματα γενικά δεν είναι τα βέλτιστα δυνατά

δεδομένου ότι έχουμε μόνο δύο workers (segments) στη διάθεσή μας και έτσι δεν αξιοποιούμε το πλεονέκτημα στο scalability των DBMs σαν το Greenplum που οφείλονται στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική τους. Επιπλέον η μετρική απόδοσης τιμής $\$/kQphDS@SF$ έχει σκόπιμα αγνοηθεί σε αυτή την εργασία, καθώς εστιάζουμε μόνο στη κλιμακωσιμότητα του συστήματος. Όμως οι πωλητές αναλυτικών πλατφορμών δεδομένων ανταγωνίζονται τελικά και στην απόδοση της τιμής. Η $\$/kQphDS@SF$ σε διαφορετικό συντελεστή κλίμακας δεν είναι συγκρίσιμη, αλλά μπορεί να είναι συγκρίσιμη σε επίπεδο υπολογιστικής ισχύος. Επόμενες εργασίες μπορούν να εστιάζουν στη διερεύνηση του κατά πόσον απαιτείται μια παρόμοια κλιμακωσιμότητα στη μετρική απόδοσης τιμής.

Για να είναι αποδοτική μια κατανομή (hash, random) πρέπει να μειωθούν όσο περισσότερο γίνεται οι μετακινήσεις των metadata. Επομένως, αφού χρησιμοποιείται map-reduce η συνολική καθυστέρηση εξαρτάται από τη καθυστέρηση του πιο αργού κόμβου. Επίσης, μείωση απόδοσης προκαλείται και όταν υπάρχουν ασυνέχειες στο dataset της βάσης, όπως π.χ. NULL στήλες, οι οποίες οδηγούν σε data skew. Σε τέτοιες περιπτώσεις συνήθως αποφεύγουμε το hashing. Αντίστοιχα, όταν υπάρχει «ποικιλομορφία» στις τιμές των tables ή πρόκειται για historical transactions το hash distribution είναι αποδοτικότερο ιδιαίτερα σε MPP συστήματα. Το random distribution χρησιμεύει συνήθως σε dimension/lookup tables. Στη μελέτη μας συγκρίναμε datasets του 1GB (A,B) για διαφορετικά distributions (hash και random). Επειδή το TPC-DS δημιουργεί δεδομένα παρόμοια με τα πραγματικά transactions, δεν εμπεριέχονται ασυνέχειες και NULL στήλες. Γι'αυτό στο testcase B που έγινε χρήση hash κατανομής, η απόδοση ήταν βελτιωμένη.

Με βάση όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα τόσο στη βελτιστοποίηση της τεχνογνωσίας όσο και στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της αρχιτεκτονικής του ίδιου του συστήματος έτσι ώστε να μπορέσει ένα σύστημα όπως το Greenplum, σχεδιασμένο για OLAP, να επιτύχει επιδόσεις συγκρίσιμες με άλλα παρόμοιας λειτουργίας DBMs όπως το Clickhouse [27] και το Vertica [28].

REFERENCES

- [1] <https://greenplum.org/introduction-to-greenplum-architecture/>
- [2] Darmont, Jérôme. (2009). Data Warehouse Benchmarking with DWEB. 10.4018/9781605662329.ch015.
- [3] <https://www.tpc.org/tpcds/>
- [4] <https://www.teradata.com/>
- [5] <https://www.oracle.com/technetwork/database/exadata/exadata-storage-technical-overview-128045.pdf>
- [6] Andrew Lamb, Matt Fuller, Ramakrishna Varadarajan, Nga Tran, Ben Vandier, Lyric Doshi, and Chuck Bear. 2012. The Vertica Analytic Database: C-Store 7 Years Later. Proc. VLDB Endow. 5, 12 (2012), 1790–1801.
- [7] Anurag Gupta, Deepak Agarwal, Derek Tan, Jakub Kulesza, Rahul Pathak, Stefano Stefani, and Vidhya Srinivasan. 2015. Amazon Redshift and the Case for Simpler Data Warehouses. In Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Melbourne, Victoria, Australia, May 31 - June 4, 2015, Timos K. Sellis, Susan B. Davidson, and Zachary G. Ives (Eds.). ACM, 1917–1923.
- [8] Chaogun Zhan, Maomeng Su, Chuangxian Wei, Xiaoqiang Peng, Liang Lin, Sheng Wang, Zhe Chen, Feifei Li, Yue Pan, Fang Zheng, and Chengliang Chai. 2019. AnalyticDB: Real-time OLAP Database System at Alibaba Cloud. Proc. VLDB Endow. 12, 12 (2019), 2059–2070.
- [9] Zhenghua Lyu, Huan Hubert Zhang, Gang Xiong, Gang Guo, Haozhou Wang, Jinbao Chen, Asim Praveen, Yu Yang, Xiaoming Gao, Alexandra Wang, Wen Lin, Ashwin Agrawal, Junfeng Yang, Hao Wu, Xiaoliang Li, Feng Guo, Jiang Wu, Jesse Zhang, and Venkatesh Raghavan. 2021. Greenplum: A Hybrid Database for Transactional and Analytical Workloads. Proceedings of the 2021 International Conference on Management of Data. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2530–2542. DOI: <https://doi.org/10.1145/3448016.3457562>
- [10] <https://greenplum.org/relationship-and-difference-between-greenplum-and-postgresql/>
- [11] <https://greenplum.org/greenplum-101/>
- [12] M. Poess, RO. Nambiar, D Walrath. 2007. Why You Should Run TCP-DS: A Workload Analysis. - VLDB
- [13] https://www.tpc.org/tpc_documents_current_versions/pdf/tpc-ds_v3.2.0.pdf
- [14] Guoheng Chen and Miso Cilimdzc and Timothy Johnson. EasyChair, 2020. Quantifying Scalability Using Extended TPC-DS Performance Metric. EasyChair Preprint no. 363.
- [15] <https://oceanos-knossos.grnet.gr/home/>
- [16] <https://github.com/greenplum-db/gpdb/releases>
- [17] https://www.tpc.org/tpc_documents_current_versions/current_specifications5.asp
- [18] <https://github.com/pivotal/TPC-DS/archive/refs/tags/v3.0.0.tar.gz>
- [19] https://helios.ntua.gr/pluginfile.php/121627/mod_resource/content/1/%CE%A0%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%AE%20%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%AF%CE%BF%CF%85.pdf
- [20] <http://www.greenplumdba.com/installing-the-greenplum-database>
- [21] <https://greenplum.org/install-greenplum-oss-on-ubuntu/>
- [22] https://topic.alibabacloud.com/a/install-greenplum-cluster-on-ubuntu-1604_8_8_30145484.html
- [23] <http://www.simplifiedata.co.il/greenplum/installing-gpdb-step-by-step>
- [24] <https://t.me/Greenplum>
- [25] <https://groups.google.com/a/greenplum.org/g/gpdb-users>
- [26] <https://github.com/greenbeam2002/TPC-DS-1>
- [27] <https://clickhouse.com/>
- [28] <https://www.vertica.com/>